ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

生物多样性

BIODIVERSITY SCIENCE



主　办

中国科学院生物多样性委员会　Biodiversity Committee, CAS
中国植物学会　Botanical Society of China
中国科学院植物研究所　Institute of Botany, CAS
中国科学院动物研究所　Institute of Zoology, CAS
中国科学院微生物研究所　Institute of Microbiology, CAS

第34卷 第5期
2026年5月

Vol. 34 No. 5
May 2026

https://www.biodiversity-science.net

生 物 多 样 性

SHENGWU DUOYANGXING

第34卷 第5期 2026年5月

目 次

研究报告

植物多样性

25489 横断山区高山冰缘植物毡毛雪莲紧实深色头状花序的生态功能
郝晨阳, 高少羽, 程跃华, 扎西尼玛, 徐波, 杨扬

25494 不同生境川续断形态特征以及传粉者多样性的地理变异模式
李杨, 吕晓琴, 伍英, 陈孝旺, 颜国浩, 王晓月

25482 基于混合效应Cox比例风险模型评估气候与土壤对热带引种植物存活的影响
周丽芳, 慈秀芹, 陈筠灵, 苏艳萍, 申健勇, 李捷

动物多样性

25433 藏东南黑麝及其同域有蹄类物种的生态适应性差异
王倩倩, 陈孝国, 朱锐丰, 张明春, 王新, 李世林, 仁增江措, 彭武, 杨彪

25261 西南山地有蹄类栖息地利用率变化及环境影响: 以关坝村红外相机监测为例
冯杰, 李彦知, 王书理, 李岚曦, 丁鹏飞, 吕冰薇, 孟吉, 史湘莹, 李雪阳

26051 朱鹮对滨海食物的适应性: 恢复东部沿海朱鹮种群的初步探索
朱芸, 王凯红, 李洪磊, 徐向龙, 雷宇, 陈浩, 陈卫华, 蔡新杰, 丁长青

26004 应用激光雷达技术探究北京地区乌鸦夜栖地选择机制
谢冰, 杨海涛, 曹吉鑫, 李进宇, 王茂良, 张微, 李建强, 徐基良

25347 基于公民科学数据的全国地级以上城市公园鸟类群落特征及环境影响因子
周楠, 黄美玲, 谭筱彩, 刘骏杰, 文可, 蒋爱伍

25394 澜沧江下游干流鱼类群落结构特征及外来鱼类入侵风险评估
何天琪, 翟东东, 蔡方陶, 王东, 陈元元, 刘红艳, 熊飞, 刘明典, 段辛斌

25422 广州市陆生野生脊椎动物资源: 多样性、分布与保护空缺
梁健超, 陈淑甜, 何文祥, 熊春妮, 许镇洲, 黄源欣, 刘源志弘, 张浪, 胡慧建

微生物多样性

26028 荒漠草原土壤丛枝菌根真菌群落对降水变化的响应
郭蓉, 吴旭东, 张雨, 康瑞红, 王一凡, 王占军, 蒋齐, 俞鸿千, 马琨

25468 刈割后互花米草残体保留与覆膜对滨海湿地土壤细菌群落结构的影响
黄薇, 刘一凡, 方涛, 赵微, 王荣, 吴婷, 靳瑜, 罗芳丽, 郭允倩, 朱耀军

遗传多样性

25475 基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究: 以枫杨属为例
王姗姗, 刘琦, 李玉, 王天瑞, 戴锡玲, Gregor Kozlowski, 许瑾, 宋以刚

26003 西南地区家鸡线粒体DNA控制区遗传多样性和基因渗入
贾晓旭, 陈皖强, 唐修君, 樊艳凤, 张静, 王海威, 高玉时

生物文化多样性

25041 中国、缅甸、老挝热带香料植物的民族植物学
浦瑀璐, 周仕顺, 李仁

技术与方法

25228 基于改进型谱减法和stacking集成学习的低频海洋哺乳类动物声音分类
曹莉凌, 金朝阳, 张铮, 曹守启

25474 中国鸟类被动声学监测规范与建议
郝泽周, 申小莉, 斯幸峰, 赵岩岩, 魏晨韬, 吴飞, 许晓青, 阙品甲, 董路, 华方圆, 张立勋, 张承云, 刘阳

生物编目

25423 《肯尼亚植物志》编研概况和阶段性成果
魏能, 周亚东, 张彩飞, 王生位, 胡光万, Geoffrey Mwachala, 王青锋

25487 南海翼足类物种多样性与分布
梁竣策, 李开枝, 谭烨辉

封面: 朱鹮(*Nipponia nippon*)是一种古老而优雅的鸟类, 20世纪80年代曾濒临灭绝。经过40余年的保护努力, 其野生种群数量已恢复至7,000余只。本期朱芸等(26051)首次在江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区滨海湿地, 对野化训练朱鹮开展食性转换实验, 探明了其对滨海食物的适应潜力和行为适应过程。封面以江苏盐城滨海湿地生境为背景, 呈现了朱鹮的飞行、叼食行走、水浴、双眼注视和畏缩、理羽、探头观望等行为。(摄影: 陆建良、赵纳勋、张永文、段文斌, 封面背景: 陈国远)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 34 No. 5 May 2026

CONTENTS

Original Papers

Plant Diversity

25489 **Ecological significance of the compact and dark inflorescence of *Saussurea velutina* (Asteraceae) in Hengduan Mountains, Southwestern China**
Chenyang Hao, Shaoyu Gao, Yuehua Cheng, Zhaxinima, Bo Xu and Yang Yang

25494 **Geographic variation patterns in morphological traits and pollinator diversity of *Dipsacus asper* across different habitats**
Yang Li, Xiaoqin Lü, Ying Wu, Xiaowang Chen, Guohao Yan and Xiaoyue Wang

25482 **Assessing plant survival in tropical botanical gardens based on climatic and soil factors using mixed-effects Cox proportional hazards models**
Lifang Zhou, Xiuqin Ci, Junling Chen, Yanping Su, Jianyong Shen and Jie Li

Animal Diversity

25433 **Ecological adaptation differences of the black musk deer and sympatric ungulates in southeastern Xizang**
Qianqian Wang, Xiaoguo Chen, Ruifeng Zhu, Mingchun Zhang, Xin Wang, Shilin Li, Jiangcuo Renzeng, Wu Peng and Biao Yang

25261 **Dynamics of ungulate habitat use and their environmental drivers in the Southwest Mountains: A camera trap monitoring case study from Guanba**
Jie Feng, Yanzhi Li, Shuli Wang, Lanxi Li, Pengfei Ding, Bingwei Lü, Ji Meng, Xiangying Shi and Xueyang Li

26051 **Adaptation of Crested Ibis to coastal foods: A pilot study for reestablishing population in the eastern coastal region of China**
Yun Zhu, Kaihong Wang, Honglei Li, Xianglong Xu, Yu Lei, Hao Chen, Weihua Chen, Xinjie Cai and Changqing Ding

26004 **LiDAR-based investigation of the mechanisms governing nocturnal roost selection by crows in the Beijing urban area**
Bing Xie, Haitao Yang, Jixin Cao, Jinyu Li, Maoliang Wang, Wei Zhang, Jianqiang Li and Jiliang Xu

25347 **Bird community characteristics and their environmental drivers in urban parks across Chinese prefecture-level cities based on citizen science data**
Nan Zhou, Meiling Huang, Xiaocai Tan, Junjie Liu, Ke Wen and Aiwu Jiang

25394 **Characteristics of fish community structure in the lower mainstream of the Lancang River and risk assessment of alien fish invasion**
Tianqi He, Dongdong Zhai, Fangtao Cai, Dong Wang, Yuanyuan Chen, Hongyan Liu, Fei Xiong, Mingdian Liu and Xinbin Duan

25422 **Wild terrestrial vertebrate resources in Guangzhou: Diversity, distribution, and conservation gaps**
Jianchao Liang, Shutian Chen, Wenxiang He, Chunni Xiong, Zhenzhou Xu, Yuanxin Huang, Yuanzhihong Liu, Lang Zhang and Huijian Hu

Microbial Diversity

26028 **Response of soil arbuscular mycorrhizal fungal communities to precipitation changes in the desert steppe**
Rong Guo, Xudong Wu, Yu Zhang, Ruihong Kang, Yifan Wang, Zhanjun Wang, Qi Jiang, Hongqian Yu and Kun Ma

25468 **Effects of mowed *Spartina alterniflora* residues and mulching on soil bacterial community structure in coastal wetlands**
Wei Huang, Yifan Liu, Tao Fang, Wei Zhao, Rong Wang, Ting Wu, Yu Jin, Fangli Luo, Yunqian Guo and Yaojun Zhu

Genetic Diversity

25475 **Cautions on using chloroplast genome-based phylogeny for species identification and biogeography: A case study of *Pterocarya***
Shanshan Wang, Qi Liu, Yu Li, Tianrui Wang, Xiling Dai, Gregor Kozlowski, Jin Xu and Yigang Song

26003 **Genetic diversity and gene introgression of mitochondrial DNA control region in indigenous chickens from Southwest China**
Xiaoxu Jia, Wanqiang Chen, Xiujun Tang, Yanfeng Fan, Jing Zhang, Haiwei Wang and Yushi Gao

Biocultural Diversity

25041 **Ethnobotany of tropical spice plants utilized by ethnic groups in China, Myanmar and Laos**
Yulu Pu, Shishun Zhou and Ren Li

Technology and Methodology

25228 **Low-frequency marine mammal sound classification using improved spectral subtraction and stacking ensemble learning**
Liling Cao, Zhaoyang Jin, Zheng Zhang and Shouqi Cao

25474 **Standards and recommendations for passive acoustic monitoring of birds in China**
Zezhou Hao, Xiaoli Shen, Xingfeng Si, Yanyan Zhao, Chentao Wei, Fei Wu, Xiaoqing Xu, Pinjia Que, Lu Dong, Fangyuan Hua, Lixun Zhang, Chengyun Zhang and Yang Liu

Bioinventories

25423 **Compilation overview and the phase-specific outcomes of *Flora of Kenya***
Neng Wei, Yadong Zhou, Caifeng Zhang, Shengwei Wang, Guangwan Hu, Geoffrey Mwachala and Qingfeng Wang

25487 **Species diversity and distribution of pteropods in the South China Sea**
Junce Liang, Kaizhi Li and Yehui Tan

Cover Illustration: The Crested Ibis (*Nipponia nippon*) is an ancient and elegant bird that faced near extinction in the 1980s. Thanks to decades of sustained conservation efforts, its wild population has recovered to over 7,000 individuals. In this issue, Zhu et al. (26051) report the first diet-shifting experiment to facilitate dietary adaptation in Crested Ibises during their pre-release acclimation in the coastal wetlands of Jiangsu Yancheng Wetland & Rare Birds National Nature Reserve, revealing their potential to adapt to coastal food sources and the behavioral adaptation processes involved. The cover image features the coastal wetland habitat of Yancheng, capturing Crested Ibises engaged in flying, walking with food, bathing, gazing and shrinking back, preening, head-out observation behaviors. (Photographers: Jianliang Lu, Naxun Zhao, Yongwen Zhang, Wenbin Duan; Background: Guoyuan Chen)

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25489, pages 1–12
doi: 10.17520/biods.2025489
cstr: 32101.14.biods.2025489

•研究报告•

横断山区高山冰缘植物毡毛雪莲紧实深色头状花序的生态功能

郝晨阳[1,2#], 高少羽[2,3#], 程跃华[2,4], 扎西尼玛[2], 徐波[1*], 杨扬[2*]

1. 西南林业大学生物与食品工程学院, 昆明 650224; 2. 中国科学院昆明植物研究所植物多样性与特色经济作物全国重点实验室, 昆明 650201; 3. 中国科学院大学, 北京 101408; 4. 西南林业大学林学院, 昆明 650224

摘要: 温室结构是横断山区高山冰缘带植物高度特化适应结构的典型代表之一, 其显著特征为包裹花序的巨大半透明苞片, 主要代表类群有蓼科大黄属(*Rheaum*)的塔黄(*R. nobile*)和水黄(*R. alexandrae*)以及菊科风毛菊属(*Saussurea*)雪莲亚属(Subgen. *Amphilaena*)的苞叶雪莲(*S. obvallata*)和毡毛雪莲(*S. velutina*)等。然而, 与塔黄、水黄以及苞叶雪莲花序在整个生长季节始终由苞片完全包裹不同, 伴随生长季节的推进, 毡毛雪莲选择将其头状花序突出于苞片包围结构之外直至果期种子成熟, 关于此阶段的植物生态适应机制还未有报道。本研究对毡毛雪莲头状花序突出苞片包围结构之后的热力学特性以及此时期的苞片光学特性及其在传粉者吸引和种子生成方面的功能进行了探索。结果表明, 全天、白天和夜间毡毛雪莲头状花序内部平均温度均显著高于周围气温(与植株等高处, 距离地面15–20 cm) 3–5 K (卡尔文温度系数, 以表示温度差异), 在晴天天气状况下两者之间的温度差异更是可以超过20 K; 在晴天、多云和雨天天气状况下头状花序的聚热效益均 > 40%, 并且与周围气温相比, 头状花序具备近100 min的温度缓冲能力。同时, 研究发现毡毛雪莲附着于头状花序的紫红色苞片虽然具备对与增温效果相关的红光和红外光波段入射光的选择滤过性(24.4%–36.0%), 但将苞片完全打开处理却并未对植物的种子数量和质量产生显著影响。光谱视觉分析数据显示, 苞片与叶片之间的色觉反差(0.30 ± 0.02 CH, CH为熊蜂色彩六边形距离单位)显著高于熊蜂(*Bombus*)可识别色彩距离阈值(0.11 CH), 所以苞片可能可以被熊蜂从叶片背景识别出来。本研究证实毡毛雪莲的头状花序凭借其紧实结构和黑褐颜色实现的聚热增温和缓冲保温功能是高山冰缘植物应对高寒生境内夏季冷凉气候和短暂生长期的适应策略, 其紫红色苞片可能具有吸引传粉昆虫的作用, 但仍需在原生地开展更多观测与实验, 例如量化苞片对传粉者访花频率的影响, 以进一步探索和验证其功能。

关键词: 横断山区; 高山冰缘植物; 特化形态结构; 生态适应机制; 毡毛雪莲

郝晨阳, 高少羽, 程跃华, 扎西尼玛, 徐波, 杨扬 (2026) 横断山区高山冰缘植物毡毛雪莲紧实深色头状花序的生态功能. 生物多样性, 34, 25489. doi: 10.17520/biods.2025489; cstr: 32101.14.biods.2025489.

Hao CY, Gao SY, Cheng YH, Zhaxinima, Xu B, Yang Y (2026) Ecological significance of the compact and dark inflorescence of *Saussurea velutina* (Asteraceae) in Hengduan Mountains, Southwestern China. Biodiversity Science, 34, 25489. doi: 10.17520/biods.2025489; cstr: 32101.14.biods.2025489.

Ecological significance of the compact and dark inflorescence of *Saussurea velutina* (Asteraceae) in Hengduan Mountains, Southwestern China

Chenyang Hao[1,2#], Shaoyu Gao[2,3#], Yuehua Cheng[2,4], Zhaxinima[2], Bo Xu[1*], Yang Yang[2*]

1 *College of Biological Science and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*
2 *State Key Laboratory of Plant Diversity and Specialty Crops, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*
4 *College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*

收稿日期 Received: 2025-12-10; 接受日期 Accepted: 2026-02-19
基金项目: 云南省创新团队项目(202305AS350004)和兴滇英才项目(XDYCQNRC-2022-0215) Supported by the Yunnan Innovation Team Project (202305AS350004) and Xingdian Talent Program (XDYCQNRC-2022-0215)
共同第一作者 Co-first authors
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: yangyang@mail.kib.ac.cn; alpine_flora@swfu.edu.cn

ABSTRACT

Aims: As one of the most prominent highly specialized morphologies evolved in alpine subnival plants in Himalayan-Hengduan Mountains, Southwestern China, 'greenhouse plant' is characterized by the huge and semi-translucent bracts that cover inflorescence. However, unlike some typical 'greenhouse plants', such as *Rheum nobile* and *R. alexandrae* (Polygonaceae) and *Saussurea obvallata* (Asteraceae) that have their inflorescence covered by bracts throughout the entire growing season, some other plant species, such as *S. velutina* studied here has their inflorescence covered by bracts in the early part of the growing season only, while in the majority of the growing season, this plant chooses to extrude its inflorescence outside the cover of bracts till fruit maturation. The adaptive strategy behind such an alteration in morphology remained largely unknown.

Methods: In this study we purposely investigated the thermal situation of the inflorescence in *S. velutina* after it has extruded from the bract covering. Given these bracts gradually changed their colors from green-yellow to deep pink-purple during this period and they are still attached to the inflorescence, we also assessed the optical properties of the deep pink-purple bracts and explored their potential role on attracting pollinators by assessing the visual model of the bracts to bumblebee (*Bombus*) as compared with bedrock in its natural habitat and the green-colored leaves. In addition, the influence of the deep pink-purple bracts on seed productions was investigated by gently striping these bracts off.

Results: Our results showed that the temperature of inflorescence remained on average 3–5 K (Calvin temperature index, used to indicate the differences of temperature) higher than adjacent air temperature at the same height of the plant individuals (15–20 cm above ground) during both daytime and nighttime, with the greatest deviation (> 20 K) reaching at sunny-days. Under all prevailing weather conditions (sunny, cloudy, rainy), the dark and solid inflorescence exhibited a pronounced heating efficiency (> 40%) and the buffering capacity of which reached at nearly 100 min as compared with adjacent air temperature. However, although the deep pink-purple bracts could still exhibit selective filtering (24.4%–36.0%) of red and infrared wavelength range that were attributed to warming effects, the artificial treatment on inflorescence did not significantly reduce the seed quantity and quality compared with controlled inflorescence with bracts kept their natural morphology. The color distance from pink-purple bracts to green leaves (0.30 ± 0.02 CH) was significantly higher than the color distance of *Bombus terrestris* for recognizing one object from the background. suggesting a function of pollinator attraction of pink-purple bracts and call for some more *in situ* observations and experiments (e.g. examinations on the impact of bracts on pollination visit rates) to further support this conclusion.

Conclusion: The warming and buffering effects of the inflorescence of *S. velutina* are explained by its dark and solid structure. Such a highly specialized morphology is an adaptive strategy of subnival plant against the cool climate during the majority of summer monsoon and short period of growing season in their habitat at exceptionally high elevations.

Key words: Himalaya-Hengduan Mountains; alpine subnival plants; highly specialized morphology; ecological adaptive strategy; *Saussurea velutina*

高山冰缘带紧邻雪线, 位于高山生境的最前端, 在山地植物垂直带谱中位居海拔最高处, 是陆地生态系统中最为极端的生境之一(Myers et al., 2000)。然而, 受高原环境中多变的气候、多样的地形、独特的生物交流屏障和迁移通道等因素的综合影响(Ives & Barry, 1974; Mani & Giddings, 1980), 青藏高原冰缘生态系统孕育了全球同类生境中最为丰富的冰缘植物多样性。在青藏高原冰缘生境内高强紫外辐照、极大昼夜温差、极低积温、短暂植物生长季节等极端环境和气候因子的选择压力下, 植物物种进化形成了许多重要的特殊结构(Körner, 2001; 吴征镒等, 2005; 陈丽等, 2013), 例如垫状植物、棉毛植物和垂头植物等, 其中最负盛名的当数温室植物(greenhouse plant), 其特化特征为包裹花序的巨大半透明苞片, 代表种类为蓼科大黄属(*Rheum*)的塔黄(*R. nobile*)和水黄(*R. alexandrae*), 以及菊科风毛菊属(*Saussurea*)雪莲亚属(Subgen. *Amphilaena*)的苞叶雪莲(*S. obvallata*)和毡毛雪莲(*S. velutina*)等。根据作者目前掌握的资料, 这种巨大半透明的苞片只在青藏高原东南部横断山区高山冰缘植物中被发现, 可能反映了冰缘植物对高原局部气候和环境的适应, 而此特化结构存在于亲缘关系很远的植物类群中, 则可能也是趋同进化的结果。

温室植物巨大半透明苞片的适应机制和进化策略一直备受研究者的关注。例如日本学者对塔黄和水黄的研究发现其半透明苞片具有选择性吸收

紫外线并透过光合作用激活光和红外辐射光的功能, 能够保护繁殖器官、遮挡紫外辐照并具备升温和保温作用(Tsukaya & Tsuge, 2001; Tsukaya et al., 2002)。此外, 塔黄的半透明苞片还具有防止雨水对花粉萌发造成不利影响的功能, 其在花期通过视觉吸引也可以显著提升传粉者访问率。同时, 苞片形成的温室结构也为昆虫提供了栖息场所, 增加了授粉成功率, 并在果期通过促进胚珠发育来促进种子成熟(Song et al., 2013, 2015)。相似的生态功能也见于毡毛雪莲的半透明苞片(Yang & Sun, 2009)。

有趣的是, 与塔黄、水黄及苞叶雪莲的花序在整个生长季节均由半透明苞片完全包裹不同, 根据作者野外观察, 毡毛雪莲的头状花序仅在生长季节前期(7月初至8月初)由半透明苞片包裹, 而在生长季节的大部分时间(8月初至9月底)内, 该种植物选择将其头状花序完全突出于苞片的包裹之外。事实上, 这一适应策略也广泛见于如唐古特雪莲(*S. tangutica*)、毛背雪莲(*S. pubifolia*)、多鞘雪莲(*S. polycolea*)、褐花雪莲(*S. phaeantha*)等菊科风毛菊属雪莲亚属可分布至海拔4,500 m以上区域的种类中。同时, 在最新植物系统学研究中, 头状花序二次聚集形成紧实结构也被认为是主要分布于高山或高海拔生境的雪莲亚属分支和雪兔子亚属(Subgen. *Eriocoryne*)分支植物种类的重要分类鉴定特征(Xu et al., 2025), 可能具有重要的生态功能。然而, 关于上述植物类群在其头状花序突出苞片后的温度变化特点却鲜有报道, 使得研究者无法理解其中可能蕴含的不同冰缘植物种类在适应极端高寒环境过程中采取的多样化方式。更加有趣的是, 伴随发育进程, 苞片颜色由最初包裹花序时的黄绿色逐渐转变为紫红色, 但其生态功能如何变化却未见报道。

基于上述知识盲区或空白, 本研究对毡毛雪莲在整个生长季节的苞片变化特征进行了定点观测, 并选择性地对头状花序突出苞片包裹之后的热力学特性进行监测, 同时, 对其紫红色苞片的光学和解剖学特征进行测定, 并初步关注了紫红色苞片对植物主要传粉者熊蜂(*Bombus*)的吸引功能以及对种子生成的影响。试图回答如下问题: (1)毡毛雪莲苞片打开与其头状花序发育阶段间的关系如何? (2)头状花序的热力学特征及其生态适应意义如何? (3)毡毛雪莲逐渐变为紫红色苞片的生态功能如何?

1 材料与方法

1.1 研究地点与研究对象

研究地点位于云南省德钦县白马雪山普津垭口高山冰缘生境(28º24′ N, 99º02′ E, 4,690 m)。根据距离研究地点最近的气象站(28º22′ N, 98º59′ E, 4,810 m, 距研究地点直线距离5 km)的监测数据(2024年1–12月), 白马雪山高山冰缘生境年平均温度–0.6℃, 最冷月(1月)平均气温–10℃, 平均低温–12℃, 极端最低温–15℃, 最热月(7月)平均气温6.9℃, 平均低温5.4℃, 极端最低温2.1℃。

研究对象为菊科风毛菊属雪莲亚属植物毡毛雪莲, 主要分布于云南西北部(丽江、德钦)、四川西部(稻城)、西藏东南部(察隅、八宿)等海拔4,500–5,000 m的高山草地、灌丛及流石滩(石铸和靳淑英, 1999)。

1.2 苞片形态特征观察

在2024年7月4日至9月24日(自生长季节前期至末期), 采用物候相机(SG-990V, 郑州旗锋光电科技有限公司)对研究地点的毡毛雪莲进行定时拍摄(每天早、中、晚各拍摄1张照片, 以利于根据不同光线条件选择合适照片进行物候分析), 并结合对研究地点植株的定期观察以确定苞片形态特征变化并分析其与头状花序发育进程间的关系。

1.3 植物和环境温度监测

基于前人针对毡毛雪莲头状花序苞片包裹时期内部温度的监测(Yang & Sun, 2009), 本研究选择在毡毛雪莲头状花序突出苞片包裹后, 对其内部温度进行监测。分别于2024年8月3–11日和8月26日至9月5日(合计20 d)对研究地点8株目测健康的毡毛雪莲头状花序内部温度(子房处)以10 min为记录间隔进行连续监测, 并同期记录周围气温(与植株等高处, 距离地面15–20 cm)和入射辐照强度。头状花序内部温度由K型线性热电偶温度探头测量, 并连接四通道电子记录器进行记录(Center 309, 群特科技股份有限公司), 周围气温由放置于遮光罩内的温度探头(Tidbit 001, Onset Computer Corporation)测定和记录, 入射辐照强度由温度光照度记录仪(MX2202, Onset Computer Corporation)测定和记录。

1.4 苞片与叶片光学特征检测

同样, 在前人针对毡毛雪莲淡黄色苞片光学特性研究的基础上(Yang & Sun, 2009), 本文选择针对苞片变为紫红色后对其光学特性进行检测。于2024年8月14日在研究地点采集4株目视健康的毡毛雪莲植株, 保存于 < 5℃的保温箱中, 在24 h内运回中国科学院昆明植物研究所实验室。从每个植株各取4片紫红色苞片和基生绿色叶片, 使用光谱仪(Ocean Optics 2000+, Ocean Optics)通过聚四氟乙烯漫反射白板(WS-1, Ocean Optics)作为参照标准, 以1 nm为间隔测定苞片、基生叶片在入射光250–1,750 nm波段的反射率和透射率。

1.5 苞片与叶片解剖特征观测

于2024年8月28日在研究地点采集4株目视健康的毡毛雪莲植株, 保存于 < 5℃的保温箱中, 在24 h内运回至中国科学院昆明植物研究所实验室。从每个植株上取下4片苞片和叶片, 在每个苞片和叶片上各取边长1 cm的正方形小块, 固定后使用冷冻电镜观测苞片及叶片的上下表皮及横截面并拍照记录。

1.6 种子百粒重及数量分析

在苞片不再包裹花序时期(2024年7月27日), 选择8株目视健康的毡毛雪莲植株, 分为对照组(正常生长)与处理组(完全打开苞片)各4株, 处理组使用橡皮筋将附着于花序的苞片完全打开, 并反向固定于茎干上。在传粉者充分传粉、小花凋谢后, 于2024年8月20日用尼龙袋包裹对照组与处理组的花序, 以避免种子飞散, 并于2024年9月24日(种子分散前), 收集对照组与处理组花序, 带回实验室自然风干后对两组植株种子进行计数并称量质量。

1.7 数据分析

1.7.1 头状花序的聚热效益分析

头状花序的聚热效益采用以下公式进行计算: 温度提升比例(聚热效益) (%) = (花序温度 – 环境温度)/环境温度 × 100%, 旨在量化植物花序温度相较于环境温度的相对提升比例。

1.7.2 头状花序对温度的缓冲效应分析

头状花序对其内部温度的缓冲效应采用时滞分析法进行探索。在生物学研究中, “时滞”被定义为当气候(如温度)变量发生变化时, 植被或植物需经过一定时间才可对气候因子的变化产生响应, 此类延迟响应机制通常通过特定时间尺度内植被或植物与气候因子相关性的滞后特征进行量化(Richard et al, 2008; Gessner et al, 2013)。时间序列的滞后相关分析采用显著性水平($P < 0.05$) t检验的统计结果作为判别依据。

在本研究中, 按照观测时间顺序, 我们将毡毛雪莲头状花序温度的时间序列和同时间的周围气温按时间序列对齐排序后, 以10 min为时间间隔, 在提前180 min至滞后180 min时间段内设定多个连续的时间滑动窗口, 进行时滞互相关分析, 当相关系数绝对值达到最大值时所对应的时间即为与周围气温相比, 头状花序温度所滞后的时间。同时, 为避免数值差异过大被掩盖的情况发生, 采用Z标准化对数值进行标准化处理(Phillips et al., 1999; 吴丽丽等, 2014; 庞静等, 2015)。

1.7.3 色觉模型分析

植物苞片被认为可能具有吸引传粉者的功能(Song et al., 2024), 为了量化紫红色苞片对高山冰缘带主要传粉者熊蜂的视觉吸引力, 采用色彩六角形模型(colour hexagon model, CH model)进行色觉对比分析。具体而言, 我们以叶片为参照标准, 计算了苞片与叶片之间的颜色对比度。由于蜂的色觉较为保守, 在本研究中我们采用欧洲熊蜂(*Bombus terrestris*) (Skorupski et al., 2007)的光受体敏感曲线构建视觉色彩六角形模型。该模型针对三色视觉系统建立, 广泛适用于膜翅目昆虫的视觉建模分析(Chittka, 1992), 其基本原理是根据观察者的视锥细胞敏感度, 计算目标颜色光谱引发的量子刺激, 进而将这些刺激值投射到特定的坐标系中, 以比较颜色。在熊蜂色彩六角形模型中, 我们使用毡毛雪莲苞片与叶片在300–700 nm波段的光谱反射率计算了苞片与叶片的欧几里得距离(熊蜂视觉为三色系统, 视觉距离单位为CH)以得到色点之间的颜色反差(颜色距离)。两个色点之间距离越大, 表示两种颜色的反差越大, 它们(在本研究中指苞片与叶片)之间的相似度就越低, 越容易被区分(Chittka, 1992)。经实验研究(Dyer & Chittka, 2004), 低于0.11 CH的颜色差异无法被蜂类区分; 反之, 则可被区分。

1.7.4 统计分析

毡毛雪莲花序内部平均温度、极端值与周围气温、苞片打开处理组与完整对照组种子数量和质量

的差异显著性采用成对样本*t*检验法(paired-samples *t*-test)进行检验; 聚热效益采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行检验。花序温度与环境温度之间的相关性采用线性回归进行分析, 毡毛雪莲苞片和叶片与熊蜂视觉距离分辨界限(0.11 CH)以单样本*t*检验法(one-sample *t*-test)进行检验。本研究所有数据分析在R软件中完成, 利用Origin 2024进行图片绘制。

2 结果

2.1 苞片形态变化与开花时机

依据放置于植物原生地物候相机拍摄的照片确认, 自2024年7月5日至8月3日, 目标植株花序由苞片包裹(共计30 d) (图1a–c), 自8月4日至9月24日其花序完全突出于苞片包裹之外(共计52 d) (图1d–f)。值得注意的是, 小花选择在头状花序突出苞片包裹6 d后(8月10日)呈现完全开放状态。所以, 苞片包裹与否和植物繁殖器官的发育进程相关, 毡毛雪莲选择在花期时将其头状花序突出于苞片包裹之外可能利于传粉(图1e)。

2.2 野外实验期间研究地点天气状况以及周围气温

依据入射辐照强度结合物候照片判断, 2024年8月3–11日及8月26日至9月5日研究地点经历的晴天、多云及雨天天数分别为10 d、6 d和4 d (图2a)。所以, 在此期间开展的植物及环境气温的监测覆盖了毡毛雪莲在其原生地生长季节中可能经历的所有天气状况, 获得的监测数据具有代表性。

2024年8月3–11日, 研究地点周围气温的日平均气温、白天均温(08:00–19:00)、夜间均温(20:00–07:00)、极端最高温和极端最低温与8月26日至9月5日差异不显著(表1), 均属于植物生长季节中期。所以, 在下文中, 我们将这两个监测阶段的环境温度数据合并进行分析。

2.3 头状花序内部温度与周围气温

野外监测实验进行期间, 在所有天气状况下, 头状花序温度均显著高于同期周围气温, 且在正午至午后两者间的温差达到最大(晴天: 20.7 K; 阴天: 14.6 K; 雨天: 11.7 K; K为卡尔文温度系数, 以表示温度差异) (图2b)。有趣的是, 我们发现在夜间大部分时间内头状花序的温度显著高于周围气温, 只在黎明前后逐渐降低至与周围气温相近或相同水平, 显示了头状花序具有较好的夜间保温能力(图2b)。同时, 头状花序的日均温(t = 21.38, P < 0.001)、白天均温(t = 17.42, P < 0.001)和夜间均温(t = 14.80,

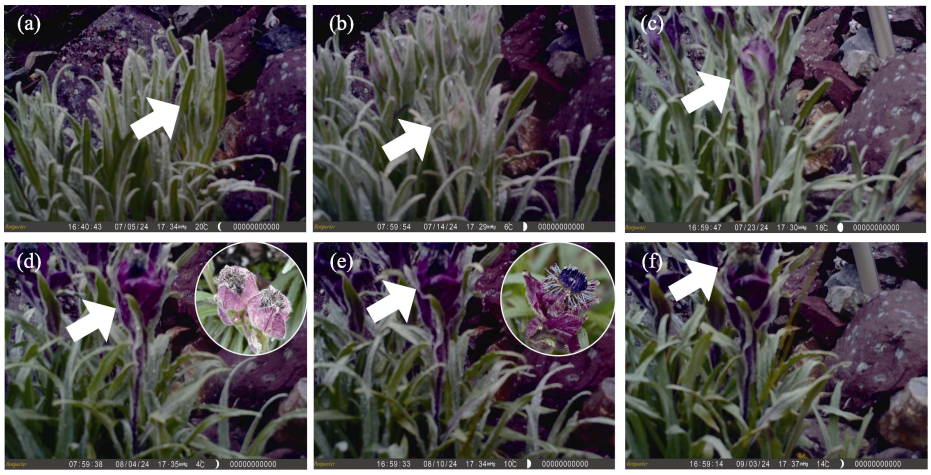


图1 2024年7–9月毡毛雪莲物候变化。(a)生长季节初期, 目标植物头状花序由黄绿色苞片包裹; (b–c)伴随生长发育进程, 包裹目标植物头状花序的苞片颜色逐渐变为紫红色; (d)目标植物头状花序突出于苞片包裹; (e)目标植物头状花序小花开放; (f)目标植物进入果期。白色箭头指示物候事件观测点, (d–e)右上图像为对应物候时期, 在研究地点进行踏查时以相机拍摄植株照片。

Fig. 1 Phenological changes of *Saussurea velutina* from July to September 2024. (a) During the early growing season, the inflorescence of *S. velutina* was covered by yellow-green colored bracts; (b–c) Along with the progresses of growing season, the color of the bracts that covered the inflorescence of *S. velutina* gradually changed from yellow and green to deep pink-purple; (d) The inflorescence of *S. velutina* extruded from the cover of bracts; (e) Florets in the inflorescences were in flowering time; (f) *S. velutina* entered into fruiting period. For each pictures, arrow point as reference points for observing the event of the morphological change. The upper right picture inserted into (d) and (e) indicates the corresponding phenological stages, which were recorded by camera during the regular site visits.

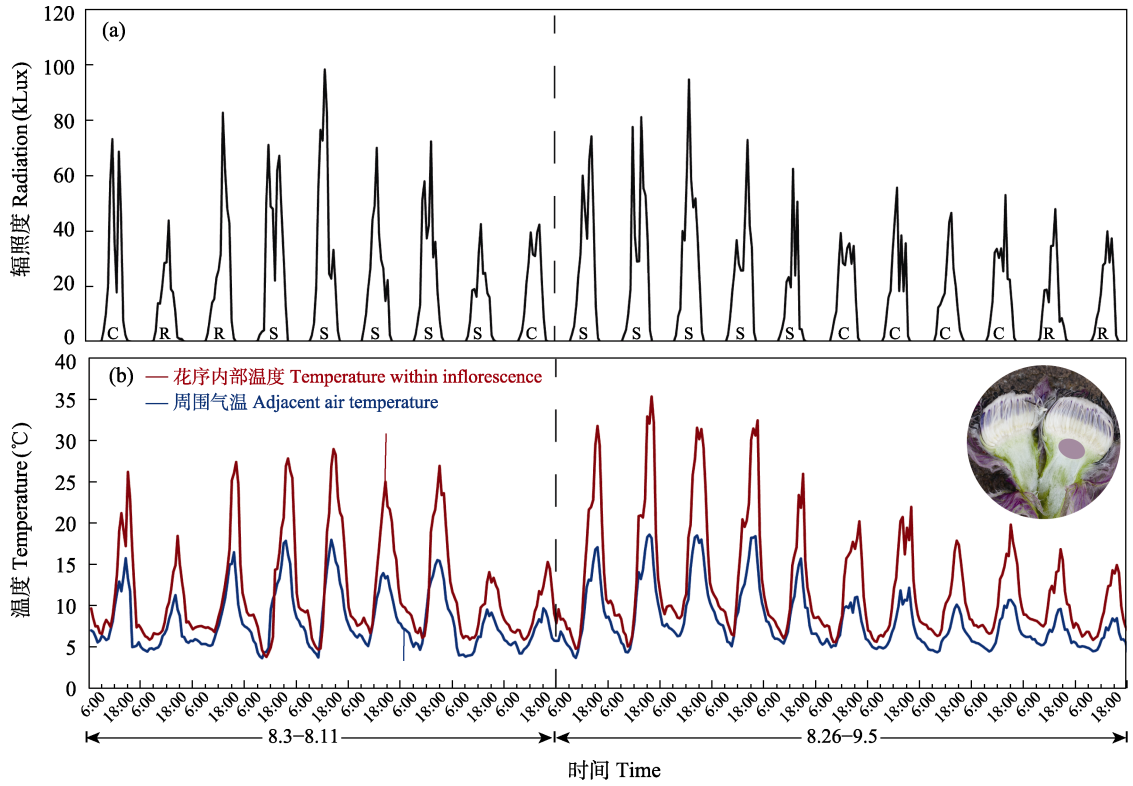


图2　2024年8–9月(共计20 d)野外监测期间植物原生地的入射辐照强度(a)和毡毛雪莲花序内部及周围气温(与植株等高处, 距离地面15–20 cm) (b)。S: 晴天; C: 多云; R: 雨天。(b)右侧花序纵切照片中粉红色区域指示测量花序内部温度位置(子房处)。

Fig. 2　*In situ* incident radiation (a), temperature within inflorescence of *Saussurea velutina* and the adjacent air temperature (at the same height of plant individual, 15–20 cm aboveground) (b) during the on-site measurements from August to September 2024 (a total of 20 d). S, Sunny day; C, Cloudy day; R, Rainy day. The pink area in the insert picture in (b) indicates the position (ovary) of measurement of temperature within inflorescence.

表1　不同监测时间段植物原生地周围气温

Table 1 Adjacent air temperature of *Saussurea velutina* at different monitoring time periods *in situ*

	日均温 Daily mean temperature	白天均温(08:00–19:00) Mean temperature during daytime (08:00–19:00)	夜间均温(20:00–07:00) Mean temperature during nighttime (20:00–07:00)	极端低温 The lowest temperature	极端高温 The highest temperature
8月3–11日 Aug. 3 to 11	8.1 ± 0.5℃	9.4 ± 0.6℃	6.9 ± 0.4℃	3.6℃	17.9℃
8月26日至9月5日 Aug. 26 to Sept. 5	8.1 ± 0.5℃	9.2 ± 0.6℃	7.1 ± 0.5℃	3.6℃	18.5℃

$P < 0.001$)也均极显著高于周围气温对应温度指标(图3)。

此外, 我们发现在晴天条件下, 头状花序温度显著高于周围气温的情况主要出现在正午(12:00)之后, 而在上午(08:00–12:00)两者间的温度差异并不显著; 相反, 在多云或雨天条件下, 头状花序温度在所有时段均显著高于周围气温(图4)。

2.4　头状花序的聚热效益与缓冲特性

头状花序的全天聚热效益为46.2% ± 4.0%, 其中白天和夜间的聚热效益分别为42.3% ± 2.3%和46.8% ± 6.1%, 三者间差异不显著($F = 0.302$, $P = 0.746$) (图5a)。晴天、阴天、雨天头状花序的聚热效益分别为46.0% ± 2.2%、49.1% ± 5.9%和46.1% ± 4.6%, 不同天气状况下, 头状花序的聚热效益差异不显著($F = 0.153$, $P = 0.861$) (图5b)。

虽然毡毛雪莲头状花序温度与周围气温呈显著的相关性($R^2 = 0.86$, $P < 0.01$) (图6a), 但温度时滞性分析显示, 花序温度对周围气温变化的响应滞后值为近100 min (图6b)。所以, 头状花序对于周围气温的变化具有良好的缓冲能力。

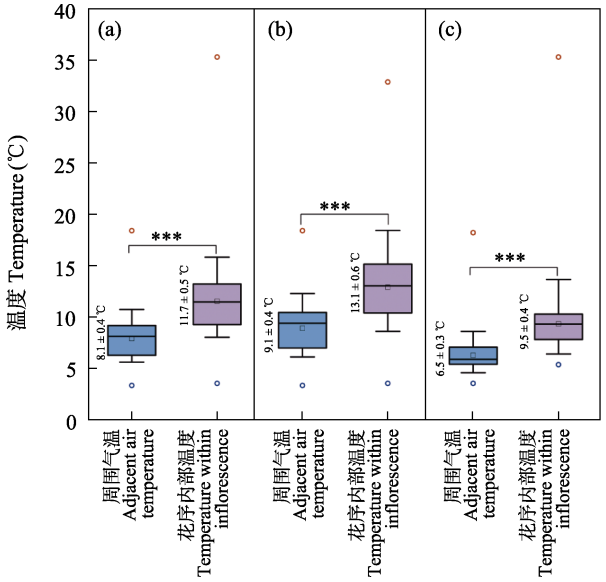


图3　2024年8–9月野外监测期间植物原生地毡毛雪莲头状花序与周围气温全天平均温度(a)、白天(08:00–19:00)平均温度(b)和夜间(20:00–07:00)平均温度(c)比较(n = 20 d)。框内须线代表中位数；上下须线代表均温波动范围，空心矩形代表均值；红色空心圆为最高温，蓝色空心圆为最低温。* P < 0.001。**

Fig. 3　During the on-site measurements from August to September 2024, *in situ* daily mean temperature (a), mean temperature during daytime (08:00–19:00) (b) and nighttime (20:00–07:00) (b) within the inflorescence of *Saussurea velutina* and the adjacent air temperature. For each temperature parameter, n = 20 d. Boxes indicate the mean temperature, with lines indicating median, upper and lower whiskers indicating the range of the mean temperature. Red and blue empty dots in each box indicate the highest and the lowest temperature, respectively. *** P < 0.001.

2.5　苞片的光学特性

毡毛雪莲苞片对于紫外波段(220–380 nm)入射光的反射率和透射率极低(< 5%)，反映了其对于紫外波段入射光优良的吸收作用(> 95%) (图7)。在可见光波段(380–780 nm)，苞片的反射率和透射率分别为4.0%–21.8%和2.5%–17.8%，其吸收率为60.4%–93.5% (图7a)。在红外波段(780–1,750 nm)，苞片的反射率和透射率分别为21.2%–36.0%和17.5%–24.4%，此时其吸收率最低，仅39.6%–61.3% (图7a)。与苞片对于不同波长的选择滤过性不同，毡毛雪莲叶片对250–1,750 nm波段入射光的透射率均很低(0%–5%) (图7b)。

2.6　苞片的解剖学特征

毡毛雪莲苞片和叶片上表面均被厚实被毛(图8a, c)。然而，与叶片不同，苞片未发育出明显的栅栏组织和海绵组织，仅由两层细胞构成(图8b, d)。

2.7　苞片及叶片光谱视觉特性

基于色彩六边形模型，以叶片作为参照标准，苞片在熊蜂视觉中落入紫外光区域(图9)，苞片与叶片之间的色彩反差(0.30 ± 0.02 CH)与0.11 CH的差异显著(t = 10.159, P = 0.002)。所以，紫红色苞片可能可以被熊蜂从叶片背景识别出来，可能具有吸引传粉昆虫的功能。

2.8　苞片折叠处理组和完整对照组种子数量及百粒重比较

将附着苞片进行完全折叠的实验处理组的种子数量(75 ± 6.8粒)和百粒重(0.19 ± 0.02 g)与保持苞片自然状态的完整对照组的种子数量(93 ± 14.6粒)和百粒重(0.26 ± 0.03 g)差异不显著(数量: t = 1.113, P = 0.382; 百粒重: t = 1.032, P = 0.41)。所以，在花序突出于苞片包裹后，附着于花序上的苞片对植物种子生成的影响较弱。

3　讨论

植物原生地数据是高山植物功能生态学研究的核心。与之前针对毡毛雪莲相关的研究仅开展了3 d的野外监测(Yang & Sun, 2009)不同，本研究通过前后20 d的野外连续温度监测以覆盖植物生长季节所有可能经历的天气状况，并结合物候发育进程信息，证实毡毛雪莲头状花序在脱离苞片包裹后(占整个生长季长度近2/3)，仍具有良好的聚热升温以及显著的热量缓冲和夜间保温功能，可能对植物适应横断山区高山冰缘生境夏季阴冷的气候特点、加速繁殖器官发育具有重要的生态适应意义。

3.1　头状花序结构的热力学特征及其生态适应意义

在较低的环境温度下获得并利用热能以快速生长适应生境内极其短暂的生长期被认为是高山植物适应进化的关键(Billings & Mooney, 1968)。所以，丰富多样的“热量捕捉”特化适应结构在高山植物中应运而生。例如，遍布全球各大洲高山生境的垫状植物拥有球形或半球形结构，使其表面积大于体积，这一特点对提升植物的热量获取能力以及增大光合作用面积具有重要意义(Barlow, 1986; Körner, 2001; 孟丰收等, 2013; Kikvidze et al., 2015)。在局部地区，例如横断山区棉毛植物代表水母雪兔子(*Saussuera medusa*) (Yang et al., 2008)、

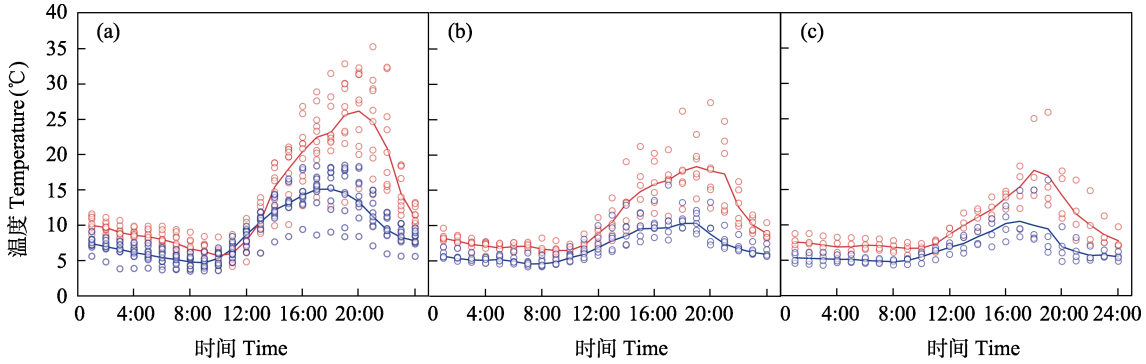


图4　2024年8–9月野外监测期间晴天(a)、多云(b)和雨天(c)天气状况下毡毛雪莲头状花序内部温度每小时均温(红色线, *n* = 晴天、多云、雨天天数)及对应的天气状况下各天每小时温度(红点)与周围气温每小时均温(蓝色线)、各天每小时温度(蓝色点)

Fig. 4　During the on-site measurements from August to September 2024, under sunny (a), cloudy (b), and rainy (c) days, the hourly mean temperature within the inflorescence of *Saussurea velutina* (red line) and the adjacent air temperature (blue line) (*n* = number of sunny, cloudy and rainy days) and the hourly temperature of each days (red dots: inflorescence temperature; blue dots: adjacent air temperature) under the corresponding weather conditions (i.e. sunny day, cloudy day and rainy day).

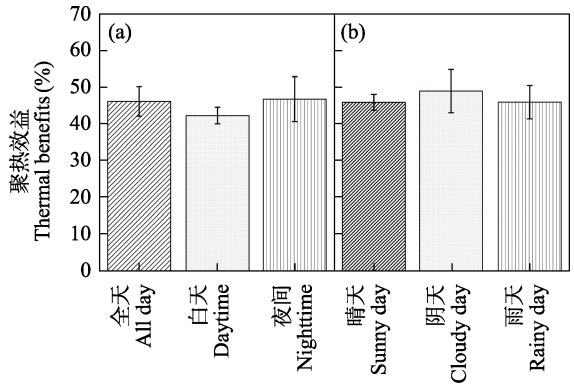


图5　全天、白天、夜间(a)以及晴天、多云和雨天(b)天气状况下毡毛雪莲头状花序的聚热效益

Fig. 5　Thermal benefits obtained from the inflorescent of *Saussurea velutina* during entire day, daytime, and nighttime (a) and during sunny day, cloudy day, and rainy day (b)

亚北极地区的吉尔吉柳(*Salix gilgiana*) (Krog, 1955)和星花木兰(*Magnolia tomensa*) (Tsukaya & Tsuge, 2001)包裹花序的厚实被毛以及横断山区温室植物代表塔黄(Song et al,, 2013)、毡毛雪莲(Yang & Sun, 2009)和苞叶雪莲(郝晨阳等, 未发表数据)包裹其花序的半透明膜质苞片均被证实具有优良的聚热增温作用。与之相似, 毡毛雪莲头状花序的紧实结构及其深褐色颜色对入射光的高效率吸收在增加花序温度方面发挥了同样重要的作用, 且此特化结构还见于雪莲亚属及雪兔子亚属(如水母雪兔子、绵头雪兔子(*Saussurea laniceps*)、羽裂雪兔子(*S. leucoma*)等)分布于横断山海拔4,500 m以上的多个种类中, 显然是一种适应高山冰缘生境气候特点的进化策略(Tsukaya et al., 2002; 杨扬和孙航, 2006)。与之相反, 在雪莲亚属中如华中雪莲(*S. veitchiana*, 分布海拔1,850–2,900 m)、钝苞雪莲(*S. nigrescens*, 分布海拔2,200–3,000 m) (石铸和靳淑英, 1999)等分布海拔较低的种类的头状花序则相对比较松散。

有趣的是, 在本研究中我们首次发现除了聚热增温的功能外, 毡毛雪莲的头状花序还具有显著的热量缓冲和夜间保温作用。在Yang和Sun (2009)的研究中, 研究者采用直径为2 mm的金属棒状探头对毡毛雪莲由苞片包裹的头状花序温度进行测量, 可能会对头状花序结构造成不可避免的破坏; 而在本研究中, 伴随监测设备的迭代更新, 我们选择采用直径仅为0.3–0.5 mm的线状温度探头深入头状花序内部(达子房处, 图2)进行测量, 且监测时间更长, 可更加客观真实地反映此特化结构内部的温度状况。据此, 我们有理由相信, 在毡毛雪莲头状花序由苞片包裹时期, 其热量缓冲和夜间保温功能可能更加突出。遗憾的是, 鉴于前人已经开展相关研究, 在此次研究中, 我们并未对毡毛雪莲头状花序由苞片包裹时期的温度进行再次测量, 在今后的研究中可对相关数据进行补充测量, 以全面覆盖毡毛雪莲的生长周期。

高山植物特化结构的夜间保温功能常见于热带高山植物种类。例如东非肯尼亚山的盖尼千里光(*Senecio keniodendron*)和肯尼半边莲(*Lobelia keniensis*), 包裹其繁殖器官的厚实被毛被证实具有良好的保温与减缓晴朗夜间辐射性降温的功能

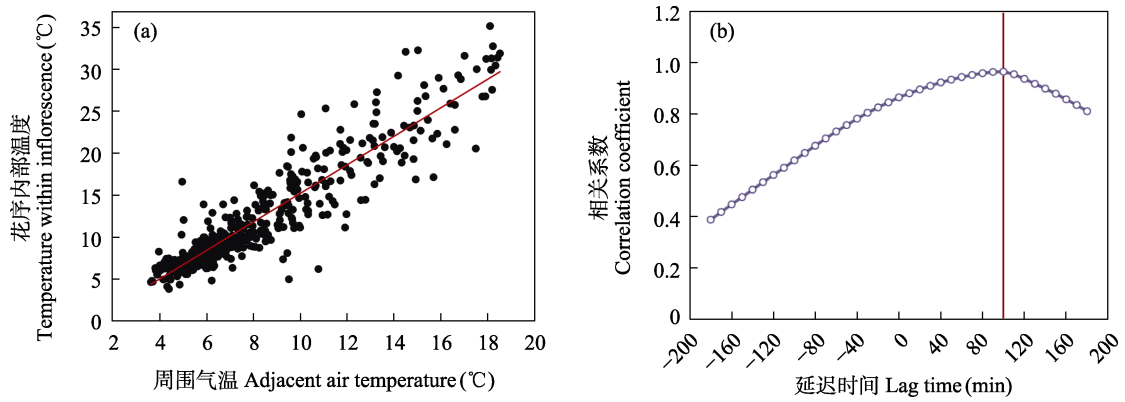


图6　毡毛雪莲花序内部温度与周围气温的相关性(a)及对周围气温的缓冲效应(b)

Fig. 6　Significant positive correlation (a) and buffering effects (b) between the temperature within inflorescence of *Saussurea velutina* with the adjacent air temperature

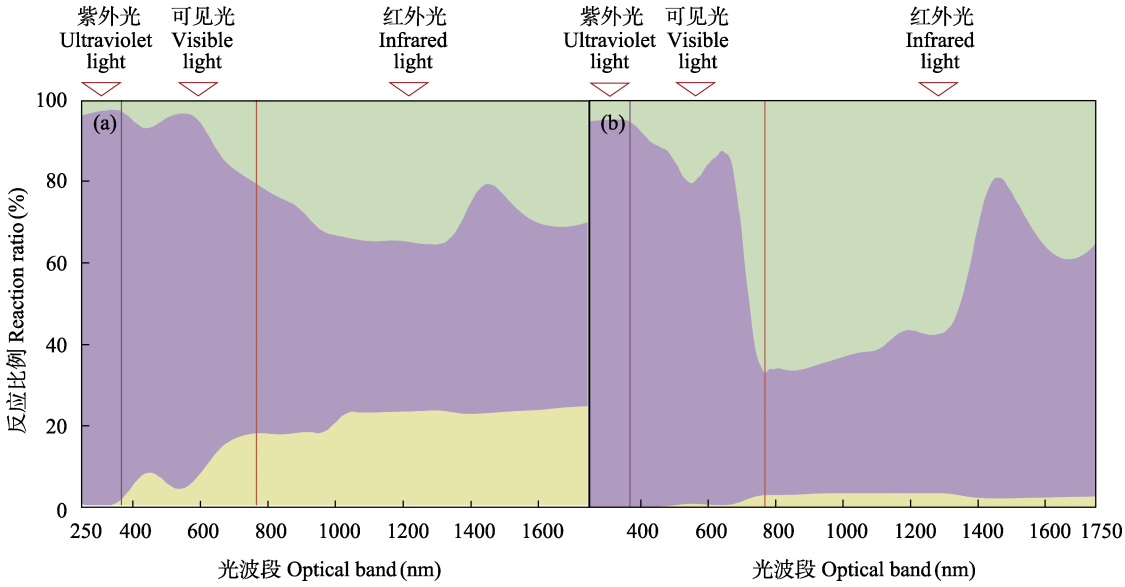


图7　毡毛雪莲苞片(a)与叶片(b)对250–1,750 nm波段入射光的反射率(绿色面积)、吸收率(紫色面积)和透射率(黄色面积)

Fig. 7　The reflectance (green area), absorptance (purple area), and transmittance (yellow area) of bracts (a) and leaves (b) to 250–1,750 nm incoming radiation

(Hedberg, 1964; Beck et al., 1980)。热带高山地处接近赤道的极低纬度区域，其高海拔生境昼夜温差极大，往往在白天正午时近地面气温可达35℃以上，而夜间则可降至–10℃以下(Hedberg, 1964)，需要高山植物进化出良好的保温组织结构或生理适应机制(例如过冷却避冻机制)。然而，毡毛雪莲生长的横断山区地处亚热带至暖温带，虽然其位于高山冰缘带生境，但由于受夏季海洋性季风带来的暖湿气候影响，其受到低温冰冻威胁的概率极低(Yang & Sun, 2009)。而且已有研究证实，与毡毛雪莲系统位置接近的水母雪兔子叶片可以在–5℃以下的低温环境中不显现出冻害损伤表征(陈玉珍和卢存福, 2002)，所以，毡毛雪莲头状花序的夜间保温能力可能不是应对低温冻害的适应策略，而是与增加繁殖器官的温度以提升种子产量相关(Young, 1984; Kudo, 1995)。另一方面，采用目前通用的美国食品与农业协会(Food and Agriculture Organization of the United Nations)对植物季节开始日期(日均温连续5日大于5℃)和结束日期(日均温连续5日小于5℃)的定义，依据距离研究地点最近的位于海拔4,810 m的气象站数据(2023–2025年)计算，本研究地点高山冰缘带植物生长季节始于6月上旬，终于8月下旬，

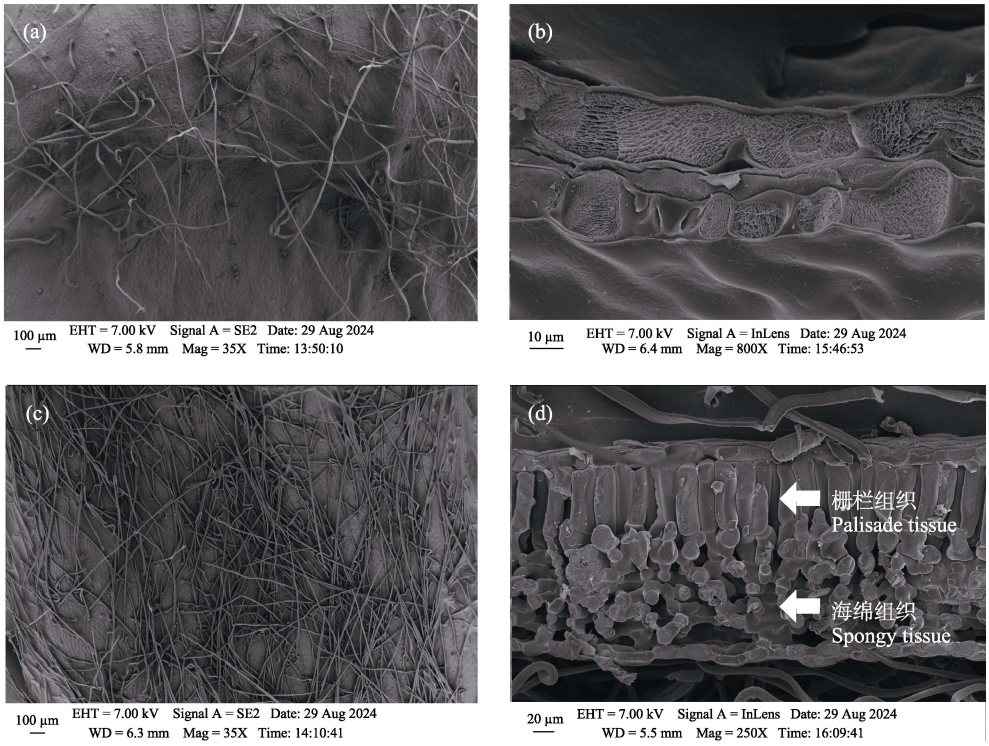


图8　苞叶雪莲苞片上表皮(a)和纵截面(b)与叶片上表皮(c)和纵截面(d)电镜扫描图像

Fig. 8　Scanning electron micrograph of bract and leaves portions of *Saussurea velutina*. (a) (c) Upper surface; (b) (d) Vertical section.

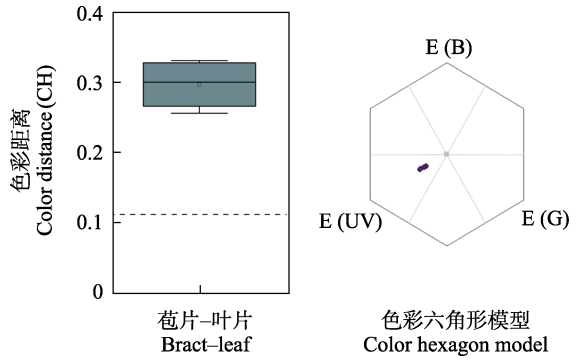


图9　以毡毛雪莲叶片为参照测定的苞片的色彩距离及色彩六边形模型，图中虚线代表0.11 CH的熊蜂色觉识别阈值。色彩六边形图中，E (UV)、E (UV)、E (B)依次对应熊蜂视觉系统中紫外、蓝色和绿色受体信号对目标的色度响应方向。

Fig. 9　Color distance and visual hexagon model of bracts in *Saussurea velutina* with leaves as background. Dot line in left diagram indicates the threshold value of 0.11 CH for identification by bumblebee (*Bombus terrestris*). In the color hexagon model, E (UV), E (B), and E (G) denote the chromatic response directions of the UV, blue, and green photoreceptor signals, respectively, toward the target in the visual system of bumblebee.

仅持续12–14 w。所以我们认为，以毡毛雪莲为代表的横断山区高山冰缘生境菊科雪莲亚属和雪兔子亚属植物，其结构紧实、颜色黑褐的头状花序具有的聚热升温和缓冲保温功能，可能为植物繁殖器官发育营造了一个相对温暖且稳定的小环境，以应对其原生地因多云多雨天气盛行而导致的冷凉气候及环境热量的短期剧烈波动，并加速繁殖器官的发育进程，适应高山冰缘生境极为短暂的植物生长期。同时，由于毡毛雪莲小花开放于头状花序突出苞片之后，所以其头状花序显著高于周围气温的热力学特征还可能成为阴雨天气状况下传粉昆虫(如熊蜂)的热量“补给点” (Barfod et al., 2011)，以提高传粉几率和效率，但是相关的科学假设还需要更多的野外观察和实验进行验证。

3.2　苞片的生态适应意义

苞片是植物的重要组织器官，在植物的适应进化中可能发挥重要作用和功能(Song et al., 2024)。作为喜马拉雅地区高山冰缘带“温室植物”的典型代表，塔黄、水黄及毡毛雪莲具有巨大半透明苞片，已被证实能够改善繁殖器官的微环境并吸引传粉昆虫(Yang & Sun, 2009; Song et al., 2013, 2015)。如前所述，与塔黄、苞叶雪莲等植物的花序在生长周期内完全由苞片包裹不同，在小花开放后，毡毛雪莲头状花序选择突出于苞片结构，但其苞片仍旧附着于

头状花序基部, 且颜色由最初的黄绿色变为紫红色。虽然此时期内毡毛雪莲苞片同样具有对与聚热功能相关的红外至远红外波段入射光的选择滤过性, 且在解剖学特征方面与其黄绿色时期几乎相同(Yang & Sun, 2009), 但是人为折叠苞片使头状花序完全暴露并未显著改变种子的数量和质量。所以, 我们认为在头状花序突出苞片包围后, 苞片的功能已经不再体现在聚热增温方面。有研究证实苞片可能具有吸引传粉昆虫的作用(Borges et al., 2003; Keasar et al., 2006; Song et al., 2013, 2015)。本研究发现, 苞片打开后毡毛雪莲的小花才开放, 所以我们认为其紫红色苞片也可能具有类似的传粉者吸引功能。这一科学假设也获得了视觉分析数据的支持。当然, 我们也认识到, 本次研究采用的色觉模型的受体并非严格意义上的植物自然生境中的实际熊蜂种类。所以, 有关紫红色苞片具有吸引传粉昆虫功能的研究结论还需要在植物原生地开展一系列观测和实验验证, 例如苞片对传粉者访花频率的影响, 这也是今后研究应该重点关注的方向。

在本研究中, 我们证实毡毛雪莲紧实深色的头状花序具有显著的聚热增温和缓冲保温作用, 而其在小花完全开放时选择将头状花序突出于苞片包裹之外, 可能与便于传粉昆虫拜访有关, 期间转变为紫红色的苞片可能具有吸引传粉昆虫的功能。且如前文所述, 具有这类头状花序二次聚集形成紧实结构只出现在菊科风毛菊属雪莲亚属和雪兔子亚属分支分布于高海拔的植物种类中(Xu et al.., 2025), 是高山冰缘植物应对极端高寒生境内冷凉多变气候与极短生长季节选择压力的重要特化功能性状。

致谢: 感谢迪庆白马雪山高山冰缘生态系统云南省野外科学观测研究站共享气象数据, 感谢中国科学院昆明植物研究所郭泽敏博士和黄涛博士在光谱测量及数据分析方面给予的指导和帮助。

参考文献

Barfod AS, Hagen M, Borchsenius F (2011) Twenty-five years of progress in understanding pollination mechanisms in palms (Arecaceae). Annals of Botany, 108, 1503–1516.

Barlow BA (1986) Flora and Fauna of Alpine Australasia: Ages and Origins. CSIRO Publishing, Clayton.

Beck E, Scheibe R, Senser M, Müller W (1980) Estimation of leaf and stem growth of unbranched *Senecio keniodendron* trees. Flora, 170, 68–76.

Billings WD, Mooney HA (1968) The ecology of Arctic and alpine plants. Biological Reviews, 43, 481–529.

Borges RM, Gowda V, Zacharias M (2003) Butterfly pollination and high-contrast visual signals in a low-density distylous plant. Oecologia, 136, 571–573.

Chen L, Dong HJ, Peng H (2013) Diversity and distribution of higher plants in Yunnan, China. Biodiversity Science, 21, 359–363. (in Chinese with English abstract) [陈丽, 董洪进, 彭华 (2013) 云南省高等植物多样性与分布状况. 生物多样性, 21, 359–363.]

Chen YZ, Lu CF (2002) Freezing tolerance of calli and suspension cell cultures in alpine plant *Saussurea meduasa* Maxim. Chinese Bulletin of Botany, 19, 219–223. (in Chinese with English abstract) [陈玉珍, 卢存福 (2002) 水母雪莲愈伤组织和悬浮培养细胞的抗冻性研究. 植物学通报, 19, 219–223.]

Chittka L (1992) The colour hexagon: A chromaticity diagram based on photoreceptor excitations as a generalized representation of colour opponency. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 170, 533–543.

Dyer AG, Chittka L (2004) Biological significance of distinguishing between similar colours in spectrally variable illumination: Bumblebees (*Bombus terrestris*) as a case study. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 190, 105–114.

Gessner U, Naeimi V, Klein I, Kuenzer C, Klein D, Dech S (2013) The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. Global and Planetary Change, 110, 74–87.

Hedberg O (1964) Features of afroalpine plant ecology. Acta Phytogeographica Suecica, 49, 1–144.

Ives JD, Barry RG (1974) Arctic and Alpine Environments. Routledge, London.

Keasar T, Pollak G, Arnon R, Cohen D, Shmida A (2006) Honesty of signaling and pollinator attraction: The case of flag-like bracts. Israel Journal of Plant Sciences, 54, 119–128.

Kikvidze Z, Brooker RW, Butterfield BJ, Callaway RM, Cavieres LA, Cook BJ, Lortie CJ, Michalet R, Pugnaire FI, Xiao S, Anthelme F, Björk RG, Cranston BH, Gavilán RG, Kanka R, Lingua E, Maalouf JP, Noroozi J, Parajuli R, Phoenix GK, Reid A, Ridenour WM, Rixen C, Schöb C (2015) The effects of foundation species on community assembly: A global study on alpine cushion plant communities. Ecology, 96, 2064–2069.

Körner C (2001) Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. Springer, Heidelberg.

Krog J (1955) Notes on temperature measurements indicative of special organization in Arctic and subarctic plants for utilization of radiated heat from the sun. Physiologia Plantarum, 8, 836–839.

Kudo G (1995) Ecological significance of flower heliotropism in the spring ephemeral *Adonis ramosa* (Ranunculaceae). Oikos, 72, 14–20.

Mani MS, Giddings LE (1980) Ecology of Highlands. Springer, Dordrecht.

Meng FS, Shi PL, Yan W, He YT (2013) The function of cushion plants in alpine ecosystems: Patterns and mechanisms. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 19, 561–568. (in Chinese with English abstract) [孟丰收, 石培礼, 闫巍, 何永涛 (2013) 垫状植物在高山生态系统中的功能: 格局与机制. 应用与环境生物学报, 19, 561–568.]

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403, 853–858.

Pang J, Du ZQ, Zhang XY (2015) Time-lagged response of vegetation to hydro-thermal factors in Xinjiang region. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 36(7), 82–88. (in Chinese with English abstract) [庞静, 杜自强, 张霄羽 (2015) 新疆地区植被对水热条件的时滞响应. 中国农业资源与区划, 36(7), 82–88.]

Phillips N, Oren R, Zimmermann R, Wright SJ (1999) Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest. Trees, 14, 116–123.

Richard Y, Martiny N, Fauchereau N, Reason C, Rouault M, Vigaud N, Tracol Y (2008) Interannual memory effects for spring NDVI in semi-arid South Africa. Geophysical Research Letters, 35, 2008GL034119.

Shih C, Jin SY (1999) Compositae (8): Cynareae [*Saussurea*]. In: Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 78 (ed. Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita), p. 31. Science Press, Beijing. (in Chinese) [石铸, 靳淑英 (1999) 菊科(8): 菜蓟族[风毛菊属]. 见: 中国植物志(第78卷) (中国科学院中国植物志编辑委员会), p. 31. 科学出版社, 北京.]

Skorupski P, Döring TF, Chittka L (2007) Photoreceptor spectral sensitivity in island and mainland populations of the bumblebee, *Bombus terrestris*. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 193, 485–494.

Song B, Chen JQ, Lev-Yadun S, Niu Y, Gao YQ, Ma R, Armbruster WS, Sun H (2024) Multifunctionality of angiosperm floral bracts: A review. Biological Reviews, 99, 1100–1120.

Song B, Stöcklin J, Peng DL, Gao YQ, Sun H (2015) The bracts of the alpine 'glasshouse' plant *Rheum alexandrae* (Polygonaceae) enhance reproductive fitness of its pollinating seed-consuming mutualist. Botanical Journal of the Linnean Society, 179, 349–359.

Song B, Zhang ZQ, Stöcklin J, Yang Y, Niu Y, Chen JG, Sun H (2013) Multifunctional bracts enhance plant fitness during flowering and seed development in *Rheum nobile* (Polygonaceae), a giant herb endemic to the high Himalayas. Oecologia, 172, 359–370.

Tsukaya H, Fujikawa K, Wu SG (2002) Thermal insulation and accumulation of heat in the downy inflorescences of *Saussurea medusa* (Asteraceae) at high elevation in Yunnan, China. Journal of Plant Research, 115, 263–268.

Tsukaya H, Tsuge T (2001) Morphological adaptation of inflorescences in plants that develop at low temperatures in early spring: The convergent evolution of "downy plants". Plant Biology, 3, 536–543.

Wu LL, Ren ZY, Zhang C (2014) Response of NDVI to temperature and precipitation changes and its lag time in North Shaanxi. Chinese Journal of Agrometeorology, 35(1), 103–108. (in Chinese with English abstract) [吴丽丽, 任志远, 张翀 (2014) 陕北地区植被指数对水热条件变化的响应及其时滞分析. 中国农业气象, 35(1), 103–108.]

Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Peng H, Li DZ (2005) Origin and differentiation of endemism in the flora of China. Acta Botanica Yunnanica, 27, 577–604. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 彭华, 李德铢 (2005) 中国植物区系中的特有性及其起源和分化. 云南植物研究, 27, 577–604.]

Xu LS, Song ZQ, Li T, Jin ZC, Zhang BY, Du SY, Liao SY, Zhong XJ, Chen YS (2025) New insights into the phylogeny and infrageneric taxonomy of *Saussurea* based on hybrid capture phylogenomics (Hyb-Seq). Plant Diversity, 47, 21–33.

Yang Y, Körner C, Sun H (2008) The ecological significance of pubescence in *Saussurea medusa*, a high-elevation Himalayan "woolly plant". Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 40, 250–255.

Yang Y, Sun H (2006) Advances in the functional ecology of alpine and Arctic plants. Acta Botanica Yunnanica, 28, 43–53. (in Chinese with English abstract) [杨扬, 孙航 (2006) 高山和极地植物功能生态学研究进展. 云南植物研究, 28, 43–53.]

Yang Y, Sun H (2009) The bracts of *Saussurea velutina* (Asteraceae) protect inflorescences from fluctuating weather at high elevations of the Hengduan Mountains, southwestern China. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 41, 515–521.

Young TP (1984) Solar irradiation increases floral development rates in afro-alpine *Lobelia telekii*. Biotropica, 16, 243–245.

(责任编委: 陈又生　责任编辑: 黄祥忠)

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25494, pages 1–16
doi: 10.17520/biods.2025494
cstr: 32101.14.biods.2025494

•研究报告•

不同生境川续断形态特征以及传粉者多样性的地理变异模式

李杨[1,2], 吕晓琴[1,2], 伍英[1,2], 陈孝旺[1,2], 颜国浩[1,2], 王晓月[1,2*]

1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学国家林业和草原局西南喀斯特山地生物多样性保护重点实验室, 贵阳 550025

摘要: 传粉者介导的花形态变异多集中在特化的传粉系统中, 对于广泛分布且泛化传粉的植物, 其形态特征以及传粉者类群如何随着地理环境而产生变异, 以及二者与经纬度、海拔因子的相关性, 目前尚不清楚。我们前期的研究发现川续断科植物川续断(*Dipsacus asper*)在我国西南地区广泛分布, 具有典型的泛化传粉系统, 为探究该问题提供了理想材料。本研究以川续断为研究对象, 在湖北、四川、云南和贵州13个野生川续断的集中分布居群开展实验, 通过测量植物的形态特征, 比较了其在不同居群内和居群间的变异系数; 观察每个川续断居群访花昆虫的类型并计算了访花频率, 测量了主要传粉熊蜂的虫体特征; 统计了川续断不同居群的自然结实率。结果表明, 川续断不同居群的形态特征有显著变化, 叶片和茎的变异系数较大, 而花序大小的变异系数较小, 其中小金、建始、盐源和习水居群的花序大于其他居群。川续断主要的传粉者为熊蜂属(*Bombus*)、蜜蜂属(*Apis*)、管状蚜蝇属(*Eristalis*)、蛾蝶类等, 其中蜂类是重要的传粉者。川续断不同居群的传粉者类型以及访花频率存在显著差异, 小金、建始、盐源和习水居群主要是由虫体较大的熊蜂传粉, 川续断的花管长和广泛分布的弗里熊蜂(*Bombus friseanus*)的吻长没有显著相关性。川续断的植株高度、茎、叶、花序大小和弗里熊蜂的虫体长等特征均随着海拔的升高显著减小; 植株高度、弗里熊蜂的吻长随着经度的增加显著增加, 茎、叶、花序大小、弗里熊蜂腹部随着经度的增加显著减小; 叶、花序大小、弗里熊蜂头和胸的厚度、腹部随着纬度的增加显著增加, 弗里熊蜂的吻长随着纬度的增加显著减小。不同地理分布的川续断自然结实率随着经度的增加而增加, 随纬度的增加显著减小, 随着海拔升高呈现增加的趋势。广布种的形态特征和传粉者的多样性随着地理梯度的变化呈现显著变异, 这种变异可能源于植物与传粉者以及生境中经纬度以及海拔因子的共同作用。不同地理环境中的植物通过花形态的变化并借助多样化的传粉者来保障自身的繁殖成功。

关键词: 地理变异; 川续断; 形态特征; 传粉者; 繁育成功

李杨, 吕晓琴, 伍英, 陈孝旺, 颜国浩, 王晓月 (2026) 不同生境川续断形态特征以及传粉者多样性的地理变异模式. 生物多样性, 34, 25494. doi: 10.17520/biods.2025494; cstr: 32101.14.biods.2025494.

Li Y, Lü XQ, Wu Y, Chen XW, Yan GH, Wang XY (2026) Geographic variation patterns in morphological traits and pollinator diversity of *Dipsacus asper* across different habitats. Biodiversity Science, 34, 25494. doi: 10.17520/biods.2025494; cstr: 32101.14.biods.2025494.

Geographic variation patterns in morphological traits and pollinator diversity of *Dipsacus asper* across different habitats

Yang Li[1,2], Xiaoqin Lü[1,2], Ying Wu[1,2], Xiaowang Chen[1,2], Guohao Yan[1,2], Xiaoyue Wang[1,2*]

1 *College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China*
2 *Key Laboratory of Southwest Karst Mountain Biodiversity Conservation of National Forestry and Grassland Administration, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China*

ABSTRACT

Aims: Pollinator-mediated variation in floral morphology is mostly observed in specialized pollination systems. For widely distributed plants that rely on generalized pollination, it remains unclear how their morphological traits and

收稿日期 Received: 2025-12-11; 接受日期 Accepted: 2026-03-29
基金项目: 国家自然科学基金(32360262; 31901208)、贵州省科学技术项目(黔科合人才XKBF[2025]029)和贵州省科学技术项目(黔科合平台贵医大LH(2025)重点003) Supported by the National Natural Science Foundation of China (32360262; 31901208), Guizhou Province Science and Technology Project (XKBF[2025]029) and Guizhou Province Science and Technology Project (GMULH (2025) 003)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wang.xiaoyue1989@163.com

pollinator assemblages vary along geographic gradients, and their correlations with latitude, longitude and altitude. Our preliminary study has revealed that *Dipsacus asper* (Dipsacaceae) is widely distributed in southwestern China and exhibits a typical generalized pollination system, making it an ideal material for investigating this question.
Methods: In this study, we took *D. asper* as the experimental material and conducted field investigations across 13 wild populations in Hubei, Sichuan, Yunnan, and Guizhou provinces. We measured the morphological traits of the plants, compared the morphological characteristics among populations, and calculated the coefficients of variation (*CV*) within and between populations. Additionally, we observed and recorded the pollinator types in each population and calculated their visitation frequencies. We also measured the body characteristics of the main pollinator bumblebees. Finally, we quantified natural seed set of *D. asper* across the different populations.
Results: The results indicated significant variation in the morphological traits of *D. asper* across different populations. Specifically, the *CV* were high for leaf and stem traits, whereas inflorescence size showed low variation. *Dipsacus asper* plants from Xiaojin, Jianshi, Yanyuan, and Xishui populations exhibited larger inflorescences compared to other populations. The primary pollinators of *D. asper* included *Bombus*, *Apis*, *Eristalis*, and Lepidoptera, with bees serving as key pollinators. Both pollinator composition and visitation frequency varied markedly among populations. The larger-bodied bumblebees was main pollinator for plant in Xiaojin, Jianshi, Yanyuan, and Xishui populations. There was no significant correlation between the floral tube length of *D. asper* and the proboscis length of widely distributed *Bombus friseanus*. Plant height, stem, leaf, and inflorescence size of *D. asper*, as well as the morphological traits of *B. friseanus*, decreased significantly with increasing elevation and they also varied with longitude and latitude. Plant height and the proboscis length of *B. friseanus* increased significantly with increasing longitude, while the sizes of stems, leaves, inflorescences, and the abdomen of *B. friseanus* decreased significantly with increasing longitude. Leaf size, inflorescence size, the thickness of the head and thorax, and the abdomen of *B. friseanus* increased significantly with increasing latitude, whereas the proboscis length of *B. friseanus* decreased significantly with increasing latitude. Additionally, the natural seed set of *D. asper* with different geographic distributions showed an increasing trend with the increase of longitude, a significant decreasing trend with the increase of latitude, and a significant increasing trend with the increase of altitude.
Conclusion: The morphological traits and pollinator diversity of widely distributed plant species exhibit significant variation along geographic gradients. This variation may result from the combined effects of plant–pollinator interactions and abiotic environmental factors. Across different geographic environments, plants ensure their reproductive success by adapting floral morphology and utilizing diverse pollinators.
Key words: geographic variation; *Dipsacus asper*; morphological traits; pollinators; reproductive success

在不同地理环境中，植物与动物受到的生物及非生物环境因素的影响存在差异，为了适应环境并完成生存和繁衍，它们进化出许多适应性的性状(Hu et al., 2023)。作为陆地植物中多样性最高的类群，大多数开花植物(被子植物)依赖动物授粉(Ollerton et al., 2011; Tong et al., 2023)。这一过程中，传粉动物通过获取植物花报酬(主要为花粉和花蜜)来维持生存，植物则借助动物活动实现有效传粉以繁育后代(Willmer, 2011)。不同地理环境下，植物与传粉者的多样性及其相互作用促进生物的繁殖和生存(Stanley et al., 2021; Layek et al., 2024)。植物花部性状的地理变异是适应环境的直观体现，这种变异通常是由传粉者与非生物环境等多重因素共同驱动的(黄双全, 2014; Johnson, 2025)。

不同地理环境所涵盖的气候与生态因子差异驱动形成了多样化的植被类型和物种群落，进而导致传粉者的组成和行为在不同的区域发生变化，显著影响传粉媒介的种类分布(Bingham & Orthner, 1998; 王怡等, 2022)。进化生态学家Stebbins (1970)曾经提出，植物花部特征主要由当地访花频率最高、传粉效率最强的传粉者塑造，这一观点后来被衍生为“最有效的传粉者法则” (most effective pollinator principle)。Thompson (1994, 1999, 2005)提出的地理镶嵌协同演化理论(geographic mosaic theory of coevolution)强调时间和空间作用决定协同演化的结果，认为花形态的分化跟地理上传粉者的镶嵌分布有关，成对物种或者成群物种的协同演化发生在不同的地理分布种群中，而非当地种群水平上(Medeiros et al., 2018)。在专性的传粉互作系统中，花部特征的地理变异往往与传粉者形态特征的区域变异相匹配。例如, Pauw等(2009)在南非的研究发现鸢尾科锐茎细管鸢尾(*Lapeirousia anceps*)的花管长和长吻蝇类*Moegistorhynchus longirostris*的吻长在不同的群落中有很大差异，它们的地理分布呈现

出相匹配的变化格局。尼泊尔5个居群的姜科紫花象牙参(*Roscoea purpurea*)花冠管长度和专性的传粉者虻(*Philoliche longirostris*)的喙长呈显著相关, 传粉者对花冠管长度有强烈的选择(Paudel et al., 2016)。叶下珠科小果叶下珠(*Kirganelia microcarpa*)的花柱坑深度、子房壁厚度在不同种群间存在变异, 而其专性产卵传粉蛾类和欺骗者蛾类的产卵器长度也发生变异(Hao et al., 2023)。五味子科南五味子(*Kadsura longipedunculata*)在不同地理区域的种群中, 其花部形态、气味等特征存在地理变异, 其专性产卵传粉瘿蚊的组成也随地理位置发生变化(Hao et al., 2024)。

海拔、经纬度等环境因子不仅可通过生理代谢直接塑造植物的营养生长和繁殖器官的构建(苗乐乐, 2024; Hou et al., 2025; 刘兴文, 2025), 也可通过影响传粉者的地理分布、物候活动和访花效率间接驱动花部性状的适应性分化(Pi et al., 2021)。随着海拔升高, 温度和可利用资源均会降低, 而低温会抑制细胞分裂导致植株矮化, 但为了保证繁殖成功, 植物花部特征往往表现出异速生长(向响等, 2021)。随着经纬度的变化, 降水、日照、土壤条件和传粉者的组成和多样性也发生变化, 植物的大小、资源分配、花展示与单花结构也会随着地理梯度而变化(Li et al., 1998; Liang et al., 2023)。对于我国西南部玉龙雪山5个亚高山和高山群落中84种虫媒草本开花植物的花粉数、胚珠数以及其他花部特征对海拔梯度响应的研究发现, 随着海拔升高, 单花的花粉数及花粉和胚珠比值(pollen/ovule, P/O)分别呈边缘性显著增加和显著增加的趋势, 而单株的花序高度、单花数等则显著降低(Nepal et al., 2023)。李海东等(2015)调查了报春花科的二型花柱植物海仙报春(*Primula poissonii*)的花部特征在16个居群的变异, 发现其长、短柱型的花冠管开口大小、花药高度以及短柱花柱头高度与海拔均呈正相关, 而花冠大小、长柱花的花瓣长度等性状与海拔呈负相关; 绝大部分性状均随着经纬度的增加而减小。

目前对于传粉者驱动植物形态变异的研究多集中于相对特化的传粉系统(例如长吻蝇类与长花冠管植物), 对于广泛分布、高度泛化的传粉系统植物, 其形态特征与传粉者类型在不同地理环境下是如何变化的目前还不清楚; 泛化传粉植物的形态特征以及相关传粉者的虫体特征与经纬度、海拔等因子的相关性的报道也较少。前期的调查研究发现川续断(*Dipsacus asper*)是泛化的传粉系统, 有熊蜂属(*Bombus*)、蜜蜂属(*Apis*)、食蚜蝇类、蛾蝶类等昆虫为其传粉(王晓月, 2017), 并且在云南、四川、湖北、贵州等地广泛分布, 是沟边、草丛、林缘和田野路旁常见的一种野生植物(刘永, 2009)[①], 为持续探究泛化传粉系统植物的形态特征和传粉者类型的地理变异模式及形态特征与经纬度、海拔等因子的相关性提供了宝贵材料。本文以川续断为研究对象, 在我国西南地区十多个居群开展以下实验: (1)统计每个野生居群的经纬度、海拔、生境信息, 测量川续断的形态特征, 分析其形态特征与经纬度、海拔的相关性, 比较不同居群花部特征的差异, 计算植物形态特征在居群内和居群间的变异系数; (2)通过访花观察确定每个居群川续断的传粉者, 计算访花频率; 记录并分析川续断花序整个开花过程中白天传粉者的种类和数量; 捕捉各个居群的传粉者, 并重点测量了广泛分布的传粉熊蜂的虫体特征, 分析了熊蜂吻长与川续断花管长的相关性以及虫体特征与经纬度、海拔的相关性; (3)统计川续断不同居群自然状态的结实率。

1 材料与方法

1.1 研究材料及地点

川续断是川续断科川续断属(*Dipsacus*)的一种多年生草本植物, 在中国分布广泛, 主要集中在湖北、湖南、江西、广西、云南、贵州、四川等省区, 多生长在沟边、草丛以及田野路旁等生境。川续断的植株高度可达2 m, 叶为羽状全裂, 长8–20 cm, 宽2–13 cm, 叶面被白色刺毛或乳头状刺毛, 背面沿脉密被刺毛; 头状花序, 球形或卵圆形, 花序长和宽均约2–3 cm, 每个花序大约有200个单花, 花通常为白色或者淡黄色, 雄蕊4个, 着生于花冠管上, 明显超出花冠, 花柱通常短于雄蕊, 柱头短棒状, 雌雄异熟(图1), 花期为7–9月, 单花期大约5 d。其果实为瘦果, 一般呈长倒卵柱状, 果期9–11月, 由于雌雄异熟, 川续断没有自动自交的能力(王晓月, 2017)。

① 刘永 (2009) 川续断资源调查及质量评价研究. 硕士学位论文, 成都中医药大学, 成都.

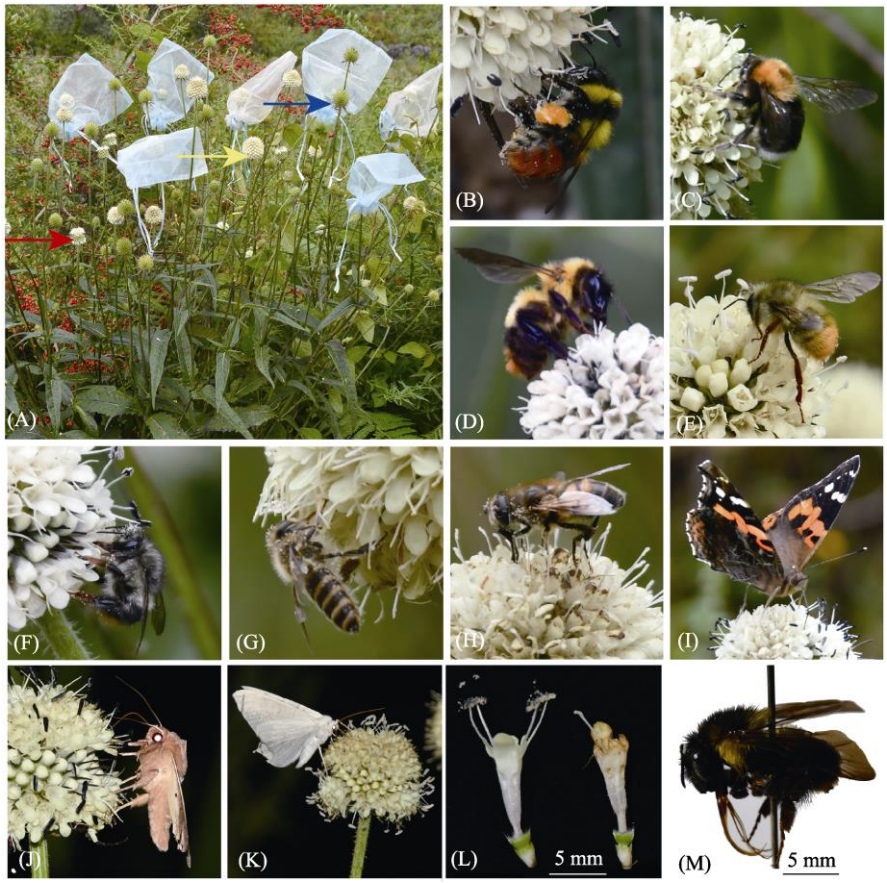


图1　川续断的花序、单花以及主要传粉昆虫。(A)川续断植株及其雄期花序(红色箭头)、雌期花序(黄色箭头)和果序(蓝色箭头); (B)弗里熊蜂; (C)白背熊蜂; (D)三条熊蜂; (E)疏熊蜂; (F)克什米尔熊蜂; (G)蜜蜂属一种; (H)管状蚜蝇属一种; (I)大红蛱蝶; (J)夜蛾; (K)尺蛾; (L)川续断的雄花期单花(左)和雌花期单花(右); (M)弗里熊蜂的标本。

Fig. 1　Inflorescences and single flowers of *D. asper* and its major pollinators. (A) *D. asper* plant with its male inflorescence (red arrow), female inflorescence (yellow arrow), and infructescence (blue arrow); (B) *Bombus friseanus*; (C) *B. festivus*; (D) *B. trifasciatus*; (E) *B. remotus*; (F) *B. kashmiensis*; (G) *Apis* sp.; (H) *Eristalis* sp.; (I) *Vanessa indica*; (J) Noctuidae moth; (K) Geometridae moth; (L) A single male-phase flower (left) and a single female-phase flower (right) of *D. asper*; (M) *B. friseanus* specimen.

根据刘永(2009)[①]对川续断分布的记载，结合课题组前期野外调查实况，我们选定了13个野生居群开展川续断花部特征以及传粉者的地理变异研究，包括湖北省恩施土家族苗族自治州建始县(JS)，四川省阿坝藏族羌族自治州小金县(XJ)和汶川县(WC)，以及凉山彝族自治州喜德县(XD)、西昌市(XC)和盐源县(YY)，贵州省遵义市习水县(XS)和贵阳市(GY)，云南省迪庆藏族自治州香格里拉市(SGRL)、丽江市(LJ)、大理市(DL)、文山壮族苗族自治州麻栗坡县(MLP)、昆明市(KM)，具体实验地点以及生境信息见表1。本研究开展野外调查的时间是2024年7–9月和2025年7–10月。

① 刘永 (2009) 川续断资源调查及质量评价研究. 硕士学位论文，成都中医药大学，成都.

1.2　植物形态特征

为了探究川续断形态特征的地理变异，在每个实验地点，我们随机选择20个植株，在每个植株上分别随机选择1朵处于雄期的花和1朵处于雌期的花，对植株营养器官(根、茎、叶)及繁殖器官进行精准测量。其中，营养器官包括4项指标：植株高度(地面至顶端生长点的垂直高度)、茎直径(茎中部(距地面约1/2株高处)的水平直径)、成熟叶片的最大长度(叶尖至叶基部)和最大宽度(叶片最宽处)。花部特征需区分花期：对于选定的雄花，依次测量花序的竖直直径(纵向最长距离)与水平直径(横向最宽距离)，以及花管长(花管的纵向长度)、花冠长(花冠最长处)、花冠宽(花冠最宽处)、雄蕊长(花丝基部至花药顶端)；对于选定的雌花，仅测量花柱长度(花柱基

表1　13个川续断野生居群的地理位置及生境情况

Table 1　Geographic distribution and habitat information of 13 wild populations of *Dipsacus asper*

居群编号 Population code	地理位置 Geography location	经度 Latitude	纬度 Longitude	海拔 Altitude (m)	生境 Habitat
XS	贵州省遵义市习水县温水镇 Wenshui Town, Xishui County, Zunyi City, Guizhou Province	106.2° E	28.33° N	1,117	乡镇公路边草丛 Grassy vegetation along township roads
GY	贵州省贵阳市花溪区红岩峡谷景区 Hongyan Gorge Scenic Area, Huaxi District, Guiyang City, Guizhou Province	106.49° E	26.17° N	1,445	公路边草丛 Grassy vegetation along roadsides
XC	四川省凉山彝族自治州西昌市礼州古镇 Lizhou Ancient Town, Xichang City, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province	102.19° E	28.05° N	1,618	田埂边草丛 Grassy vegetation along field margins
JS	湖北省恩施土家族苗族自治州建始县业州镇 Yezhou Town, Jianshi County, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Hubei Province	109.72° E	30.64° N	1,845	公路边草丛 Grassy vegetation along roadsides
MLP	云南省文山壮族苗族自治州麻栗坡县老山自然保护区 Laoshan Nature Reserve, Malipo County, Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture, Yunnan Province	104.49° E	23.94° N	2,246	田埂边草丛 Grassy vegetation along field margins
KM	云南省昆明市盘龙区马大丫口 Madayakou, Panlong District, Kunming City, Yunnan Province	102.75° E	25.21° N	2,427	山腰乡村路边草坡 Grassy slope along a rural road on a mountainside
LJ	云南省丽江市金虹山 Jinhong Mountain, Lijiang City, Yunnan Province	100.24° E	26.88° N	2,485	公路边草丛 Grassy vegetation along roadsides
YY	四川省凉山彝族自治州盐源县盐塘镇 Yantang Town, Yanyuan County, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province	101.21° E	27.45° N	2,513	山腰乡村路边草坡 Grassy slope along a rural road on a mountainside
XD	四川省凉山彝族自治州喜德县洛哈镇 Luoha Town, Xide County, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province	102.54° E	28.04° N	2,519	乡镇公路边草丛 Grassy vegetation along township roads
DL	云南省大理白族自治州大理市晴云山 Qingyun Mountain, Dali City, Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province	100.37° E	25.6° N	2,850	高山草丛 Alpine grassy vegetation
WC	四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县卧龙镇 Wolong Town, Wenchuan County, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province	103.14° E	30.45° N	3,043	高山草丛 Alpine grassy vegetation
XJ	四川省阿坝藏族羌族自治州小金县四姑娘山 Siguniang Mountain, Xiaojin County, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province	102.84° E	31.01° N	3,296	高山草甸 Alpine meadow
SGRL	云南省迪庆藏族自治州香格里拉市桑那水库 Sangna Reservoir, Shangri-La City, Diqing Tibetan Autonomous Prefecture, Yunnan Province	99.39° E	27.86° N	3,300	公路边草丛 Grassy vegetation along roadsides

部至柱头顶端)。植株高度使用卷尺测量，精度为0.1 cm，茎直径、叶片和花部特征均使用游标卡尺测量，精度为0.01 mm。

1.3　传粉者行为的观察

为探究川续断在不同居群的传粉昆虫类型和访花频率的差异，我们在各实验地开展了访花观察：每个居群选择连续3个晴朗日期，以尽量减少不利气象因素对传粉活动的干扰。于每日8:00–22:00进行观察。每0.5 h为一个时间段，在每个时间段随机选择2–3个花序作为观测对象，当昆虫访问花朵并且虫体接触到花药或者柱头时，记为有效的传粉行为，同时记录下传粉者类型及其单次访问的花朵数，并统计所观测的花序的总单花数。昆虫的访花频率为每朵花每小时的访问次数。观察过程中用单反相机(Nikon D7500)拍摄记录传粉者的访花行为，以便后续昆虫的鉴定和行为核对。

为了准确统计每株川续断整个花期的访花昆虫类型和数量，我们随机选择了云南的香格里拉和麻栗坡居群以及贵州的贵阳居群，对于每个实验地点，我们随机选择1个开花第1天的川续断花序，使用高清数码摄像机(SONY HDR-CX680)拍摄记录川续断花序的整个开花过程(从花序开花第1天到其中所有花朵凋落)中昆虫的访问情况，记录时间主要为9:00–18:00。后期通过在实验室观看录制的完整视频，统计每株植物从开花到花朵凋落过程中访问的昆虫类型和数量。

前期的数据表明熊蜂属是川续断的主要传粉者(王晓月, 2017)，为了比较熊蜂传粉者吻长等虫体

特征的地理变异程度, 在昆虫访花行为观察的过程中, 用电蚊拍随机抓取正在花序上访花的熊蜂, 将其电击昏迷, 做成昆虫标本。每种熊蜂随机抓捕20只。用游标卡尺测量其体长, 吻长以及头部、胸部和腹部的长度、宽度和厚度。

1.4 自然结实率

结实率反映了植物的生长发育状态, 也可间接反映传粉者的访花频率和传粉效率。为了比较不同居群川续断自然结实率的地理变异, 在每个实验地点, 随机标记30株健康发育的植株, 待1–2个月后果序完全成熟, 采集所有标记植株的成熟果序, 装入封口袋并记录样品信息(地点、日期和植株编号)。川续断单花仅含一枚胚珠, 种子发育状态为二元结果(饱满成熟或败育干瘪), 在实验室中统计时, 逐果序剥离种子, 区分并统计饱满种子数(外观饱满、质地坚硬)和败育种子(空瘪、质地松软), 单果序的种子总数为二者之和。那么单个果序的结实率(%) = 饱满种子数/种子总数 × 100%。

1.5 数据分析

根据数据类型选择相应的模型和函数进行分析。利用广义线性模型(generalized linear model, GLM)中的正态分布模型(normal distribution)-恒定关联函数(identify-link function)分别比较川续断不同居群形态特征的差异, 其中形态特征作为因变量, 不同居群作为自变量。为了衡量川续断形态特征数据的相对离散程度, 我们计算了各形态特征在居群内和居群间的变异系数(coefficients of variation, *CV* = (标准差/平均值) × 100%)。为探究多个地理居群的综合差异与聚集模式, 采用R软件中的prcomp函数对川续断不同居群的11个形态特征进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 并加载factoextra和ggplot2包对数据进行可视化处理(Amato & Petit, 2017)。分析前对所有形态特征数据进行了标准化处理。

经正态性检验(Shapiro-Wilk检验, $P > 0.05$), 访花频率数据经对数转换后符合正态分布, 故本研究采用广义线性模型中的正态分布模型, 以对数函数为连接函数, 比较每个居群中不同访花昆虫访花频率的差异, 其中, 访花频率作为因变量, 访花昆虫种类作为自变量。采用广义线性模型中的正态分布模型-恒定关联函数比较不同居群弗里熊蜂(*B. friseanus*)虫体特征的差异, 其中虫体特征作为因变量, 不同居群作为自变量。为了探究川续断花管长和广泛分布的弗里熊蜂的吻长是否相关, 我们对同时有弗里熊蜂分布的8个居群的川续断花管长和弗里熊蜂的吻长进行了Pearson相关分析。

采用广义线性模型中的二项式分布-Logistic关联函数比较不同居群川续断的自然结实率, 其中饱满的种子数作为因变量, 总的种子数(饱满 + 败育)作为一次实验中总的变量, 不同居群作为自变量。使用线性回归模型对不同地理居群中川续断的形态特征和自然结实率以及熊蜂的虫体特征与经纬度和海拔进行分析, 并对回归模型进行*F*检验。

GLM分析、Pearson相关分析、线性回归模型分析使用SPSS 27.0 (IBM Inc., New York, NY)完成, 主成分分析使用R 4.3.0完成, 图形制作使用GraphPad Prism 8.0完成。

2 结果

2.1 植物形态特征比较

川续断具有头状花序, 顶部和基部的花先开放, 中部的花后开放, 单花中雄蕊先熟, 持续时间为2–3 d, 花粉散落后, 花柱伸出花瓣, 具有可授性, 处于雌期, 持续时间为2–3 d (图1)。

川续断不同居群的形态特征存在显著差异。具体来说, 就营养器官而言, 建始和丽江居群的植株最高, 且二者差异不显著(Wald $\chi^2 = 0.082$, $df = 1$, $P = 0.775$), 香格里拉居群的植株最低(图2A)。丽江居群的茎直径最粗, 喜德居群的最细(图2B)。对于叶片长, 盐源、西昌和丽江3个居群显著大于其他居群, 且三者间差异不显著(Wald $\chi^2 = 2.271$, $df = 2$, $P = 0.321$), 贵阳居群叶片长度最小(图2C); 对于叶片宽, 西昌、盐源、汶川和丽江4个居群显著高于其他居群, 且四者间差异不显著(Wald $\chi^2 = 1.762$, $df = 3$, $P = 0.623$), 而贵阳居群的叶片最窄(图2D)。

就繁殖器官而言, 小金、建始、盐源和习水4个居群的花序竖直直径显著大于其他居群, 且四者间差异不显著(Wald $\chi^2 = 7.513$, $df = 3$, $P = 0.057$); 这4个居群的花序水平直径显著大于其余居群, 且四者间差异不显著(Wald $\chi^2 = 2.883$, $df = 3$, $P = 0.410$); 麻栗坡居群的花序竖直直径最小, 香格里拉居群的花序水平直径最小(图2E, F)。丽江居

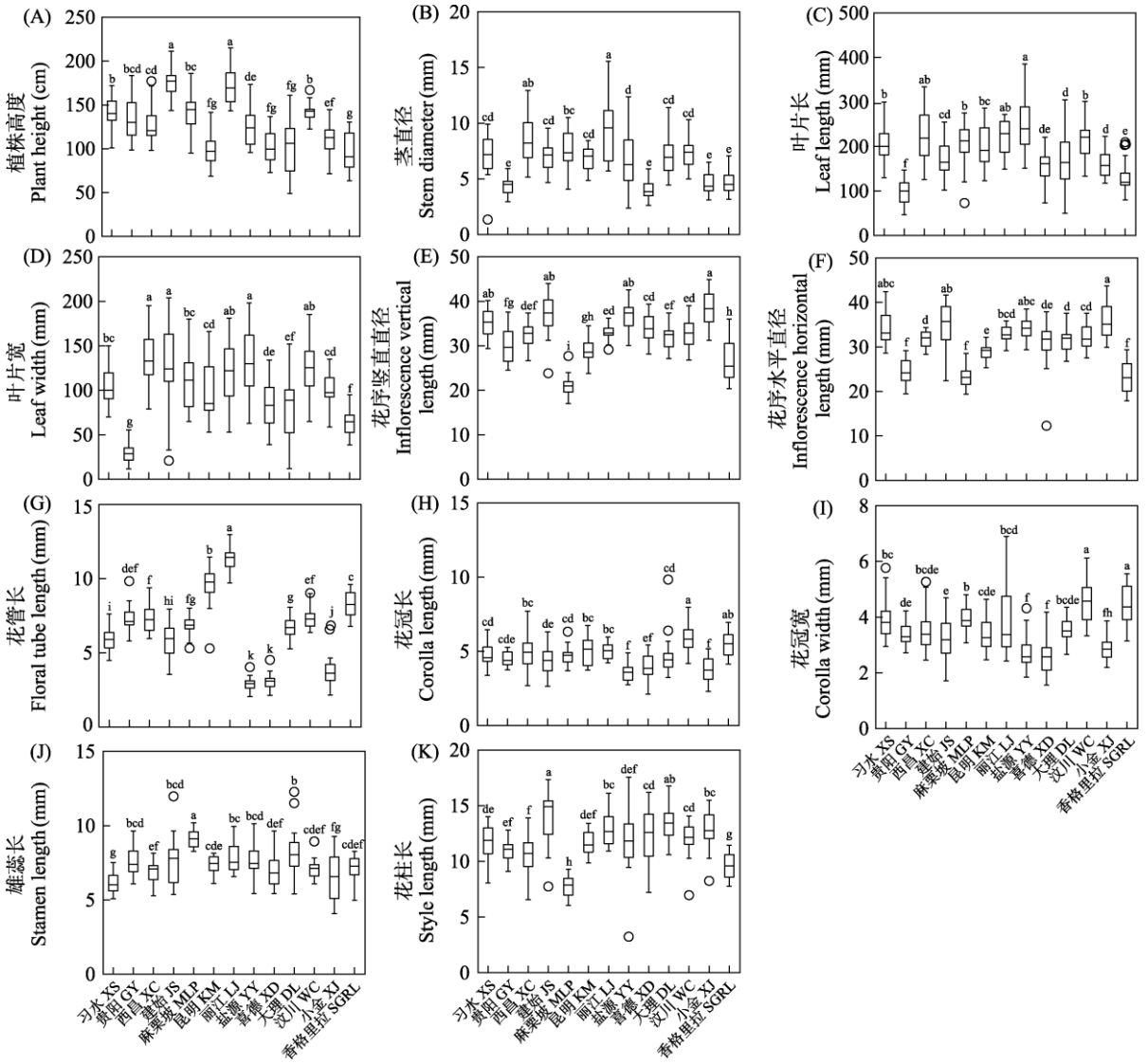


图2　13个地理居群川续断的形态特征比较(平均值 ± 标准误, 广义线性模型)。13个地理居群的详细信息见表1。不同小写字母表示该特征在不同居群间差异显著。

Fig. 2　Comparison of *Dipsacus asper* morphological traits among 13 geographic populations (mean ± SE, generalized linear model). More details for 13 geographic populations see Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences in the morphological traits among different populations.

群的花管长最大, 盐源居群的最小(图2G)。对于花冠长, 汶川和香格里拉居群显著大于其他居群, 且二者差异不显著(Wald χ^2 = 1.761, *df* = 1, *P* = 0.184), 盐源居群最小(图2H); 对于花冠宽, 亦是汶川和香格里拉居群显著大于其他居群, 且二者差异不显著(Wald χ^2 = 0.073, *df* = 1, *P* = 0.786), 喜德居群最小(图2I)。麻栗坡居群的雄蕊最长, 习水居群的雄蕊最短(图2J)。建始居群的花柱最长, 麻栗坡居群的花柱最短(图2K)。

川续断的11个形态特征在居群内和居群间表现出不同程度的变异(附录1)。川续断同一形态特征在居群内*CV*的均值(mean *CV* for same traits within population, $MCVS_W$)变化幅度为10.14% (花序水平直径)到28.84% (叶片宽)。其中, $MCVS_W$大于均值(17.53%)的特征主要有茎直径、叶片长、叶片宽、花冠长、花冠宽, 表明这些花部特征有较大的遗传变异, 而植株高度、花序水平直径、花序竖直直径、花管长、雄蕊长和花柱长的*CV*均小于均值, 表明这些花部特征变异相对稳定, 处于中度偏低的变异程度, 居群内相似度较高。川续断同一形态特征在居群

间的*CV* (*CV* for each traits among population, CVE_A)变化幅度为17.22% (花序水平直径)到41.91% (叶片宽), 与居群内的形态特征变化一致, 其中CVS_A大于均值(26.40%)的特征主要有茎直径、叶片长、叶片宽、花管长。由此可见, 这4个花部特征受环境等因素影响较大, 变异相对不稳定。同一居群内不同特征的变异幅度的均值(mean *CV* for different traits within population, $MCVD_W$)也存在较大差异, 其中大理居群的$MCVD_W$最大, 为20.97%, 说明该居群的表型变异丰富且表型多样性较高, 而$MCVD_W$最小的为汶川居群, 为14.01%, 说明该居群的表型变异相对稳定。

对建始等13个居群川续断的营养器官和繁殖器官特征的PCA结果表明, 不同居群形态特征的变异既有明显的组间差异, 也存在相当程度的连续性(图3)。营养器官的第一和第二主成分贡献率分别是66.9%和17.4%, 累计贡献率为84.3%, 群间重叠明显。繁殖器官的第一和第二主成分贡献率分别是39.6%和22.6%, 累计贡献率为62.2%, 属于中等水平。川续断的茎直径、植株高度、叶片长与叶片宽具有较强的相关性, 而花序竖直直径、花序水平直径和花柱长具有较强的相关性, 花冠长、花冠宽、花管长和雄蕊长具有较强的相关性。建始、西昌、盐源等居群在中心区域有较多重叠, 说明这些居群的形态特征较为相似(图3)。

2.2 传粉者类型和访花频率、虫体特征以及相关分析

野外观察发现川续断不同居群的传粉者种类存在差异。总体而言, 川续断白天的主要传粉者为熊蜂属、蜜蜂属、食蚜蝇类(管状蚜蝇属*Eristalis*)、蝶类(蛱蝶属*Vanessa*), 夜间的传粉者均为蛾类(夜蛾科和尺蛾科), 其中熊蜂属是最主要的传粉者, 主要包括弗里熊蜂、白背熊蜂(*B. festivus*)、三条熊蜂(*B. trifasciatus*)、疏熊蜂(*B. remotus*)、克什米尔熊蜂(*B. kashmiensis*) (图1)。

广义线性模型分析结果显示, 同一种传粉昆虫在不同居群的访花频率存在差异, 习水等13个居群川续断传粉者的访花频率具体情况如下: 在习水居群, 川续断白天的传粉者为三条熊蜂、疏熊蜂、蜜蜂和食蚜蝇, 其中三条熊蜂和蜜蜂的访花频率没有显著差异(Wald $\chi^2 = 2.980$, $df = 1$, $P = 0.084$), 蜜蜂的访花频率显著高于疏熊蜂、食蚜蝇和蛾类(Wald $\chi^2 = 11.296$, $df = 3$, $P = 0.010$) (图4A)。在贵阳居群, 川续断白天的传粉者为三条熊蜂、蜜蜂和蝶类, 其中三条熊蜂和蜜蜂的访花频率没有显著差异(Wald $\chi^2 = 0.381$, $df = 1$, $P = 0.537$), 蜜蜂的访花频率著高于蛾类和蝶类(Wald $\chi^2 = 10.474$, $df = 2$, $P = 0.005$), 而三条熊蜂和蝶类、蛾类的访花频率没有显著差异(Wald $\chi^2 = 4.482$, $df = 2$, $P = 0.089$) (图4B)。在西昌居群, 川续断白天的主要传粉者为弗里熊蜂和食蚜蝇, 其中弗里熊蜂的访花频率显著高于食蚜蝇和蛾类(Wald $\chi^2 = 37.291$, $df = 2$, $P < 0.001$) (图4C)。在建始居群, 川续断白天的主要传粉者为弗里熊蜂、白背熊蜂、疏熊蜂和克什米尔熊蜂, 其中白背熊蜂的访花频率显著高于克什米尔熊蜂和蛾类(Wald $\chi^2 = 8.151$, $df = 2$, $P = 0.017$) (图4D)。在麻栗坡居群, 川续断白天的主要传粉者为蜜蜂和食蚜蝇, 且其差异不显著, 但二者均显著高于蛾类(Wald $\chi^2 = 6.419$, $df =$

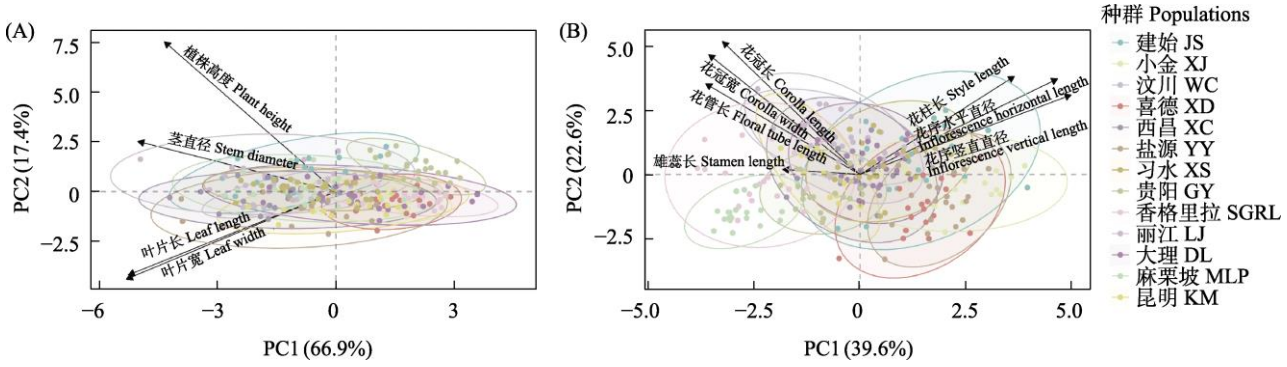


图3 13个地理居群川续断营养器官(A)和繁殖器官(B)形态特征的主成分分析(PCA)结果。13个地理居群的详细信息见表1。
Fig. 3 Principal component analysis (PCA) of the vegetative traits (A) and reproductive traits (B) of 13 geographic populations of *Dipsacus asper*. More details for 13 geographic populations see Table 1.

2, P = 0.040) (图4E)。在昆明居群，川续断白天的主要传粉者为弗里熊蜂和蜜蜂，其中弗里熊蜂的访花频率显著高于蜜蜂和蛾类(Wald χ^2 = 18.025, df = 2, P < 0.001) (图4F)。在丽江居群，川续断白天的主要传粉者为蜜蜂和食蚜蝇，其中蜜蜂的访花频率显著高于食蚜蝇和蛾类(Wald χ^2 = 24.221, df = 2, P < 0.001) (图4G)。在盐源居群，川续断白天的传粉者为弗里熊蜂、蜜蜂、食蚜蝇和蝶类，且其与蛾类的访花频率没有显著差异(Wald χ^2 = 4.501, df = 4, P = 0.342) (图4H)。在喜德居群，川续断白天的传粉者是弗里熊蜂、蜜蜂和食蚜蝇，弗里熊蜂的访花频率显著高于蜜蜂和食蚜蝇(Wald χ^2 = 35.179, df = 2, P < 0.001)，但与蛾类的访花频率没有显著差异(Wald χ^2 = 0.689, df = 1, P = 0.407) (图4I)。在大理居群，川续断白天的主要传粉者是弗里熊蜂、疏熊蜂、克什米尔熊蜂和蜜蜂，其中克什米尔熊蜂的访花频率和弗里熊蜂没有显著差异，但显著高于疏熊蜂、蜜蜂和蛾类(Wald χ^2 = 17.129, df = 4, P = 0.002) (图4J)。在汶川居群，川续断白天的传粉者是弗里熊蜂、白背熊蜂和食蚜蝇，其中白背熊蜂和食蚜蝇的访花频率没有显著差异，但二者均显著高于弗里熊蜂和蛾类(Wald χ^2 = 15.945, df = 3, P < 0.001)，蛾类的访花频率和弗里熊蜂没有显著差异(Wald χ^2 = 3.462, df = 1, P = 0.063) (图4K)。在小金居群，川续断白天的传粉者是弗里熊蜂、白背熊蜂、蜜蜂和食蚜蝇，其中弗里熊蜂的访花频率和蛾类没有显著差异，但显著高于白背熊蜂、蜜蜂和食蚜蝇(Wald χ^2 = 28.238, df = 4, P < 0.001) (图4L)。在香格里拉居群，食蚜蝇的访花频率显著高于蜜蜂、蛾类和蝶类(Wald χ^2 = 203.891, df = 3, P < 0.001) (图4M)。

对贵阳、香格里拉和麻栗坡3个居群川续断花序整个开花过程中白天访问昆虫的种类和数量的记录如表2。贵阳居群以蜜蜂属(199只)和熊蜂属昆虫(43只)为主，香格里拉居群以食蚜蝇(483只)和蜜蜂属(51只)昆虫为主，麻栗坡居群以蜜蜂属(244只)和食蚜蝇(146只)为主。

弗里熊蜂是川续断分布最广泛的传粉熊蜂，在建始、小金、汶川、喜德、西昌、盐源、大理和昆明居群均有分布，但不同居群的弗里熊蜂虫体特征存在变异(附录2)。建始(17.81 ± 0.45 mm)、西昌(17.69 ± 0.31 mm)和盐源(17.42 ± 0.40 mm)居群弗里熊蜂的虫体要大于其他居群，且其头部、胸部和腹部的长度、宽度和厚度均大于其他居群(P < 0.001) (附录2)；昆明居群弗里熊蜂的吻长最长(7.83 ± 0.32 mm)，与建始居群(7.15 ± 0.30 mm)和喜德居群(7.25 ± 0.27 mm)没有显著差异(Wald χ^2 = 3.094, df = 2, P = 0.213)，但显著高于其余居群(Wald χ^2 = 47.85, df = 7, P < 0.001)。

对上述8个居群弗里熊蜂的吻长和川续断花管长的相关性分析表明，这两者之间没有显著的相关关系(R^2 = 0.014, P = 0.164) (图5)。

2.3 自然结实率比较

13个居群川续断自然状态下的结实率具有显著差异。贵阳居群的自然结实率最高，与小金、昆明、喜德、大理和麻栗坡等居群没有显著差异(Wald χ^2 = 5.958, df = 5, P = 0.310)，但显著高于香格里拉、西昌、汶川、丽江、盐源、建始和习水等居群(Wald χ^2 = 90.973, df = 7, P < 0.001) (图6)。

2.4 川续断的形态特征和自然结实率及弗里熊蜂的虫体特征与经纬度和海拔的回归分析

川续断的植株高度和雄蕊长随着居群经度的增加而显著增加，而茎直径、叶片长、花序的竖直和水平直径随着居群经度的增加而显著减小；叶片长、叶片宽、花序的竖直和水平直径以及花柱长随着居群纬度的增加而显著增加，而花管长和雄蕊长随着居群纬度的增加而显著减小；植株高度、茎直径、叶片长、叶片宽、花序的竖直和水平直径均随着海拔的升高而显著减小，雄蕊长随着海拔的升高而显著增加(P < 0.05) (表3)。自然状态下川续断的结实率随着经度的增加而增加，随着纬度的增加而显著减少，随着海拔的升高而显著增加(P < 0.05) (表3)。

弗里熊蜂虫体的腹宽和腹厚随着经度的增加而显著减小，吻长随着经度的增加而显著增加；虫体的头厚、胸厚、腹宽、腹厚随着纬度的增加而显著增加，吻长随着纬度的增加而显著减小；除去吻长，虫体的其余特征均随着海拔的增加而显著减小(P < 0.05) (表3)。

3 讨论

不同地理环境下分布的野生川续断的形态特征、传粉者的类型和访花频率以及植物的繁殖成功

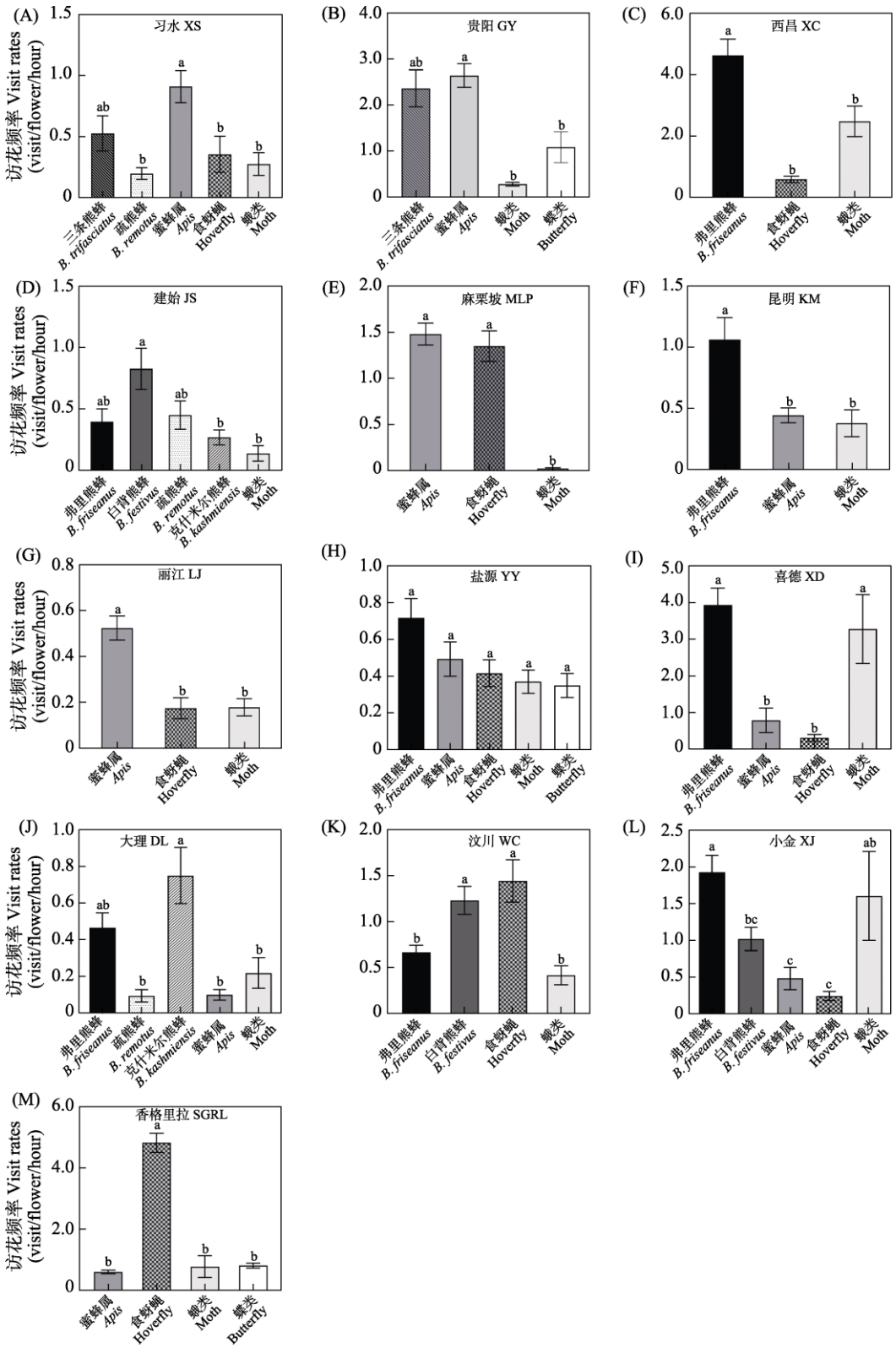


图4　13个川续断地理居群访花者类型以及访花频率的比较(广义线性模型)。13个地理居群的详细信息见表1。不同小写字母表明每个居群不同访花者之间的访花频率存在显著差异($P < 0.005$)。

Fig. 4　Floral visitor types and comparison of visit frequencies (analyzed by generalized linear model) among 13 geographic populations of *Dipsacus asper*. More details for 13 geographic populations see Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.005$) in visit frequencies among different floral visitor types within each population.

表2　3个居群川续断整个花期白天访问昆虫的种类和数量
Table 2　Species and abundance of insect visitors during daytime throughout the flowering period of *Dipsacus asper* across three populations

居群 Populations	熊蜂属 *Bombus*	蜜蜂属 *Apis*	食蚜蝇 Hoverfly	蛾类 Moth	蝶类 Butterfly
贵阳 Guiyang (GY)	43	199	/	12	1
香格里拉 Shangri-La (SGRL)	1	51	483	/	112
麻栗坡 Malipo (MLP)	12	244	146	1	/

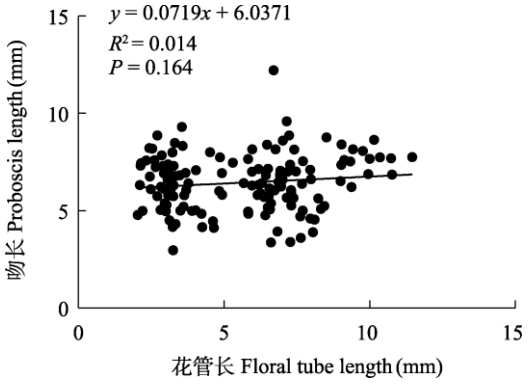


图5　川续断花管长和弗里熊蜂吻长的相关分析
Fig. 5　Correlation between floral tube length of *Dipsacus asper* and proboscis length of *Bombus friseanus*

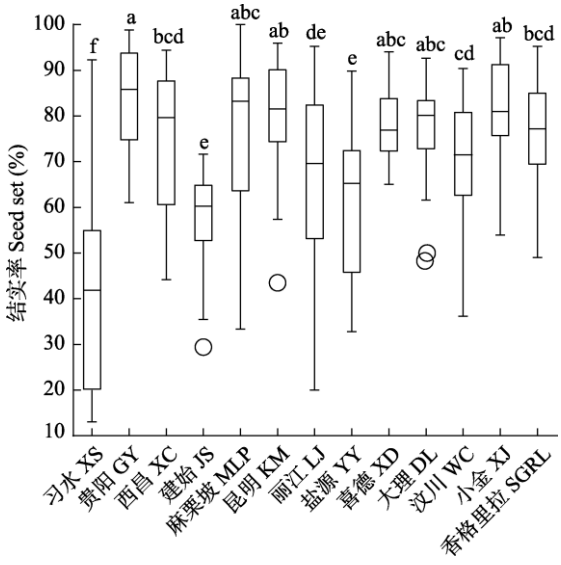


图6　13个川续断地理居群的自然结实率比较。13个地理居群的详细信息见表1。不同小写字母表明居群间的结实率存在显著差异($P < 0.005$)。
Fig. 6　Comparison of natural seed set among 13 geographic populations of *Dipsacus asper*. More details for 13 geographic populations see Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences in seed set among populations ($P < 0.005$).

有显著的变异。建始和丽江居群的川续断植株高于访花频率其他居群，丽江居群的茎粗于其他居群，盐源、西昌和丽江居群的叶片大于其他居群，小金、建始、盐源和习水居群的花序大于其他居群，丽江居群的花管长高于其他居群，汶川和香格里拉居群的花冠大于其他居群，麻栗坡居群的雄蕊长高于其他居群，建始的花柱大于其他居群。川续断叶片和茎的变异系数较大，而花序大小的变异系数小，其中，大理居群表型变异大，而汶川居群表型变异小。不同居群川续断形态特征的变异既有明显的组间差异，也存在相当程度的连续性。川续断主要的传粉者为熊蜂属、蜜蜂属、食蚜蝇(管状蚜蝇属)、蛾蝶类。不同居群川续断的传粉者组成以及访花频率存在显著差别，其中弗里熊蜂在8个居群都有分布，而其吻长与相应居群川续断的花管长之间没有显著相关关系。川续断的植株高度、茎、叶以及花序大小均随着海拔的升高而降低，除了吻长，弗里熊蜂的虫体长等特征也随着海拔的升高而降低。川续断的形态特征随着经纬度也有变异，其中花序大小随着居群经度的增加而减小，随着居群纬度的升高而增大。弗里熊蜂的体长变化与经纬度的变化没有显著的相关关系，而吻长随着居群经度的增加而增加 随着居群纬度的升高而减小。不同地理分布川续断的自然结实率也存在显著变化：结实率随居群海拔的升高和经度的增加而增加，随居群纬度的升高而减小。

3.1　川续断花形态的变异与传粉者类型及其访花频率的关系

传统的传粉生物学理论认为，花的特定性状是由自然环境的选择压力所驱动，根据这一理论，植物的花色、花形、气味等特征是通过特定基因的表达来适应不同传粉者的需求(Reich et al., 2020; Todesco et al., 2022; Gfrerer et al., 2023)，花部特征反映了对某一类传粉者的适应，这些特征的组合被称为“传粉综合征” (pollination syndrome) (Fenster et al., 2004)。例如，马达加斯加的兰科植物彗星兰(*Angraecum sesquipedale*)的花距长度(30–40 cm)与其主要传粉者天蛾的吻长(约30 cm)高度吻合，能够使天蛾顺利地接触到花粉并完成授粉(Wasserthal, 1997)。野外观察发现长喙条背天蛾(*Cechenena lineosa*)的吻长与茜草科馥郁滇丁香(*Luculia pinceana*)的花

表3　川续断形态特征、弗里熊蜂虫体特征以及川续断自然结实率与经纬度、海拔的回归模型及其回归系数(β), $P < 0.005$。
Table 3　Linear regression models and the regression coefficients (β) for morphological traits of *Dipsacus asper*, morphological traits of *Bombus friseanus*, and natural seed set of *D. asper* in relation to longitude, latitude, and elevation ($P < 0.005$)

特征 Traits	经度 Longitude		纬度 Latitude		海拔 Elevation		模型 Model		
	β	P	β	P	β	P	调整R^2 Adjusted R^2	F	P
形态特征 Morphological traits									
植株高度 Plant height (cm)	0.322	< 0.001	0.120	0.059	–0.167	0.044	0.222	25.783	< 0.001
茎直径 Stem diameter	–0.237	0.012	–0.008	0.909	–0.322	< 0.001	0.049	5.441	< 0.001
叶片长 Leaf length	–0.362	< 0.001	0.161	0.022	–0.318	< 0.001	0.048	5.357	< 0.001
叶片宽 Leaf width	–0.147	0.113	0.307	< 0.001	–0.179	0.049	0.062	6.739	< 0.001
花序竖直直径 Inflorescence length (vert.)	–0.242	< 0.001	0.702	< 0.001	–0.316	< 0.001	0.387	55.768	< 0.001
花序水平直径 Inflorescence length (hori.)	–0.235	0.004	0.607	< 0.001	–0.287	< 0.001	0.282	35.068	< 0.001
花管长 Floral tube length	–0.122	0.181	–0.280	< 0.001	–0.072	0.420	0.100	10.595	< 0.001
花冠长 Corolla length	–0.109	0.408	–0.011	0.908	0.034	0.789	0.008	1.662	0.176
花冠宽 Corolla width	–0.011	0.932	–0.078	0.425	0.139	0.266	0.012	2.059	0.106
雄蕊长 Stamen length	0.372	< 0.001	–0.546	< 0.001	0.420	< 0.001	0.221	25.641	< 0.001
花柱长 Style length	0.001	0.989	0.349	< 0.001	0.007	0.934	0.113	12.027	< 0.001
虫体特征 Morphological traits									
体长 Body length	0.010	0.912	–0.011	0.912	–0.387	< 0.001	0.141	11.166	< 0.001
吻长 Proboscis length	0.308	< 0.001	–0.455	< 0.001	–0.029	0.733	0.171	13.830	< 0.001
头长 Head length	0.034	0.704	0.078	0.414	–0.399	< 0.001	0.137	10.863	< 0.001
头宽 Head width	0.002	0.985	0.109	0.249	–0.433	< 0.001	0.163	11.909	< 0.001
头厚 Head height	–0.066	0.475	0.358	< 0.001	–0.304	< 0.001	0.094	7.440	< 0.001
胸长 Thorax length	–0.024	0.797	–0.009	0.927	–0.263	0.004	0.059	4.894	0.003
胸宽 Thorax width	–0.174	0.062	0.076	0.435	–0.358	< 0.001	0.087	6.899	< 0.001
胸厚 Thorax height	–0.096	0.297	0.263	0.007	–0.405	< 0.001	0.102	8.128	< 0.001
腹长 Abdomen length	–0.019	0.840	–0.058	0.557	–0.279	0.002	0.093	6.231	< 0.001
腹宽 Abdomen width	–0.201	0.030	0.264	0.007	–0.434	< 0.001	0.104	8.207	< 0.001
腹厚 Abdomen height	–0.189	0.036	0.378	< 0.001	–0.496	< 0.001	0.154	12.308	< 0.001
自然结实率 Natural seed set	0.171	0.050	–0.327	< 0.001	0.443	< 0.001	0.137	15.013	< 0.001

管长相匹配，使其成为该植物最有效的传粉者(陈燕等, 2022)①。我们对川续断13个野生居群的调查发现川续断传粉者的类型以及访花频率存在显著变化，这可能导致了川续断花形态的变异。例如，在小金、汶川、喜德、西昌、盐源、大理、昆明、建始、贵阳和习水居群中，均观察到熊蜂属昆虫高频率地访问川续断花序，其在访花过程中虫体能够接触花药和柱头，具有潜在的传粉作用。而在香格里拉、丽江和麻栗坡居群中未观察到熊蜂属昆虫访问川续断花序，当地的主要访花昆虫以蜜蜂属和食蚜蝇为主。在所有观察到的熊蜂种类中，弗里熊蜂的分布范围最广，在小金、汶川、大理、喜德、盐源、昆明、建始、西昌多个居群均观察到其访问川续断花序，并在访花过程中吸蜜或采集花粉。白背熊蜂在小金、汶川和建始居群被观察到访问川续断花序；三条熊蜂在贵阳和习水居群被观察到访问川续断花序；疏熊蜂在大理、建始和习水居群被观察到访问川续断花序；克什米尔熊蜂则在大理和建始居群被观察到访问川续断花序。同一种熊蜂在不同居群的访花频率也存在显著变化，弗里熊蜂对西昌居群川续断的访花频率约是建始居群的10倍。总体而言，部分居群以熊蜂属昆虫为主要访花者，而另一些居

① 陈燕 (2022) 二型花柱植物滇丁香与传粉者相互适应的研究. 硕士学位论文，贵州师范大学，贵阳.

群则以蜜蜂和食蚜蝇为主, 这种传粉者功能群内部的差异足以对花部形态施加不同的选择压力(Toji et al., 2021), 从而对川续断花部性状(如花序大小、花冠结构等)的演化产生影响。

建始、小金、盐源和习水居群川续断的花序大于其他种群, 建始、小金和习水居群的传粉者有体型更大的白背熊蜂或者三条熊蜂, 盐源居群虽然没有白背熊蜂或者三条熊蜂访问, 但是其有效的传粉者弗里熊蜂的虫体长在所有居群中也是比较大的, 建始居群弗里熊蜂的虫体长也大于其他居群。我们前期的研究也发现神农架国家级自然保护区川续断的花序大于香格里拉, 而神农架川续断的主要传粉者三条熊蜂和火红熊蜂(*B. pyrosoma*)的虫体整体上也大于香格里拉的主要传粉者白背熊蜂和弗里熊蜂(王晓月, 2017)。对4种火焰草属(*Castilleja*)植物(*C. purpurea* 、 *C. citrina* 、 *C. lindheimeri* 和 *C. sessiliflora*)的调查发现, 其有多种传粉功能类群访花, 包括蜜蜂、蝴蝶、天蛾和蜂鸟, 且不同物种和地理区域火焰草的访花者类型不同, 植物的花部特征与特定传粉者的访问存在明确的关系, 这跟传粉综合征概念的预测相符, 尽管大部分火焰草属种群的访问者是泛化的, 但是花部特征的转变和关键传粉功能群相对频率的转变密切相关(Wenzell et al., 2023) 。 不同居群的石蒜科簇生花盏(*Brunsvigia gregaria*)的花部特征存在显著变化, 而且被不同的传粉类群访问, 簇生花盏分化为3种不同的生态型, 分别主要被蜂类、蝶类和长吻蝇类访问, 核心传粉者的变化可能促使植物花特征种群水平上的分化(Moir et al., 2025)。对日本阿尔卑斯山唇形科野芝麻(*Lamium album* var. *barbatum*) 12个种群的研究发现, 不同种群花大小和当地传粉者形态特征的均值显著正相关, 相较于其他地区, 在花型较大的种群, 该植物经常由关熊蜂(*Bombus consobrinus*)蜂王传粉(Toji et al., 2021)。我们对共有弗里熊蜂分布的川续断居群的分析发现, 弗里熊蜂的吻长和川续断的花管长没有显著的正相关关系, 这可能是因为川续断是泛化的传粉系统, 有熊蜂属、蜜蜂属、管状蚜蝇属、蛾蝶类等昆虫访问, 尽管熊蜂是川续断重要的传粉者, 但是熊蜂属也有多个物种为其传粉, 不同地理分布居群川续断最有效的传粉者可能不一样, 从而导致川续断花管长的变异和弗里熊蜂的吻长没有相关关系。

3.2 川续断形态特征的地理变异与经纬度和海拔的关系

除了传粉者的选择, 经纬度、海拔等也会直接影响花的变异(Sun et al., 2008; Mao & Huang, 2009), 或者通过改变传粉昆虫的数量和多样性间接地影响植物的受精成功率, 从而影响植物的繁殖适合度和种群的生存状况(Hegland et al., 2009; 施雨含等, 2021)。植物表型的适应并非由单一性状主导, 高海拔植物由于温度限制生长受阻, 其矮小姿态有助于减少能量消耗、维持生存; 同时通过增强花部表现、增加雄配子数量等性状, 以多性状叠加的形式协同作用, 共同调节植物在生存与繁殖之间的权衡选择(Körner, 1989; Pacheco et al., 2016)。对不同海拔的杜鹃花科植物柳条杜鹃(*Rhododendron virgatum*)、大白杜鹃(*R. decorum*)和红棕杜鹃(*R. rubiginosum*)的研究发现, 随着海拔升高, 杜鹃花的植株高度、花冠大小和花药体积显著减小, 而枝条直径、雌蕊和雄蕊长度显著增大(姚仁秀等, 2023)。川续断的营养器官(植株高度、茎、叶片)随着海拔升高而显著变小, 花序大小也随着海拔升高在显著减小, 而雄蕊长随着海拔的升高而增加, 高海拔地区通常温度低、辐射强, 环境相对恶劣, 低矮的姿态有利于减少对能量的消耗, 而对雄性资源投入的增大可以提高植物的雄性适合度。川续断的叶片、花序、花柱长随着纬度的增加而变大, 而单花的花管长、雄蕊长随着纬度的增加而减小, 说明纬度梯度也会显著影响植物的性状。花形态变异的研究发现, 车前科钓钟柳属(*Penstemon*)地理上的变异能显著解释其花部形态的部分变异: 白花钓钟柳(*P. albidus*)和惠氏钓钟柳(*P. whippleanus*)的花大小呈现从南到北增大的趋势, 而腺毛钓钟柳(*P. glandulosus*)和华丽钓钟柳(*P. speciosus*)则表现出从东向西增大的趋势, 此外, 年平均降水量是影响腺毛钓钟柳花部形态的最重要变量(Rodriguez-Peña & Wolfe, 2023)。

3.3 川续断自然结实率地理变异的影响因素

不同居群川续断的自然结实率存在差异, 随着经度的增加而增加, 随着纬度的增加显著减小, 随着海拔的升高显著增加。本文发现川续断的雄蕊长随着居群经度的增加而增加, 随着纬度的增加而减

小，而随着海拔的升高而增加，这表明不同居群川续断对雄性资源的投入存在显著变化，这可能是影响植物繁殖成功的重要因素。川续断自然状态下的结实率随着居群海拔升高呈现增加的趋势，对川续断不同居群访花者类型以及访花频率的统计发现，低海拔地区昆虫访花频率的总和较低，尤其是习水和建始居群，较低的昆虫访花频率会使植物无法完成受精过程，从而降低结实率，习水和建始居群川续断的自然结实率也是所有居群中最低的。在高海拔居群，例如喜德、大理、汶川、小金居群，川续断访花昆虫种类丰富且昆虫的访花频率比较高，尤其是熊蜂。前期的研究已经发现熊蜂体型大，是川续断传粉效率比较高的传粉者之一，与花部结构也比较匹配，有助于提高结实率；在香格里拉居群，食蚜蝇的访问效率比较高，这也是川续断的重要传粉者之一。除了生物因素外，非生物环境因素对植物资源分配策略的调整也会影响植物的结实成功。在资源相对匮乏(如干旱、土壤贫瘠、多雨)的生境中，植物可能更多将有限的资源分配给营养生长或抗逆性(Hattori et al., 2014; Ramos & Schiestl, 2019; Rodriguez-Peña & Wolfe, 2023)。例如分布于建始的川续断居群，通过2024年8月12–20日和2025年8月5–14日连续两年的野外观察发现，该居群在开花期常遭遇多雨、低温天气，植株比较高，但是自然结实率很低，推测恶劣的天气可能使植物将更多的资源分配给营养生长，同时连续低温多雨的天气也会影响昆虫的访花频率，从而降低了植物的繁殖成功。因此，结实率的差异不仅反映了传粉者访花频率和传粉效率的差异，也可能是植物在不同环境压力下做出的生理权衡。

川续断作为一种分布广泛、传粉系统泛化的植物，常被视为具有较强的环境适应能力。然而，我们的调查发现，即使在同一物种的不同居群间，也存在着与生物和非生物环境紧密相关的适应性。目前川续断的地理变异研究还停留在初步的野外调查阶段，想要深入理解植物特征与传粉者地理变异模型以及二者互作，还需要进一步从非生物环境和植物次级代谢物对传粉者访花行为的影响等角度来探究不同地理环境下植物花部特征与传粉者多样性的协同演化模式，以便为保护川续断植物以及其传粉者的生物多样性提供理论基础。

致谢: 感谢贵州师范大学本科生张高发、吴珺苗、兰小仟、梁晓燕、石斯羽、潘听涛、郑焱、石才元、覃练缓、柏威、张辽、姚佳、章荣蓉、廖华波和夏文龙对野外观察以及室内数据处理的帮助，感谢华中师范大学博士生韩文龙和彭襄竹对野外实验的协助。

ORCID

李杨 https://orcid.org/0009-0009-1266-7009
吕晓琴 https://orcid.org/0000-0002-7374-6335
伍英 https://orcid.org/0009-0006-3309-9571
陈孝旺 https://orcid.org/0009-0009-8420-1398
颜国浩 https://orcid.org/0009-0001-7168-4847
王晓月 https://orcid.org/0000-0002-8369-1606

参考文献

Amato B, Petit S (2017) A review of the methods for storing floral nectars in the field. Plant Biology, 19, 497–503.

Bingham RA, Orthner AR (1998) Efficient pollination of alpine plants. Nature, 391, 238–239.

Fenster CB, Armbruster WS, Wilson P, Dudash MR, Thomson JD (2004) Pollination syndromes and floral specialization. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35, 375–403.

Gfrerer E, Laina D, Gibernau M, Comes HP, Hörger AC, Dötterl S (2023) Variation in scent amount but not in composition correlates with pollinator visits within populations of deceptive *Arum maculatum* L. (Araceae). Frontiers in Plant Science, 13, 1046532.

Hao K, Liu TT, Hembry DH, Luo SX (2023) Trait matching in a multi-species geographic mosaic of leafflower plants, brood pollinators, and cheaters. Ecology and Evolution, 13, e10228.

Hao K, Wu YH, Sun QL, Dong WC, Luo SX (2024) Geographic variations of floral traits and pollinator guilds in a specialized pollination mutualism, *Kadsura longipedunculata* and gall midges. Biological Diversity, 21, 110–119.

Hattori M, Nagano Y, Itino T (2014) Geographic flower trait variation of *Aquilegia buergeriana* Sieb. et Zucc. var. *buergeriana* on Mt. Norikura and the Utsukushigahara Highland, Japan. American Journal of Plant Sciences, 5, 2686–2692.

Hegland SJ, Nielsen A, Lázaro A, Bjerknes AL, Totland Ø (2009) How does climate warming affect plant–pollinator interactions? Ecology Letters, 12, 184–195.

Hou J, Liu M, Yang K, Liu B, Liu HH, Liu JQ (2025) Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants. Journal of Integrative Plant Biology, 67, 2265–2293.

Hu YB, Wang XP, Xu YC, Yang H, Tong ZY, Tian R, Xu SH,

Yu L, Guo YL, Shi P, Huang SQ, Yang G, Shi SH, Wei FW (2023) Molecular mechanisms of adaptive evolution in wild animals and plants. Science China Life Sciences, 66, 453–495.

Huang SQ (2014) Most effective pollinator principle of floral evolution: Evidence and query. Chinese Bulletin of Life Sciences, 26, 118–124. (in Chinese) [黄双全 (2014) 花部特征演化的最有效传粉者原则: 证据与疑问. 生命科学, 26, 118–124.]

Johnson SD (2025) Pollination ecotypes and the origin of plant species. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 292, 20242787.

Körner C, Neumayer M, Menendez-Riedl SP, Smeets-Scheel A (1989) Functional morphology of mountain plants. Flora, 182, 353–383.

Layek U, Das AD, Das U, Karmakar P (2024) Spatial and temporal variations in richness, diversity and abundance of floral visitors of curry plants (*Bergera koenigii* L.): Insights on plant–pollinator Interactions. Insects, 15, 83.

Li B, Suzuki JI, Hara T (1998) Latitudinal variation in plant size and relative growth rate in *Arabidopsis thaliana*. Oecologia, 115, 293–301.

Li HD, Ren ZX, Wu ZK, Xu K, Wang H (2015) Variation in floral traits of distylous *Primula poissonii* (Primulaceae) along geographic gradients. Biodiversity Science, 23, 747–758. (in Chinese with English abstract) [李海东, 任宗昕, 吴之坤, 许琨, 王红 (2015) 二型花柱植物海仙花报春花部性状随地理梯度的变异. 生物多样性, 23, 747–758.]

Liang ZC, Liu TT, Chen XY, Xu WJ, Dong TF, Liu QS, Xu X (2023) Twigs of dove tree in high-latitude region tend to increase biomass accumulation in vegetative organs but decrease it in reproductive organs. Frontiers in Plant Science, 13, 1088955.

Liu XW (2025) Review on the elevation adaptive mechanisms of alpine plants based on different research methods. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 33, 352–362. (in Chinese with English abstract) [刘兴文 (2025) 基于不同研究方法的高山植物海拔适应性机制研究概述. 热带亚热带植物学报, 33, 352–362.]

Mao YY, Huang SQ (2009) Pollen resistance to water in 80 angiosperm species: Flower structures protect rain susceptible pollen. New Phytologist, 183, 892–899.

Medeiros LP, Garcia G, Thompson JN, Guimarães PR Jr (2018) The geographic mosaic of coevolution in mutualistic networks. Proceeding of the National Academy of Sciences, USA, 115, 12017–12022.

Miao LL, Liu MX, Xiao YD, Yang CL, Wang QY, Wang M (2024) Studies on phylogeny and functional traits structure of plant communities at different latitudes. Acta Ecologica Sinica, 44, 317–329. (in Chinese with English abstract) [苗乐乐, 刘旻霞, 肖音迪, 杨春亮, 王千月, 王敏 (2024) 不同纬度植物群落系统发育与功能性状结构研究. 生态学报, 44, 317–329.]

Moir M, Butler H, Peter C, Dold T, Newman E (2025) A test of the Grant-Stebbins pollinator-shift model of floral evolution. New Phytologist, 245, 2322–2335.

Nepal S, Trunschke J, Ren ZX, Burgess KS, Wang H (2023) Community-wide patterns in pollen and ovule production, their ratio (P/O), and other floral traits along an elevation gradient in southwestern China. BMC Plant Biology, 23, 425.

Ollerton J, Winfree R, Tarrant S (2011) How many flowering plants are pollinated by animals? Oikos, 120, 321–326.

Pacheco DA, Dudley LS, Cabezas J, Cavieres LA, Arroyo MTK (2016) Plastic responses contribute to explaining altitudinal and temporal variation in potential flower longevity in high Andean *Rhodolirion montanum*. PLoS ONE, 11, e0166350.

Paudel BR, Shrestha M, Burd M, Adhikari S, Sun YS, Li QJ (2016) Coevolutionary elaboration of pollination-related traits in an alpine ginger (*Roscoea purpurea*) and a tabanid fly in the Nepalese Himalayas. New Phytologist, 211, 1402–1411.

Pauw A, Stofberg J, Waterman RJ (2009) Flies and flowers in Darwin's race. Evolution, 63, 268–279.

Pi HQ, Quan QM, Wu B, Lü XW, Shen LM, Huang SQ (2021) Altitude-related shift of relative abundance from insect to sunbird pollination in *Elaeagnus umbellata* (Elaeagnaceae). Journal of Systematics and Evolution, 59, 1266–1275.

Ramos SE, Schiestl FP (2019) Rapid plant evolution driven by the interaction of pollination and herbivory. Science, 364, 193–196.

Reich D, Berger A, von Balthazar M, Chartier M, Sherafati M, Schönenberger J, Manafzadeh S, Staedler YM (2020) Modularity and evolution of flower shape: The role of function, development, and spandrels in Erica. New Phytologist, 226, 267–280.

Rodriguez-Peña RA, Wolfe AD (2023) Flower morphology variation in five species of *Penstemon* (Plantaginaceae) displaying Hymenoptera pollination syndrome. Botanical Sciences, 101, 217–232.

Shi YH, Ren ZX, Zhao YH, Wang H (2021) Effect of climate change on the distribution and phenology of plants, insect pollinators, and their interactions. Biodiversity Science, 29, 495–506. (in Chinese with English abstract) [施雨含, 任宗昕, 赵延会, 王红 (2021) 气候变化对植物–传粉昆虫的分布区和物候及其互作关系的影响. 生物多样性, 29, 495–506.]

Stanley AM, Martel C, Arceo-Gómez G (2021) Spatial variation in bidirectional pollinator-mediated interactions between two co-flowering species in serpentine plant communities. AoB Plants, 13, plab069.

Stebbins GL (1970) Adaptive radiation of reproductive characteristics in angiosperms. I. Pollination mechanisms. Annual Review of Ecology and Systematics, 1, 307–326.

Sun JF, Gong YB, Renner SS, Huang SQ (2008) Multifunctional bracts in the dove tree *Davidia involucrata* (Nyssaceae: Cornales): Rain protection and pollinator attraction. The American Naturalist, 171, 119–124.

Todesco M, Bercovich N, Kim A, Imerovski I, Owens GL, Dorado Ruiz Ó, Holalu SV, Madilao LL, Jahani M, Légaré JS, Blackman BK, Rieseberg LH (2022) Genetic basis and dual adaptive role of floral pigmentation in sunflowers. eLife, 11, e72072.

Toji T, Ishimoto N, Egawa S, Nakase Y, Hattori M, Itino T (2021) Intraspecific convergence of floral size correlates with pollinator size on different mountains: A case study of a bumblebee-pollinated *Lamium* (Lamiaceae) flowers in Japan. BMC Ecology and Evolution, 21, 64.

Thompson JN (1994) The Coevolutionary Process. University of Chicago Press, Chicago.

Thompson JN (1999) Specific hypotheses on the geographic mosaic of coevolution. The American Naturalist, 153(S5), S1–S14.

Thompson JN (2005) The Geographic Mosaic of Coevolution. University of Chicago Press, Chicago.

Tong ZY, Wu LY, Feng HH, Zhang M, Armbruster WS, Renner SS, Huang SQ (2023) New calculations indicate that 90% of flowering plant species are animal-pollinated. National Science Review, 10, nwad219.

Wang XY (2017) Pollen Chemical Defense Mechanism of Two *Dipsacus* Species. PhD dissertation, Wuhan University, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [王晓月 (2017) 川续断属两种植物花粉的化学防御机制研究. 博士学位论文, 武汉大学, 武汉.]

Wang Y, Hu XF, Song HL, Zhou QS, Wu QT, Kong WN, Zhu CD, Li J (2022) Effect of habitat type on pollinator diversity. Chinese Journal of Applied Entomology, 59, 1259–1268. (in Chinese with English abstract) [王怡, 胡学丰, 宋怀磊, 周青松, 吴清涛, 孔维娜, 朱朝东, 李捷 (2022) 生境类型对传粉昆虫多样性的影响. 应用昆虫学报, 59, 1259– 1268.]

Wasserthal LT (1997) The pollinators of the Malagasy star orchids *Angraecum sesquipedale*, *A. sororium* and *A. compactum* and the evolution of extremely long spurs by pollinator shift. Botanica Acta, 110, 343–359.

Wenzell KE, Skogen KA, Fant JB (2023) Range-wide floral trait variation reflects shifts in pollinator assemblages consistent with pollinator-mediated divergence despite generalized visitation. Oikos, 2023, e09708.

Willmer P (2011) Pollination and Floral Ecology. Princeton University Press, Princeton.

Xiang X, Huang YM, Yang CY, Li ZQ, Chen HY, Pan YP, Huo JX, Ren L (2021) Effect of altitude on community-level plant functional traits in the Qinghai Lake Basin, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 45, 456–466. (in Chinese with English abstract) [向响, 黄永梅, 杨崇曜, 李泽卿, 陈慧颖, 潘莹萍, 霍佳璇, 任梁 (2021) 海拔对青海湖流域群落水平植物功能性状的影响. 植物生态学报, 45, 456–466.]

Yao RX, Chen Y, Lü XQ, Wang JH, Yang FJ, Wang XY (2023) Altitude-related environmental factors shape the phenotypic characteristics and chemical profile of *Rhododendron*. Biodiversity Science, 31, 23003. (in Chinese with English abstract) [姚仁秀, 陈燕, 吕晓琴, 王江湖, 杨付军, 王晓月 (2023) 海拔及环境因子影响杜鹃属植物的表型特征和化学性状. 生物多样性, 31, 23003.]

(责任青年编委: 王蔼英　责任编辑: 黄祥忠)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025494

附录1　13个地理居群川续断形态特征的变异系数(包括川续断同一形态特征在居群内的变异系数均值($MCVS_W$)、同一形态特征在居群间的变异系数(CVE_A)及同一居群内不同特征的变异系数均值($MCVD_W$))

Appendix 1　Coefficients of variation for morphological traits across 13 geographic populations of *Dipsacus asper* (including mean *CV* for same traits within population, $MCVS_W$, *CV* for each traits among population, CVE_A, and mean *CV* for different traits within population, $MCVD_W$)

形态特征 Morphological traits	习水 Xishui (XS)	贵阳 Guiyang (GY)	西昌 Xichang (XC)	建始 Jianshi (JS)	麻栗坡 Malipo (MLP)	昆明 Kunming (KM)	丽江 Lijiang (LJ)	盐源 Yanyuan (YY)	喜德 Xide (XD)	大理 Dali (DL)	汶川 Wenchuan (WC)	小金 Xiaojin (XJ)	香格里拉 Shangri-La (SGRL)	$MCVS_W$	CVE_A
植株高度 Plant height	13.45	19.01	16.90	8.26	18.03	19.77	12.63	18.08	17.55	30.36	7.57	17.23	23.19	17.08	25.34
茎直径 Stem diameter	25.90	17.05	26.30	18.75	22.99	16.97	28.35	36.08	22.49	26.21	17.64	22.49	20.19	23.19	34.46
叶片长 Leaf length	20.82	29.34	26.22	22.48	25.53	24.87	18.20	27.01	22.99	35.09	19.64	18.49	28.95	24.59	33.24
叶片宽 Leaf width	19.95	34.67	21.41	37.33	27.91	35.51	30.00	27.62	30.32	43.99	24.44	19.37	22.33	28.84	41.91
花序竖直直径 Inflorescence vertical length	8.93	13.90	8.17	13.01	11.28	9.26	5.49	9.62	9.46	7.87	9.88	10.28	18.81	10.46	17.43
花序水平直径 Inflorescence horizontal length	10.26	11.45	6.10	13.94	9.87	6.86	5.99	7.56	17.18	8.20	8.53	10.71	15.13	10.14	17.22
花管长 Floral tube length	13.94	12.15	12.23	17.20	9.77	15.44	7.86	16.50	17.32	10.87	10.19	30.69	10.92	14.24	36.12
花冠长 Corolla length	16.92	10.98	22.30	19.36	12.73	18.34	11.31	16.49	21.31	27.55	17.52	21.73	15.34	17.84	22.68
花冠宽 Corolla width	17.28	11.48	23.05	25.77	10.18	20.54	33.17	21.32	24.79	12.11	16.62	16.28	15.37	19.07	24.67
雄蕊长 Stamen length	11.46	12.85	10.30	20.85	6.93	8.12	12.08	13.09	16.91	18.29	9.19	24.81	11.27	13.55	17.36
花柱长 Style length	13.78	8.71	15.57	16.92	12.28	9.34	12.04	23.99	18.34	10.07	12.87	13.68	12.04	13.82	19.97
$MCVD_W$	15.70	16.51	17.14	19.44	15.23	16.82	16.10	19.76	19.88	20.97	14.01	18.71	17.59	17.53	26.40

附录2　8个川续断居群中弗里熊蜂虫体特征的比较(平均值 ± 标准误, 单位: mm; 采用广义线性模型分析)。同行不同小写字母表示某特征在不同居群间差异显著; 同一特征的最大平均值以加粗字体突出显示。

Appendix 2　Comparison of morphological traits of *Bombus friseanus* across eight *Dipsacus asper* populations (mean ± SE, unit: mm; analyzed using generalized linear models). Different lowercase letters within the same row indicate significant differences in that trait among populations, and the largest mean value for each trait is highlighted in bold.

虫体特征 Morphological traits	西昌 Xichang (XC)	建始 Jianshi (JS)	昆明 Kunming (KM)	盐源 Yanyuan (YY)	喜德 Xide (XD)	大理 Dali (DL)	汶川 Wenchuan (WC)	小金 Xiaojin (XJ)	Wald χ^2	*df*	*P*
体长 Body length	**17.69 ± 0.31^{a}**	**17.81 ± 0.45^{a}**	16.32 ± 0.48^{bcd}	**17.42 ± 0.40^{ab}**	16.12 ± 0.41^{cd}	16.81 ± 0.81^{abc}	15.88 ± 0.45^{cd}	15.39 ± 0.33^{d}	41.76	7	< 0.001
吻长 Proboscis length	6.72 ± 0.20^{bc}	**7.15 ± 0.30^{ab}**	**7.83 ± 0.32^{a}**	6.45 ± 0.27^{bc}	**7.25 ± 0.27^{ab}**	6.69 ± 0.54^{bc}	6.19 ± 0.30^{cd}	5.60 ± 0.22^{d}	47.85	7	< 0.001
头长 Head length	**4.77 ± 0.10^{ab}**	**4.92 ± 0.15^{a}**	4.29 ± 0.16^{cde}	**4.64 ± 0.13^{abc}**	4.48 ± 0.14^{bcd}	4.00 ± 0.27^{e}	4.29 ± 0.15^{cde}	4.10 ± 0.11^{de}	37.91	7	< 0.001
头宽 Head width	**3.87 ± 0.07^{ab}**	**4.00 ± 0.10^{a}**	3.46 ± 0.11^{cd}	**3.91 ± 0.09^{a}**	3.61 ± 0.09^{bc}	3.31 ± 0.18^{d}	3.50 ± 0.10^{cd}	3.40 ± 0.07^{cd}	52.61	7	< 0.001
头厚 Head height	**2.36 ± 0.09^{ab}**	**2.63 ± 0.13^{a}**	1.66 ± 0.13^{d}	**2.47 ± 0.11^{ab}**	2.21 ± 0.12^{b}	1.80 ± 0.23^{cd}	2.17 ± 0.13^{bc}	2.23 ± 0.09^{b}	37.49	7	< 0.001
胸长 Thorax length	**5.38 ± 0.12^{ab}**	**5.48 ± 0.18^{a}**	**5.01 ± 0.20^{abcd}**	**5.34 ± 0.16^{abc}**	4.78 ± 0.16^{cd}	**5.32 ± 0.32^{abcd}**	4.76 ± 0.18^{d}	4.84 ± 0.13^{bcd}	23.64	7	< 0.001
胸宽 Thorax width	**5.06 ± 0.10^{a}**	**4.85 ± 0.16^{ab}**	4.36 ± 0.16^{c}	**5.17 ± 0.14^{a}**	**4.85 ± 0.14^{ab}**	**4.92 ± 0.28^{a}**	4.46 ± 0.16^{bc}	4.42 ± 0.11^{bc}	36.7	7	< 0.001
胸厚 Thorax height	**4.83 ± 0.15^{ab}**	**4.94 ± 0.22^{a}**	3.80 ± 0.23^{c}	**4.84 ± 0.20^{ab}**	3.78 ± 0.20^{c}	3.76 ± 0.39^{c}	4.25 ± 0.22^{bc}	4.11 ± 0.16^{c}	42.02	7	< 0.001
腹长 Abdomen length	**7.54 ± 0.18^{a}**	**7.41 ± 0.27^{a}**	**7.01 ± 0.28^{ab}**	**7.45 ± 0.24^{a}**	6.87 ± 0.24^{ab}	**7.49 ± 0.47^{a}**	6.84 ± 0.27^{ab}	6.45 ± 0.19^{b}	23.99	7	< 0.001
腹宽 Abdomen width	**5.83 ± 0.14^{a}**	**5.57 ± 0.20^{ab}**	4.73 ± 0.21^{c}	**5.58 ± 0.18^{ab}**	**5.28 ± 0.18^{abc}**	5.14 ± 0.36^{bc}	5.16 ± 0.20^{bc}	5.07 ± 0.14^{bc}	29.06	7	< 0.001
腹厚 Abdomen height	**4.26 ± 0.11^{a}**	**4.24 ± 0.17^{ab}**	3.12 ± 0.18^{d}	**4.19 ± 0.15^{ab}**	3.54 ± 0.15^{cd}	3.32 ± 0.29^{cd}	3.78 ± 0.17^{bc}	3.61 ± 0.12^{c}	53.06	7	< 0.001

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 25482, pages 1–19
doi: 10.17520/biods.2025482
cstr: 32101.14.biods.2025482

•研究报告•

基于混合效应Cox比例风险模型评估气候与土壤对热带引种植物存活的影响

周丽芳[1,2], 慈秀芹[1*], 陈筠灵[1,2], 苏艳萍[1], 申健勇[1], 李捷[1*]

1. 中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心植物系统发育与多样性保护研究组/云南省热带雨林与亚洲象保护重点实验室, 云南勐腊 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 引种植物能否长期存活是评估迁地保护有效性的关键。为探究引种植物在热带植物园户外存活状况及环境因子的影响, 本研究以中国科学院西双版纳热带植物园引种的1,232个物种共2,234株植物为研究对象, 基于混合效应Cox比例风险模型, 量化评估了热带植物园与植物分布地之间气候与土壤差异对其存活的独立影响。结果表明, 在气候因子驱动的模型中, 基于物种分布地气候中位数构建的模型获得最高经验支持, 生长型、年均温和最冷月最低温对引种植物存活具有主要影响, 降水因子(年降水量、最干月降水量和最湿月降水量)的影响相对较弱但也达到显著水平, 且草本植物的死亡风险低于木本植物。在土壤因子驱动的模型中, 基于种源地土壤差异构建的模型获得最高经验支持, 土壤表层有机碳含量和碎石体积百分比是影响引种植物存活的主要因子, 且草本植物的死亡风险高于木本植物。在制定引种策略时, 优先考虑热带植物园与物种分布地气候特征和种源地土壤条件的匹配性, 可提高引种植物存活率并提升热带植物园迁地保护成效。

关键词: 引种植物存活; 混合效应Cox比例风险模型; 气候因子; 土壤因子; 热带

周丽芳, 慈秀芹, 陈筠灵, 苏艳萍, 申健勇, 李捷 (2026) 基于混合效应Cox比例风险模型评估气候与土壤对热带引种植物存活的影响. 生物多样性, 34, 25482. doi: 10.17520/biods.2025482; cstr: 32101.14.biods.2025482.
Zhou LF, Ci XQ, Chen JL, Su YP, Shen JY, Li J (2026) Assessing plant survival in tropical botanical gardens based on climatic and soil factors using mixed-effects Cox proportional hazards models. Biodiversity Science, 34, 25482. doi: 10.17520/biods.2025482; cstr: 32101.14.biods.2025482.

Assessing plant survival in tropical botanical gardens based on climatic and soil factors using mixed-effects Cox proportional hazards models

Lifang Zhou[1,2], Xiuqin Ci[1*], Junling Chen[1,2], Yanping Su[1], Jianyong Shen[1], Jie Li[1*]

1 *Plant Phylogenetics and Conservation Group, Center for Integrative Conservation & Yunnan Key Laboratory for the Conservation of Tropical Rainforests and Asian Elephants, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

ABSTRACT

Aims: This study examined the influence of environmental factors on the survival of introduced plants in a botanical garden, focusing on the effects of climatic and edaphic differences between the botanical garden and the native ranges of the plants.

Methods: We constructed mixed-effects Cox proportional hazards models to quantify the effects of climatic and edaphic differences on plant survival based on a database comprising 2,234 individuals from 1,232 introduced species at the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences.

Results: In climate-driven models, those based on the median climate across species occurrence records demonstrated the strongest empirical support ($\Delta AIC \leq 3$). In addition to species growth form, these models highlighted significant influence of mean annual temperature and minimum temperature of coldest month in the ranges of species studied,

收稿日期 Received: 2025-11-28; 接受日期 Accepted: 2026-04-06
基金项目: 云南省基础研究计划重点项目(202201AS070055)和中国科学院西双版纳热带植物园“十四五”规划项目(E3ZKFF7B) Supported by the Key Projects of the Yunnan Provincial Basic Research Program (202201AS070055) and Project of the 14th Five-Year Plan of Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (E3ZKFF7B)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: cixq@xtbg.ac.cn; jieli@xtbg.ac.cn

while precipitation of driest month, precipitation of wettest month, and annual precipitation in the ranges of species exhibited weaker yet statistically significant effects. Herbal plants showed a lower mortality risk than woody plants. In soil-driven models, those based on provenance soil conditions yielded the best performance. Topsoil organic carbon and gravel content emerged as the primary edaphic factors influencing survival. Herbal plants showed a higher mortality risk than woody plants.

Conclusion: Climatic and edaphic factors substantially impact the survival of introduced tropical plants. Key drivers include the mean annual temperature, minimum temperature of coldest month, topsoil organic carbon, and topsoil gravel content in species' native range, in addition to species growth form. Botanical gardens should prioritize aligning the overall climatic distribution of species and provenance edaphic conditions when planning introductions to enhance survival rates and the effectiveness of living collections.

Key words: introduced plant survival; mixed-effects Cox proportional hazards model; climatic factors; soil factors; tropics

全球生物多样性丧失已成为世界面临的最严峻挑战之一。全球变化显著加速了物种灭绝速率(Ceballos et al., 2015), 改变了生态系统的组成与结构, 削弱了其服务功能(Küpper & Kamenos, 2018)。在原生栖息地持续退化和气候变化加剧影响下, 仅依赖就地保护难以保障受威胁物种的长期生存, 迁地保护成为关键策略(冯晨等, 2023)。植物园作为实施迁地保护的核心主体, 通过引种栽培为受威胁物种提供了替代性生境并支撑其种群维持与恢复(Abeli et al., 2020)。因此, 提高植物园迁地保护的有效性成为热带地区生物多样性保护的关键议题。

迁地保护的成效很大程度上依赖引种植物对环境的适应能力(杨志斌等, 2000), 科学评估并预测引种植物在新环境中的存活潜力是提升迁地保护效率的关键(Thomas et al., 2022)。然而, 目前针对植物园引种植物存活评估的研究十分有限, 尤其缺乏基于长期监测数据的风险预测模型评估(Vincent et al., 2020)。Thomas等(2022)首次将混合效应Cox比例风险模型(mixed-effects Cox proportional hazards model)应用于温带植物园的引种植物生存分析, 为迁地保护效果评估提供了新的方法。然而, 该研究并未覆盖热带地区, 该模型在热带地区的适用性有待验证。植物在进化过程中倾向于保留祖先形成的气候适应特征(Barandun et al., 2025), 其气候生态位在短时间内相对稳定。研究表明, 物种的环境耐受范围与其分布纬度范围呈正相关, 热带植物往往具有较窄的生态位, 对气候变化更为敏感; 而温带植物则通常具有较宽的生态位, 表现出更强的环境耐受性(Drake et al., 2025)。由此推测, 栽培地与物种原生分布地的气候偏离可能改变物种固有的生态位宽度, 影响其迁地存活表现。然而, 这种影响究竟是源于物种对整体分布区气候的适应还是对种源地局地气候条件的响应, 仍需进一步验证。

气候不仅决定植物的地理分布范围, 还通过调节植物生理生态等过程塑造植物的适应策略, 是影响引种存活的关键因子之一(Woodward, 1987; Lee-Yaw et al., 2016; Briscoe Runquist et al., 2020)。随着全球气候变化加剧, 评估栽培地与物种分布地之间的气候差异对引种植物存活状况的影响, 已成为衡量迁地保护成效的关键, 对揭示引种风险和制定针对性的保育策略具有重要指导价值(Rosenblad et al., 2019; Sáenz-Romero et al., 2020)。Thomas等(2022)对密苏里植物园引种植物的研究, 聚焦气候对植物存活的影响, 是开展此类研究的典型代表。然而, 气候并非决定引种植物存活的唯一限制因子, 土壤理化性质也可通过调控水分和养分可利用性显著影响引种植物在新生境中的生长与存活(Passioura, 2002; 赵丹丹等, 2019; 陈佩琦和薛跃规, 2024)。即便气候条件适宜, 若土壤的理化性质变化太大, 仍有可能诱发渗透胁迫或养分缺乏, 降低其存活概率(张学平等, 2016)。在热带与亚热带地区, 气候变化和土壤理化性质的改变加大了引种植物存活的不确定性(Li et al., 2022)。尽管气候与土壤在自然生态系统中高度耦合, 但二者在生态层级与作用机制上存在明显差异: 气候代表宏观尺度的环境过滤, 而土壤则反映了局域尺度的资源限制; 同时, 由于气候条件在长期尺度上影响土壤形成过程, 这两类变量常常存在相关性, 若在模型中同时纳入, 可能引发多重共线性并削弱参数估计的稳定性。因此, 分别单独构建气候驱动与土壤驱动的生存模型, 以识别不同生态过滤层级下的主导限制因子, 有助于深入理解迁地保护过程中植物的生态适应过程,

也可为提升迁地保护实践的科学性与有效性提供理论支撑。

木本植物与草本植物具有不同的环境适应能力。前者通过木质化茎干构建稳定的水力传输系统, 并积累非结构性碳储备, 增强对长期或多重环境胁迫的耐受能力; 后者则依赖高效的渗透调节机制、光合类型可塑性及快速的资源重分配机制实现对环境变化的快速响应(刘明秀和梁国鲁, 2016; Wang et al., 2020; 周雨珩等, 2023; Xing et al., 2024)。在迁地引种过程中, 不同生长型植物对环境适应的策略差异会影响植物的存活表现(石福习等, 2012; 许令明等, 2020; 邓蓓等, 2024)。将植物生长型纳入评估框架有助于识别不同生长型植物对环境差异的响应模式, 对揭示其存活风险并优化植物园迁地保护策略具有重要价值。

引种植物存活具有明显的时间依赖性和删失特征, 且受多种环境因子的共同影响, 因此对分析方法要求较高。传统生存分析方法, 如Logistic回归或Kaplan-Meier法, 虽然可以描述引种植物的存活状态, 但在处理生存时间、删失数据及多协变量间的复杂交互作用时存在局限性(Woodall et al., 2005; Fan et al., 2006)。混合效应Cox比例风险模型能在不预设基准风险函数形式的前提下有效整合生存时间与删失信息, 评估多个协变量对死亡风险的相对影响, 更适用于复杂生态数据的风险分析。尤其是该模型引入了随机效应结构, 将物种与系统发育信息纳入模型框架, 可有效控制数据非独立性, 提高参数估计的稳健性与生物学的解释效能(李春明, 2020; Thomas et al., 2022)。

鉴于气候与土壤分别代表宏观尺度的环境过滤与局域尺度的资源限制, 且气候在长期尺度上影响土壤形成过程, 二者在统计上往往高度相关, 本研究基于中国科学院西双版纳热带植物园的引种植物数据, 通过独立构建气候驱动与土壤驱动的两类混合效应Cox比例风险模型, 分别评估了气候偏离与土壤限制对引种植物存活风险的独立贡献, 比较了木本与草本植物的死亡风险差异, 以期明确迁地存活的关键限制因子, 并区分气候匹配与土壤可调控因素在迁地实践中的相对重要性, 为优化迁地引种筛选策略、提升稀有濒危植物迁地保护的稳定性与可持续性提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

中国科学院西双版纳热带植物园(21°41′ N, 101°25′ E) (以下简称“版纳植物园”, XTBG)处于热带向亚热带的过渡地带, 具有典型的过渡带特征和多种生境类型(朱华, 2007; 张哲等, 2019)。经过几十年的持续建设, 版纳植物园已建立起保存万余种活植物的收集体系, 是我国面积最大、收集物种最丰富、专类园区最多的植物园之一, 也是世界上户外保存植物种数最多的植物园之一。从建园初期开始, 版纳植物园就对引种植物的生长状况、适应性及物候等特征进行长期规范的监测与记录, 积累了连续、可靠的观测数据(赵俊斌等, 2009), 为开展引种植物生存分析等研究奠定了关键的数据基础。

1.2 研究对象

本研究以版纳植物园的引种植物为研究对象, 数据来源于版纳植物园园林园艺中心的植物档案室, 涵盖1959–2021年间引种培育的1,232个植物物种(包括草本植物、灌木、乔木和藤本) (附录1)。引种流程遵循标准化园艺管理规范, 相关生存数据保存于版纳植物园的科学数据中心(http://sdb.xtbg.ac.cn), 详细记录了植物来源、分类信息、定植时间、死亡时间及死亡原因等信息。为避免人为干扰对分析结果的影响, 本研究剔除因园区改造、景观调整或过度生长等非自然因素导致的个体移除或死亡记录。经筛选后, 共纳入2,234株植物的生存数据, 其中1,265株在观测期内存活, 969株死亡(附录1)。个体存活时间范围为2–21,973 d。在生存分析中, 将存活个体视为右删失数据, 死亡个体视为完全观测数据, 以准确估计引种植物在户外环境中的长期存活风险(Moore, 2016)。

1.3 地理分布数据来源与清洗

首先构建了引种植物的地理来源数据集。种源地(即繁殖体采集地)坐标由版纳植物园园林园艺中心植物档案室提供, 反映了引种植物种源地的原生气候与土壤背景。为表征物种在其自然分布区所适应的生态气候与土壤范围, 我们从全球生物多样性信息网络(GBIF, https://www.gbif.org/)获取目标物种的全球分布记录(获取时间: 2024年11月1日)。利用CoordinateCleaner软件包(Zizka et al., 2019)对原

始数据进行质量控制, 剔除了位于水域、坐标异常及重复的记录, 经清洗后, 共获得1,232个物种的4,181,018条有效分布记录, 用于后续环境变量的提取与比较。

1.4 气候变量提取与气候差异量化

基于上述地理来源数据集, 从WorldClim 2.1数据库(Fick & Hijmans, 2017)提取1970–2000年间空间分辨率为30″ (约1 km^2)的气象数据。为量化版纳植物园与引种植物物种分布地之间的气候差异, 参照Thomas等(2022)的变量框架, 本研究选取6个与植物生存密切相关的气候指标: 年均温(mean annual temperature, mat)、最冷月最低温(minimum temperature of coldest month, mtcm)、最热月最高温(maximum temperature of warmest month, mtwm)、年降水量(annual precipitation, map)、最干月降水量(precipitation of driest month, pdm)和最湿月降水量(precipitation of wettest month, pwm)。利用R语言raster包(Hijmans, 2025)分别提取版纳植物园、各物种种源地及其全球分布点对应的气候变量值。为减少离群值对气候分布特征的干扰, 对GBIF分布记录大于30的物种(共920种), 采用四分位距法(interquartile range, IQR)识别异常气候变量值, 将低于下四分位数(Q1)以下1.5倍IQR或高于上四分位数(Q3)以上1.5倍IQR的数值予以剔除(郑哲明等, 2025)。经筛选后, 最终保留1,232个物种的有效分布记录共计3,152,039条, 用于后续的气候差异比较(图1, 附录2)。

为量化植物园与引种植物物种分布地之间的气候差异, 考虑气候对引种植物存活的影响(Woodward, 1987; Nievola et al., 2017), 提出如下假设: 首先, 年均温作为综合热量指标, 植物园与物种分布地之间的年均温差异可能影响引种植物的存活; 其次, 极端温度(最冷月最低温与最热月最高温)反映了物种的生理耐受边界, 当植物园的极端温度超出物种分布地的历史范围时, 可能构成存活限制; 第三, 降水因子(年降水量、最干月降水量、最湿月降水量)反映了水分供给格局。版纳植物园在干旱季节实施的人工灌溉可缓解降水不足的限制, 但过量降水仍可能对降水量低于版纳植物园的物种产生负面影响。

基于上述假设, 本研究参照Thomas等(2022)的框架, 采用3种方法计算版纳植物园与物种分布地之间的气候差异。第一种是以种源地为参照, 计算版纳植物园与种源地之间的气候差异, 用以评估种源地气候背景对引种存活的指示作用。年均温差异为版纳植物园与种源地年均温的绝对差值; 对于极

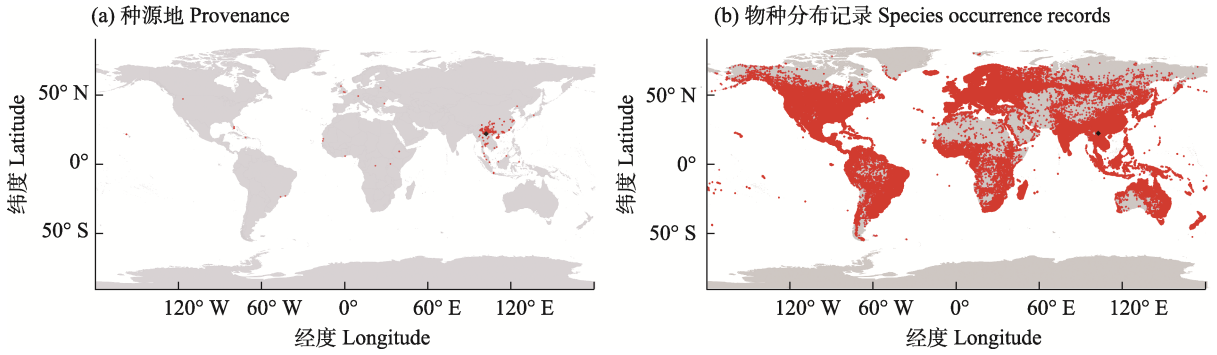


图1 本研究引种植物种源地(a)与物种分布记录(b)的地理分布。繁殖体来自435个种源地, 由中国科学院西双版纳热带植物园(XTBG)通过野外采集、与其他植物园交换及购买获得。本研究共涵盖1,232个物种, 其3,152,039条分布记录源自全球生物多样性信息网络(GBIF, https://www.gbif.org/) (已剔除异常值)。各物种分布记录数量的中位数为47, 平均值为2,767 (1–500,332)。XTBG的位置(21°41′ N, 101°25′ E)以黑色菱形符号标示, (a)和(b)中的红色实心圆分别代表各种源地和各物种分布地的位置。

Fig. 1 Geographic distribution of provenance (a) and species occurrence records (b) for introduced plants included in this study. Propagules were obtained from 435 provenances through field collection, exchange with other botanical gardens, and purchase, all coordinated by the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (XTBG). This study includes 1,232 species, with 3,152,039 occurrence records obtained from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF, https://www.gbif.org/) and cleaned by removing outliers. The number of occurrence records per species had a median of 47, a mean of 2,767, and ranged from 1 to 500,332. The location of XTBG (21°41′ N, 101°25′ E) is marked by a black diamond. Red circles indicate provenance in (a) and species occurrence records in (b).

端温度与降水变量, 分别计算版纳植物园与种源地对应气候参数之间的单向差异, 依次记为Δmat_L、$\Delta mtcm_L$、$\Delta mtwm_L$、Δmap_L、Δpwm_L和Δpdm_L。其中, 版纳植物园的各气候参数值分别为: mat = 20.5℃, mtcm = 9.1℃, mtwm = 29.0℃, map = 1,644 mm, pwm = 296 mm, pdm = 14 mm; 而mat_L、$mtcm_L$、$mtwm_L$、map_L、pwm_L和pdm_L则分别代表引种植物种源地的相应气候变量值, 其计算公式如下:

$$\Delta mat_L = |20.5\,℃ - mat_L| \quad (1)$$

$$\Delta mtcm_L = \begin{cases} 9.1\,℃ - mtcm_L \text{ if } mtcm_L > 9.1\,℃ \\ 0\,℃ \text{ if } mtcm_L \le 9.1\,℃ \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta mtwm_L = \begin{cases} 29.0\,℃ - mtwm_L \text{ if } mtwm_L < 29.0\,℃ \\ 0\,℃ \text{ if } mtwm_L \ge 29.0\,℃ \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta map_L = \begin{cases} 1{,}644\text{ mm} - map_L \text{ if } map_L < 1{,}644\text{ mm} \\ 0\text{ mm if } map_L \ge 1{,}644\text{ mm} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta pwm_L = \begin{cases} 296\text{ mm} - pwm_L \text{ if } pwm_L < 296\text{ mm} \\ 0\text{ mm if } pwm_L \ge 296\text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta pdm_L = \begin{cases} 14\text{ mm} - pdm_L \text{ if } pdm_L < 14\text{ mm} \\ 0\text{ mm if } pdm_L \ge 14\text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

第二种是以物种整体分布地气候中位数为参照, 计算版纳植物园与物种分布地气候中位数的差值, 以评估气候匹配程度对引种植物存活的影响。计算方式与种源地气候法类似, 仅将种源地气候值替换为物种分布地气候中位数, 各差异指标中以下标“M”替代“L”, 分别记为Δmat_M、$\Delta mtcm_M$、$\Delta mtwm_M$、Δmap_M、Δpwm_M和Δpdm_M。

第三种是基于物种整体分布点计算处于较版纳植物园更极端气候条件下的分布点比例, 以量化物种气候耐受范围相对于版纳植物园气候条件的覆盖程度(图2)。如, 基于mtcm计算其高于版纳植物园的分布点占比; 基于mtwm计算其低于版纳植物园的分布点占比; 当物种mat中位数低于版纳植物园时, 计算其低于版纳植物园的分布点占比, 反之则计算其高于版纳植物园的分布点占比; 基于pdm、pwm以及map分别计算其低于版纳植物园的分布点占比。该方法可量化植物园气候在物种分布地气候范围中的相对位置, 为评估其在植物园的潜在适应性提供依据。

1.5 土壤变量的获取及差值的量化

基于引种植物的地理来源数据集, 本研究从Harmonized World Soil Database (HWSD) v1.2 (https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)提取空间分辨率为30″ (约1 km^2)的土壤理化数据。该数据库包含表层(topsoil, 0–30 cm)和底层(subsoil, 30–100 cm)两层土壤数据。本研究选取两层共24个连续型土壤变量(每层12个), 包括土壤酸碱度、容重、有机碳含量、沙含量、黏土含量等理化指标。利用R语言raster包分别提取版纳植物园、种源地及物种分布地对应的土壤变量值。首先剔除缺失种源地土壤信息的记录; 其次, 对GBIF分布记录数量 ≥ 30的物种, 采用四分位距剔除异常值。最终保留了566个物种的共2,529,734条有效分布记录(附录2)。

为了量化版纳植物园与引种植物物种分布地之间的土壤差异, 本研究采用两种土壤差异计算方法: (1)种源地的土壤差异(L), 即计算版纳植物园与引种植物种源地土壤变量的绝对差值, 以反映种源地土壤特征对引种植物存活的影响; (2)物种分布地土壤中位数差异(M), 即计算版纳植物园与物种分布地土壤中位数的绝对差值, 评估物种整体分布地土壤特征对引种植物存活的影响。

为筛选出与引种存活显著相关的候选变量, 首先基于单因素Cox比例风险模型分别对24个土壤变量的种源地土壤差异(L类)和分布地土壤中位数差异(M类)进行独立筛选, 仅保留在两种差异计算方法中均与存活风险显著关联($P < 0.1$)的土壤变量(附录3), 以保证L类与M类模型间预测变量集合的一致性。为降低多重共线性并优化预测变量子集, 采用LASSO (least absolute shrinkage and selection operator)方法进一步进行变量筛选(附录4)。最终确定了4个关键土壤变量(底层土壤容重、表层碎石体积百分比、表层有机碳含量和表层沙含量)被纳入后续的统计分析与模型构建中, 用以量化土壤环境差异对引种植物存活风险的影响。

1.6 混合效应Cox比例风险模型的拟合

基于混合效应Cox比例风险模型(Therneau & Grambsch, 2000), 本研究分别构建了纳入气候差异变量的生存模型(以下简称“气候模型”)和纳入土壤差异变量的生存模型(以下简称“土壤模型”), 以独立评估气候与土壤差异对引种植物存活风险的影响。两类模型均将环境差异变量(气候或土壤)和植物生长型作为固定效应, 并将物种和系统发育关系

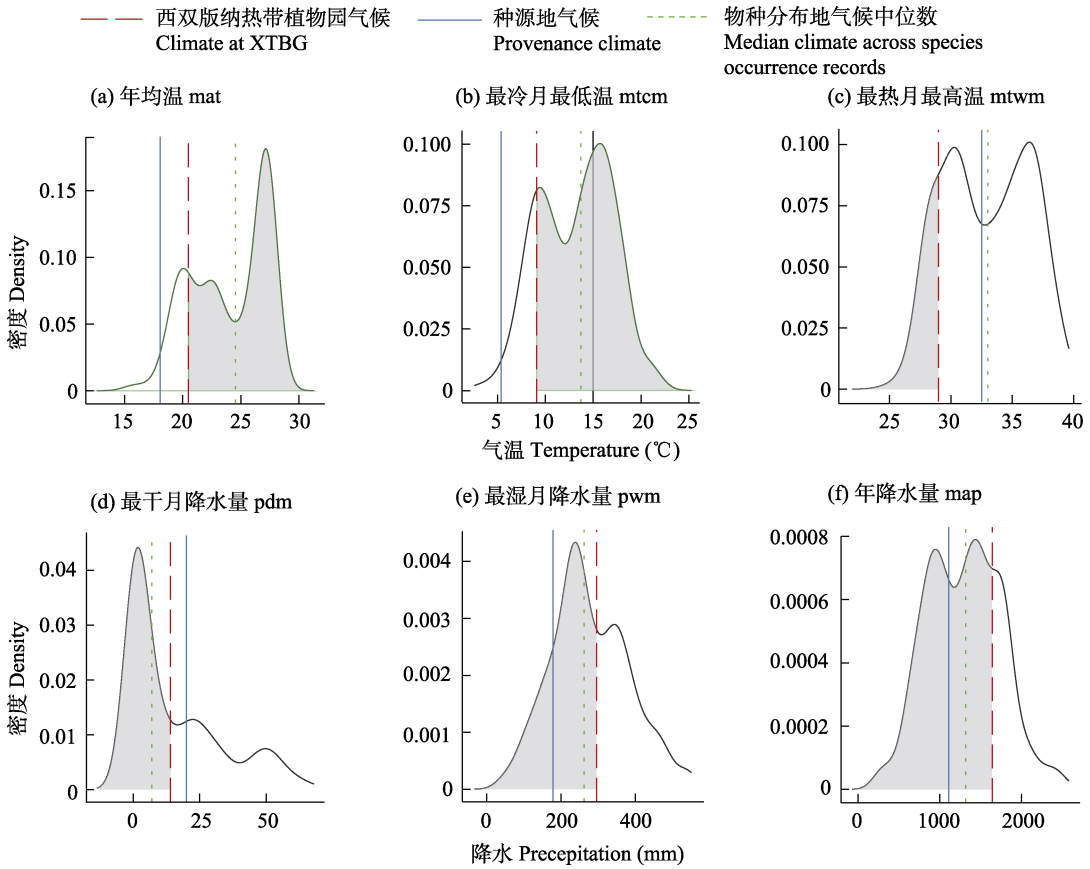


图2　基于物种整体分布点计算气候条件较中国科学院西双版纳热带植物园(XTBG)更为极端的比例。以研究物种黄葛树(*Ficus viren*)为例进行图示说明：红色长虚线表示XTBG的气候参数值，蓝色线表示种源地气候，绿色短虚线表示物种分布地气候中位数，灰色阴影曲线为采用核密度估计构建的物种气候分布密度(分布点气候数据基于GBIF分布记录与WorldClim 2.1气候数据匹配提取)。该指标通过计算物种分布区中较XTBG气候更为极端一侧的累积比例获得。具体计算规则如下：最冷月最低温(mtcm)取分布点中较XTBG更温暖者所占比例；最热月最高温(mtwm)取较XTBG更寒冷者所占比例；年均温(mat)依据物种分布区气候中位数与XTBG的相对关系确定，若中位数低于XTBG，则计算低于XTBG的分布点比例，反之则计算高于XTBG的分布点比例。降水变量统一计算低于XTBG降水值的分布点比例。该方法以物种气候生态位整体为参照，区别于基于单一繁殖体来源地的局域适应假设，适用于气候耐受性由广适基因型主导的情形。

Fig. 2　Climatic differences between Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (XTBG) and the distribution of plants in the wild based on the proportion of the climatic distribution of each species that was more extreme than the climate at XTBG, illustrated with one of the study species: *Ficus virens*. Red long-dashed vertical lines indicate the climatic parameter values at XTBG; blue lines indicate the climate at the provenance; green short-dashed vertical lines indicate the median climate across occurrence records of the species; and gray shaded curves represent the density of the species climatic distribution constructed using kernel density estimation, with climatic data for occurrence records extracted by matching GBIF distribution records with WorldClim 2.1. This metric was derived by calculating the cumulative proportion of species occurrence records falling on the side more extreme than the XTBG threshold. Specifically, for minimum temperature of coldest month (mtcm), we calculated the proportion of occurrence records with temperatures warmer than that at XTBG; for maximum temperature of warmest month (mtwm), we calculated the proportion of occurrence records with temperatures colder than that at XTBG. For mean annual temperature (mat), the metric depended on the relative position between the species median and XTBG: When the species median was lower, we calculated the proportion of occurrence records with temperatures lower than that at XTBG; otherwise, we calculated the proportion of occurrence records with temperature higher than that at XTBG. For precipitation variables—annual precipitation (map), precipitation of driest month (pdm), and precipitation of wettest month (pwm)—we consistently calculated the proportion of occurrence records with precipitation lower than that at XTBG. This approach emphasizes climatic properties of the whole species distribution, as opposed to propagule provenance under the assumption of local adaptation, and may be useful when species' climatic niches are largely determined by the tolerance of generalist genotypes.

作为随机效应。其中，生长型分为草本与木本两类，本研究将非禾本科草本和禾本科划分为草本植物，将灌木、乔木和藤本划分为木本植物，以控制不同生长型在资源利用策略与生存能力方面的差异(Smith & Donoghue, 2008)。

为校正数据中的非独立性，本研究分别构建了

两类随机效应结构, 且均以物种为随机效应水平。首先, 拟合具有物种独立随机效应的Cox比例风险模型, 以物种分类单元作为随机截距, 校正同一物种内不同栽培个体间的非独立性, 假设物种间基线风险独立分布; 其次, 拟合具有系统发育相关随机效应的模型, 通过引入系统发育方差-协方差矩阵校正物种间因共同进化历史导致的非独立性(Therneau, 2024), 利用coxmeMlist函数指定随机效应的协方差结构与系统发育分支长度成正比, 假设系统发育关系较近的物种具有相似的基线风险。系统发育关系基于R语言V.PhyloMaker包构建(Jin & Qian, 2019)。物种名称通过The Plant List (http://www.theplantlist.org/)和R语言Taxonstand包(Cayuela et al., 2012)进行标准化处理, 以确保系统发育信息匹配的准确性(附录5)。

本研究共拟合了378个气候模型(涵盖6个气候变量的63种组合、3种气候差异度量方法及2类随机效应结构)以及60个土壤模型(涵盖4个土壤变量的15种组合、2种土壤差异度量方法及2类随机效应结构)。所有模型均使用R语言coxme包(v.2.2-22) (Therneau, 2024)进行拟合, 各模型固定效应变量间均不存在显著的多重共线性(附录6, 附录7)。模型选择基于赤池信息准则差值(ΔAIC), 其中ΔAIC ≤ 3视为具有相似经验支持(Burnham & Anderson, 2002)。对经验支持最高的模型集合(ΔAIC ≤ 3)提取解释变量的回归系数(即对数风险比β)和随机效应标准差。回归系数表示解释变量每增加1个单位时瞬时死亡风险的相对变化(Thomas et al., 2022), 该系数反映了在特定解释变量取值下植物相对于基准生存函数的存活可能性, 而基准生存函数描述了所有解释变量取零时的植物随时间的生存状况(Harrell, 2015)。为阐释这些系数的生物学意义, 我们采用Nelson-Altschuler-Aalen风险估计量计算了基准生存函数(Moore, 2016), 并构建了解释变量梯度变化下的生存曲线, 以量化解释变量对植物存活概率的边际效应。随机效应标准差可量化在控制固定效应(环境因子差异与生长型)后物种层面未解释的差异程度。

2 结果

2.1 气候模型结果

基于气候差异的混合效应Cox比例风险模型显示, 以物种作为独立随机效应的模型, 其经验支持度明显高于纳入系统发育的随机效应模型(图3)。在物种独立随机效应模型中, 基于物种分布地气候中位数差异构建的模型获得最高经验支持(ΔAIC ≤ 3), 而基于极端气候比例(ΔAIC ≥ 5.54)或种源地气候差异(ΔAIC ≥ 24.63)的模型支持度较低(图3, 附录8)。综上, 基于分布地气候中位数差异且纳入物种独立随机效应的9个模型被确定为具有最高经验支持的模型集合(ΔAIC ≤ 3), 用于量化气候因子对引种植物存活的效应大小。

在9个具有最高经验支持的模型中, 生长型对植物存活的影响具有高度一致性。所有模型均显示, 草本植物的死亡风险显著低于木本植物(β为−0.42至−0.39, $P < 0.05$), 对应的风险比(hazard ratio, HR)为0.65–0.68 (图4, 附录9), 表明草本植物在任何给定时间间隔内的死亡风险是木本植物的0.65–0.68倍。

气候变量方面, 9个模型一致纳入Δmtcm和Δmat, 且均具有统计学意义。mtcm每降低1℃, 死亡风险增加9.4%–12.7% (β为0.09–0.12, HR为1.09–1.13); mat每升高1 ℃, 死亡风险增加13.9%–18.5% (β为0.13–0.17, HR为1.14–1.19) (图4, 图5, 附录9)。在9个具有最高经验支持的模型中, Δmtwm仅被纳入2个模型, 且回归系数均无统计学意义。

在降水变量中, Δmap被纳入5个模型, 但仅2个模型的回归系数有统计学意义(约–0.000636至–0.000635), 表明map每增加1 mm, 死亡风险降低0.06% (HR = 0.999)。Δpwm被纳入5个模型, 其中3个模型的回归系数有统计学意义(–0.0030至–0.0029), 表明pwm每增加1 mm, 死亡风险降低0.29%–0.30% (HR = 0.997) (图4, 图5, 附录9)。Δpdm同样被纳入5个模型, 但仅1个模型的回归系数有统计学意义(–0.03315), 表明pdm每增加1 mm, 死亡风险降低3.26% (HR = 0.967) (图4, 附录9)。降水变量的单位变化对死亡风险的影响幅度相对有限, 其风险比(HR为0.967–0.999)偏离1的程度(< 4%)远低于温度因子(HR为1.09–1.19, 偏离程度9%–19%), 降水所致死亡风险变化幅度不足温度效应的1/3 (图4, 附录9)。

9个具有最高经验支持的模型均基于物种独立随机效应结构, 其标准差估计值相近(σ为1.207–

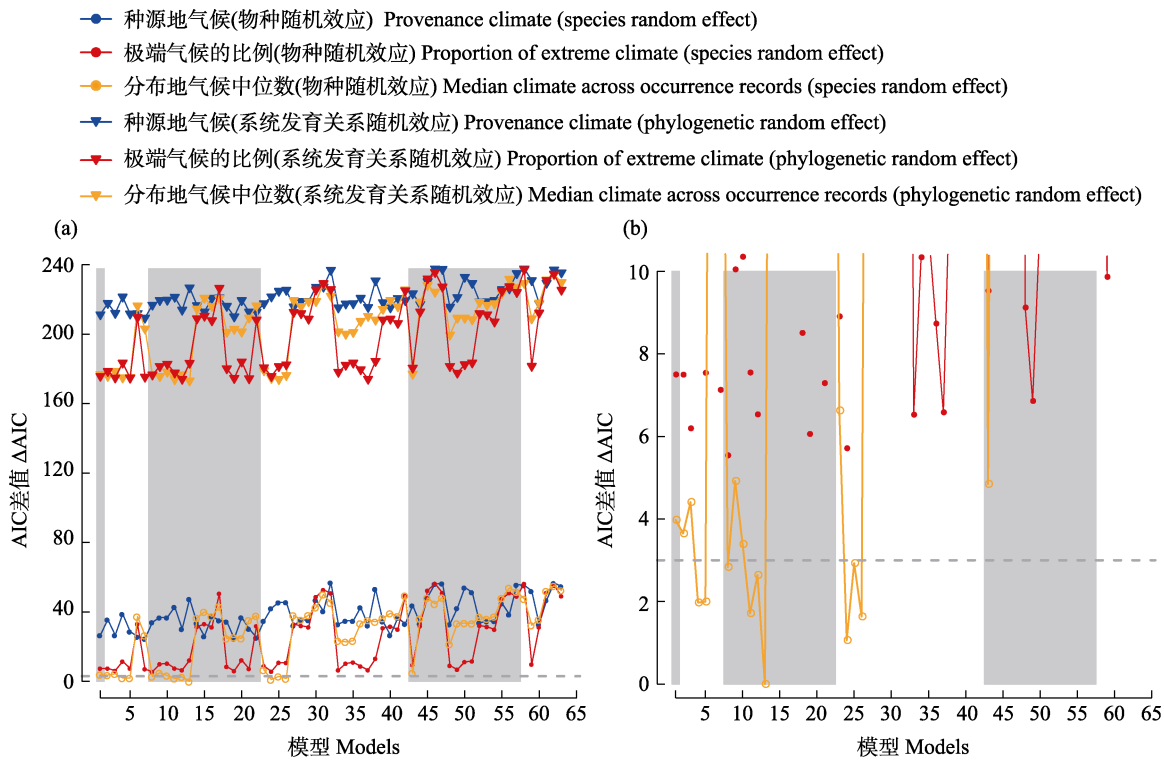


图3　气候差异度量与生长型对引种植物存活影响的混合效应Cox比例风险模型支持度比较。横坐标为模型编号(1–63)，按所含气候变量数量从6个递减至1个(由左至右，灰白条带标识)分组；纵坐标表示赤池信息准则差值(ΔAIC，相对于最佳模型的AIC差异)。模型采用3种气候差异量化指标：种源地气候(蓝色)、物种分布地气候中位数(橙色)以及极端气候比例(红色)；并结合两种随机效应结构：物种独立随机效应(圆形)和系统发育相关随机效应(三角形)。灰色虚线表示ΔAIC = 3的阈值。图(b)为图(a)中ΔAIC ≤ 10区域的放大视图，以清晰展示高支持度模型(ΔAIC ≤ 3)的分布。所有模型均以生长型作为固定效应。

Fig. 3　Comparison of empirical support for mixed-effects Cox proportional hazards models assessing effects of climatic difference metrics and growth form on survival of introduced plants. The x-axis indicates candidate model numbers (1–63) grouped by the number of climatic variables included (decreasing from 6 to 1 from left to right, indicated by alternating gray and white bands); the y-axis indicates Akaike information criterion differences (ΔAIC, relative to the best-supported model). Models incorporated three climatic difference metrics: difference from climate at provenance (blue), difference from median climate across occurrence records (orange), and proportion of extreme climat (red); and two random-effect structures: uncorrelated species random effects (circles) and phylogenetically correlated random effects (triangles). The gray dashed line indicates the ΔAIC = 3 threshold. Panel (b) provides a detailed view of the upper range (ΔAIC ≤ 10) in panel (a), highlighting models with highest support (ΔAIC ≤ 3). All models included growth form as a fixed effect.

1.214) (附录10)。在控制固定效应后，这一显著的种间差异表明，即使来自相同种源地的植物，其死亡风险仍因物种特性不同而存在较大差异。鉴于随机效应服从正态分布N (0, σ^2)，约16%的物种其随机效应值将高于种间平均值1个标准差以上，对应死亡风险达到平均水平的3.34–3.37倍(HR = exp(σ))或更高；反之，约16%的物种其随机效应值将低于平均值1个标准差以上，对应死亡风险降至平均水平的0.30倍(HR = 0.30)或更低。

2.2　土壤模型结果

基于土壤差异的混合效应Cox比例风险模型同样显示，其支持度因随机效应结构不同而存在显著差异。以物种作为独立随机效应的模型，其支持度显著高于纳入系统发育的随机效应模型(图6)。在物种独立随机效应模型中，基于植物园与种源地土壤差异构建的模型获得最高经验支持(ΔAIC ≤ 3)，而基于物种分布地土壤中位数差异的模型支持较弱(ΔAIC ≥ 10.25) (图6，附录11)。综上，共计4个土壤模型被确定为具有最高经验支持(ΔAIC ≤ 3)，并用于后续土壤因子效应的详细评估。

4个具有最高经验支持的模型(ΔAIC ≤ 3)在生长型效应上表现出高度一致性。所有模型均显示，相对于木本植物，草本植物的死亡风险显著升高(β介于0.778–0.779之间，均具有统计学意义) (图7，附

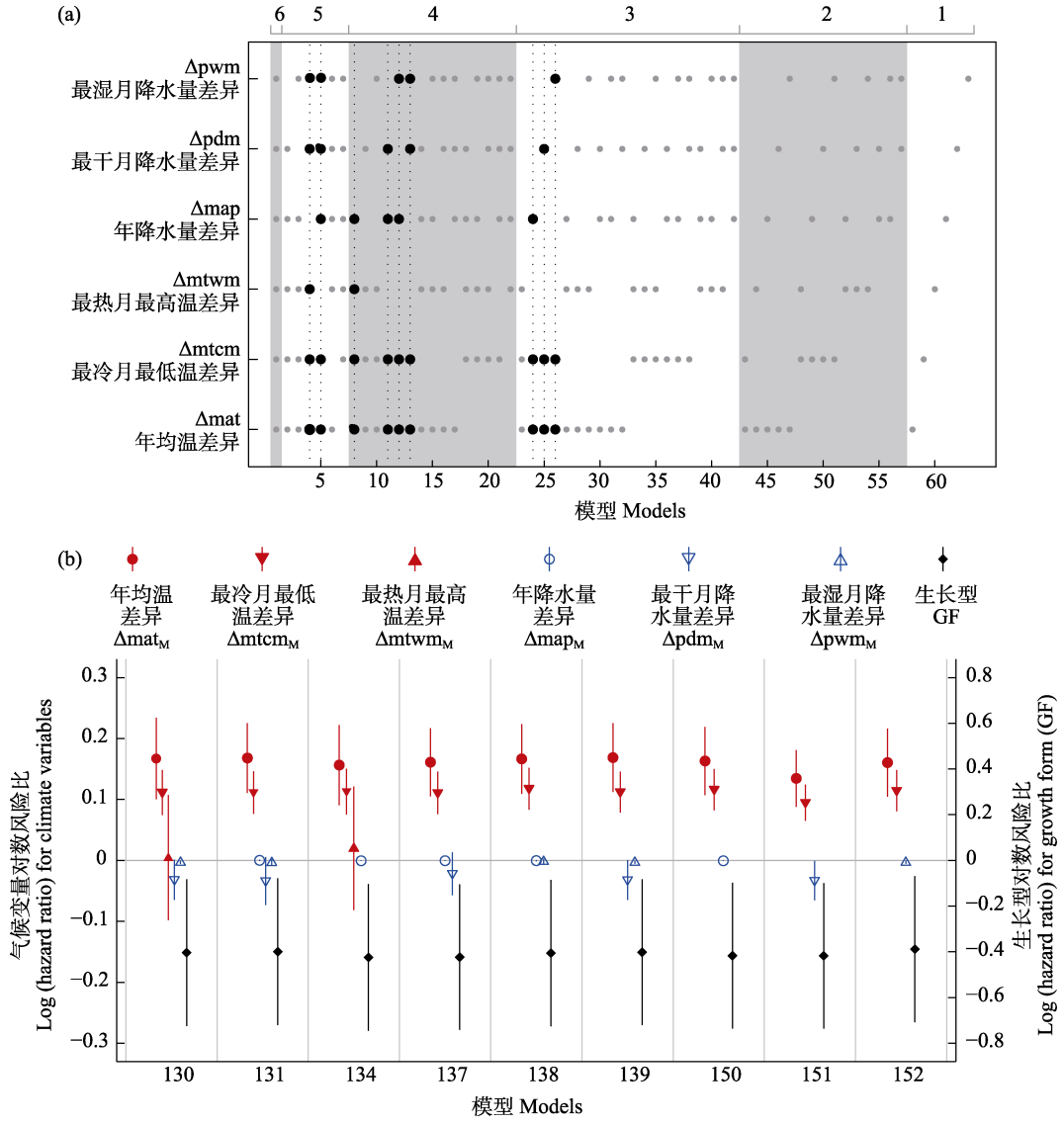


图4　气候差异与生长型对引种植物存活影响的混合效应Cox比例风险模型比较与效应估计。 (a)各模型包含的气候变量组合。纵坐标为6个气候差异变量: 年均温差异、最冷月最低温差异、最热月最高温差异、年降水量差异、最干月降水量差异以及最湿月降水量差异。横坐标为这6个气候差异变量的非空组合。灰色小圆点表示模型包含的变量，垂直虚线标记具有最高经验支持度(ΔAIC ≤ 3)的模型， 这些模型所包含的变量以黑色大圆点突出显示。图顶部的数字及灰白相间的垂直条带用于视觉区隔不同模型组。所有模型均将生长型作为解释变量纳入分析。(b)最优模型(ΔAIC ≤ 3)中解释变量的效应估计。图中展示了9个高支持度模型(模型编号130–152)中各变量的回归系数(对数风险比)及其95%置信区间: 红色为温度变量(左轴)，蓝色为降水变量(左轴)，黑色菱形为生长型(右轴)。当95%置信区间不与0 (灰色水平线)重叠时，认为效应在*P* = 0.05水平上具有统计学意义。对于气候变量，回归系数 > 0表示气候差异每增加1个单位，植株死亡风险相应增加；对于生长型，回归系数 < 0表示草本植物死亡风险低于木本植物。

Fig. 4　Comparison of mixed-effects Cox proportional hazards models for introduced plant survival in relation to climatic differences and growth form, and corresponding effect estimates. (a) Combinations of climatic variables included in each model. The ordinate shows six climatic difference variables: difference in mean annual temperature (Δmat), difference in minimum temperature of coldest month (Δmtcm), difference in maximum temperature of warmest month (Δmtwm), difference in annual precipitation (Δmap), difference in precipitation of driest month (Δpdm), difference in precipitation of wettest month (Δpwm). The abscissa shows all non-empty combinations of these variables. Gray dots indicate variable inclusion; vertical dotted lines mark models with the highest empirical support (ΔAIC ≤ 3), with variables in these models highlighted by large black dots. The numbers and alternating gray/white bands at the top serve as visual separators for model groups. All models included growth form as an explanatory variable in the analysis. (b) Effect estimates from the best-supported models (ΔAIC ≤ 3). Point estimates (red for temperature, blue down for precipitation, black diamonds for growth form) and 95% confidence intervals are shown for nine top-ranked models (Model IDs 130–152). Coefficients are log (hazard ratio); statistical significance at *P* = 0.05 is indicated when 95% confidence intervals do not overlap 0 (gray horizontal line). For climatic variables, regression coefficients > 0 indicate increased mortality risk per unit increase in climatic difference; for growth form, regression coefficients < 0 indicate lower mortality risk for herbal than for woody plants.

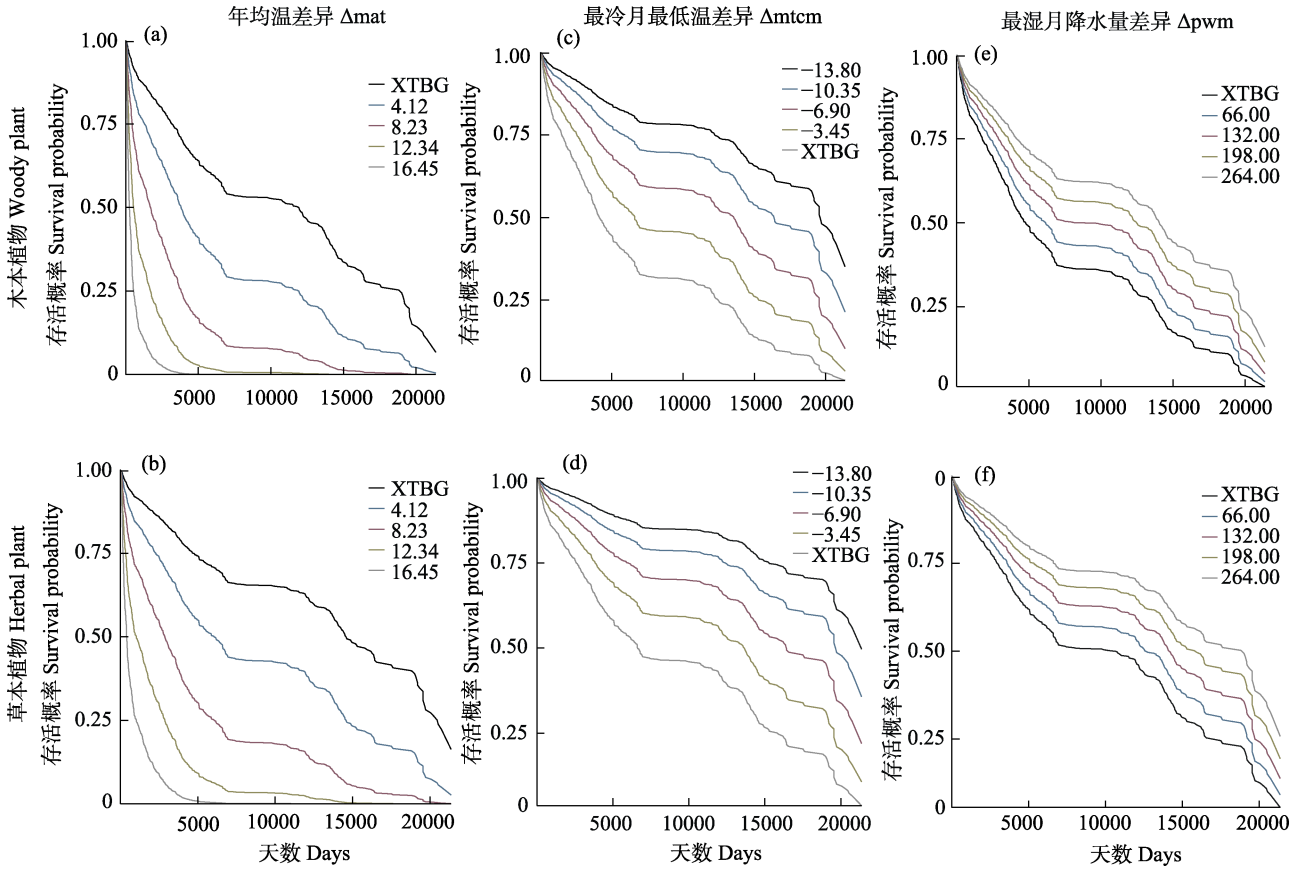


图5　基于具有最高经验支持的模型之一(ΔAIC = 0; 图3中的模型13, 图4中的模型139)解释气候变量对引种植物存活曲线的预测影响。该曲线将存活时间(横坐标)与植物在XTBG的存活概率(纵坐标)相关联。每幅图中, 标记为"XTBG"的曲线描述了物种分布地气候中位数与XTBG气候一致时的存活概率(即气候差异为0时的基线预测); 其余曲线分别对应该气候变量4个代表性取值下的存活状况: 该变量的最大观测差异值以及0与最大值之间3个等间距水平。存活曲线基于Nelson-Altschuler-Aalen风险估计器计算。图(a–b)显示年均温中位数差值(Δmat_M)的影响; 图(c–d)显示最冷月最低温中位数差值($\Delta mtcm_M$)的影响; 图(e–f)显示最湿月降水量中位数差值(Δpwm_M)的影响。

Fig. 5　Effects of varying climatic values on predicted introduced plant survival, according to one of the models with highest empirical support (ΔAIC = 0; Model 13 in Fig. 3, Model 139 in Fig. 4). The curves relate survival time (abscissa) to probability of plant survival at XTBG (ordinate). In each panel, the curve labeled "XTBG" describes the predicted survival when the median climate of the species distribution is identical to the climate of XTBG (i.e., the baseline prediction when climatic difference equals zero); other curves correspond to survival conditions at four representative values: the maximum observed difference, and three equally spaced intermediate levels between zero and the maximum. Survival curves are based on the Nelson-Altschuler-Aalen estimator of the hazards. Panels (a–b) show the effect of differences in median mean annual temperature (Δmat_M); panels (c–d) show the effect of differences in median minimum temperature of coldest month ($\Delta mtcm_M$); while panels (e–f) show the effect of differences in median precipitation of wettest month (Δpwm_M).

录12)。对应的风险比约为2.18, 表明草本植物在任何给定时间间隔内的死亡风险是木本植物的约2.18倍(即死亡风险增加约118%)。

4个最佳模型在引种植物存活与土壤变量之间的关联上呈现一致性, 均纳入表层有机碳含量差异, 其β具有统计学意义且数值接近(0.54–0.55), 表明该变量每增加1单位, 死亡风险增加71.14%–72.55% (HR为1.71–1.72) (图7, 图8, 附录12)。表层碎石体积百分比差异亦被纳入4个模型, 其回归系数具有统计学意义(介于–0.07至–0.05之间), 表明该变量每增加1单位, 死亡风险降低5.01%–6.74% (HR为0.93–0.95) (图7, 图8, 附录12)。相比之下, 表层沙含量差异和底层土壤容重虽被纳入部分模型, 但其回归系数均未达到统计学显著水平(图7, 附录12)。

4个具有最高经验支持的模型均基于物种独立随机效应结构, 其标准差估计值相近(σ为1.270–1.272) (附录13)。在控制固定效应后, 这一显著的种间差异表明, 即使来自相同种源地的植物, 其死亡

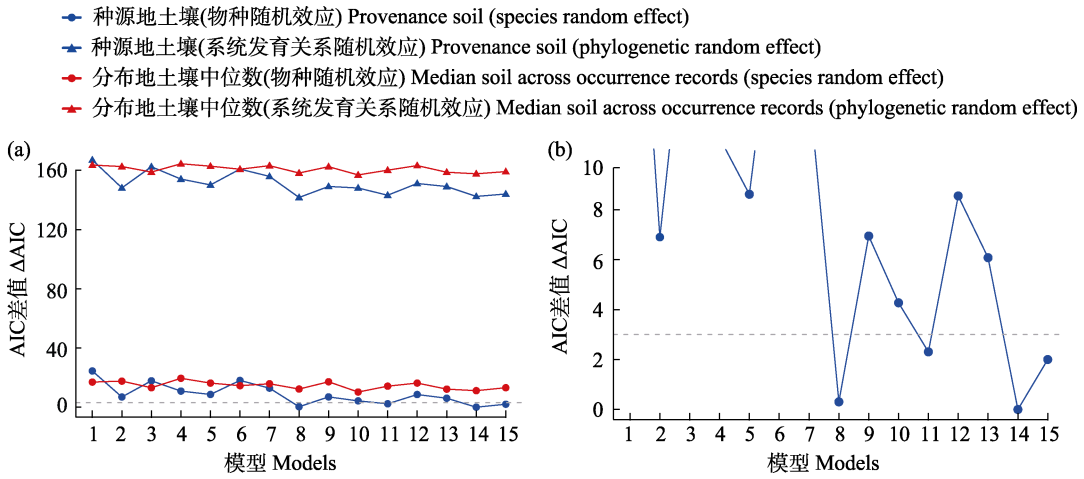


图6　土壤差异与生长型对引种植物存活影响的混合效应Cox比例风险模型比较。60个模型的经验支持度通过赤池信息准则差值(ΔAIC)衡量。模型通过两种方式量化了XTBG与植物物种分布地之间的土壤差异：XTBG与繁殖体采集地土壤条件的差异(标记为“种源地土壤”)和XTBG与物种所有分布点土壤中位数的差异(标记为“分布地土壤中位数”)。此外，模型通过物种独立随机效应(标记为“物种随机效应”)或基于系统发育关系的相关随机效应(标记为“系统发育关系随机效应”)来考虑数据的非独立性。横坐标表示候选模型编号(1–15)，纵坐标表示ΔAIC值。不同颜色和形状的符号代表不同土壤差异量化方法与随机效应类型的组合：蓝色圆形表示种源地土壤与物种独立随机效应，红色圆形表示分布地土壤中位数与物种独立随机效应；蓝色三角形表示种源地土壤与系统发育关系随机效应，红色三角形表示分布地土壤中位数与系统发育关系随机效应。图中的灰色虚线均表示ΔAIC = 3，用于界定经验支持度最高的模型(ΔAIC ≤ 3)。图(b)为图(a)纵坐标下半部分(0–10)的放大视图，突出展示具有最高经验支持度(ΔAIC ≤ 3)的模型。所有模型均将生长型作为解释变量纳入分析。

Fig. 6　Comparison of empirical support for mixed-effects Cox proportional hazards models relating introduced plant survival to soil differences and growth form. Empirical support for 60 models was measured as differences in the Akaike information criterion (ΔAIC). Models quantified soil differences between XTBG and species' wild distributions in two ways: difference from soil at provenances (labeled "Provenance soil") and difference from the median soil across occurrence records of a species (labeled "Median soil across occurrence records"). Additionally, models accounted for evolutionary relationships among plantings using uncorrelated species random effects (labeled "species random effect") or phylogenetically correlated species random effects (labeled "phylogenetic random effect"). The abscissa indicates candidate model numbers (1–15), and the ordinate indicates ΔAIC values. Blue circles represent provenance soil with uncorrelated species random effects (s), and red circles represent the median soil across occurrence records with uncorrelated species random effects (s); blue triangles represent provenance soil with phylogenetic random effect, and red triangles represent the median soil across occurrence records with phylogenetic random effect. Gray dashed lines in both panel (a) and panel (b) indicate ΔAIC = 3, serving as the threshold to identify models with highest empirical support (ΔAIC ≤ 3). Panel (b) Magnified view the lower part of the ordinate in panel (a) (0–10), highlighting the models with highest empirical support (ΔAIC ≤ 3). Growth form was included as an explanatory variable in all models.

风险仍因物种特性不同而存在较大差异。鉴于随机效应服从正态分布，约16%的物种其随机效应值将高于种间平均值1个标准差以上，对应死亡风险达到平均水平的3.56–3.57倍(HR = 3.56)或更高；反之，约16%的物种其随机效应值将低于平均值1个标准差以上，对应死亡风险降至平均水平的0.28倍(HR = 0.28)或更低。

3　讨论

本研究通过分别构建气候与土壤驱动的两类混合效应Cox比例风险模型，评估了版纳植物园植物引种存活的主要限制因子。在气候模型中，基于物种分布地气候中位数构建的模型具有最高的经验支持，年均温和最冷月最低温是主要的限制因子，而降水因子(年降水量、最干月降水量和最湿月降水量)虽对植物存活有影响，但其增量对死亡风险的降低不明显。土壤模型显示，种源地的土壤特征最具预测力，关键因子为表层有机碳含量和表层碎石体积百分比。此外，随机效应结构显示，在气候和土壤模型中，物种独立随机效应的经验支持均显著高于系统发育相关随机效应；同时，生长型对植物存活具有显著影响。

3.1　气候因子对引种植物存活的影响

基于物种分布地气候中位数的模型对版纳植物园引种植物的存活具有最高的经验支持，这与Thomas等(2022)在北温带密苏里植物园的研究结果

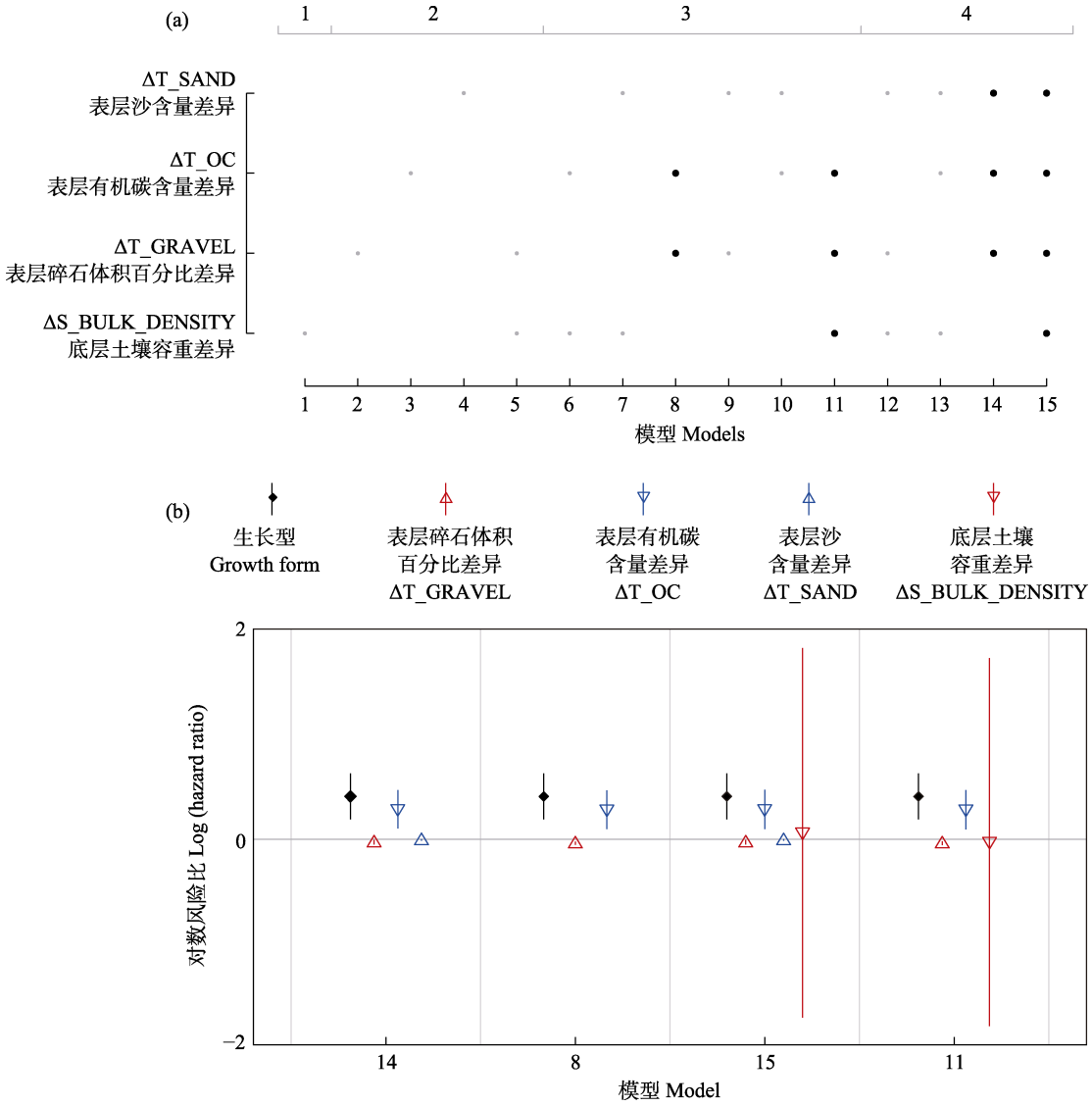


图7　土壤差异与生长型对引种植物存活影响的混合效应Cox比例风险模型比较与效应估计。(a)各模型包含的土壤变量组合。纵坐标为4个土壤差异变量：表层沙含量差异(ΔT_SAND)、表层有机碳含量差异(ΔT_OC)、表层碎石体积百分比差异(ΔT_GRAVEL)和底层土壤容重差异(ΔS_BULK_DENSITY)；横坐标为15个备选模型(编号1–15)，代表上述变量的所有可能组合。圆点表示变量纳入情况，黑色大圆点标识具有最强经验支持度的模型(ΔAIC ≤ 3，垂直虚线所示)中包含的变量。图(a)顶部的数字表示各模型纳入的土壤变量数量(1–4个)。所有模型均将生长型作为解释变量纳入。图(b)表示最高经验支持模型(ΔAIC ≤ 3)中各解释变量的效应估计。横坐标为模型编号(14、8、15、11)，纵坐标为对数风险比。图中以点估计值和95%置信区间(垂线)展示各变量的回归系数。当95%置信区间不与0线(灰色水平线)重叠时，效应具有统计学意义($P \le 0.05$)。土壤变量回归系数 > 0表示该土壤差异每增加1个单位，植株死亡风险增加；生长型回归系数 > 0表示草本植物的死亡风险高于木本植物。

Fig. 7　Comparison of mixed-effects Cox proportional hazards models for introduced plant survival in relation to soil differences and growth form, with effect estimates. (a) Combinations of soil variables included in each model. The ordinate (y-axis) displays four soil difference variables: difference in topsoil sand content (ΔT_SAND), difference in topsoil organic carbon content (ΔT_OC), difference in topsoil gravel content (ΔT GRAVEL), and difference in subsoil bulk density (ΔS BULK DENSITY); the abscissa (x-axis) shows 15 candidate models (numbered 1–15) representing all possible combinations of these variables. Dots indicate variable inclusion; large black dots mark variables present in models with the highest empirical support (ΔAIC ≤ 3, indicated by vertical dotted lines). Numbers at the top of panel (a) denote the number of soil variables included in each model (1–4). All models included growth form as an explanatory variable. (b) Effect estimates from the highest empirical support models (ΔAIC ≤ 3). The abscissa (x-axis) indicates model numbers (14, 8, 15, 11), and the ordinate (y-axis) represents the natural logarithm of the hazard ratio (log hazard ratio). Point estimates and 95% confidence intervals (vertical lines) show regression coefficients. Statistical significance ($P \le 0.05$) is indicated when confidence intervals do not overlap zero (gray horizontal line). regression coefficients > 0 for soil variables indicate increased mortality risk per unit increase in soil difference; for growth form, regression coefficients > 0 indicate higher mortality risk for herbal compared to woody plants.

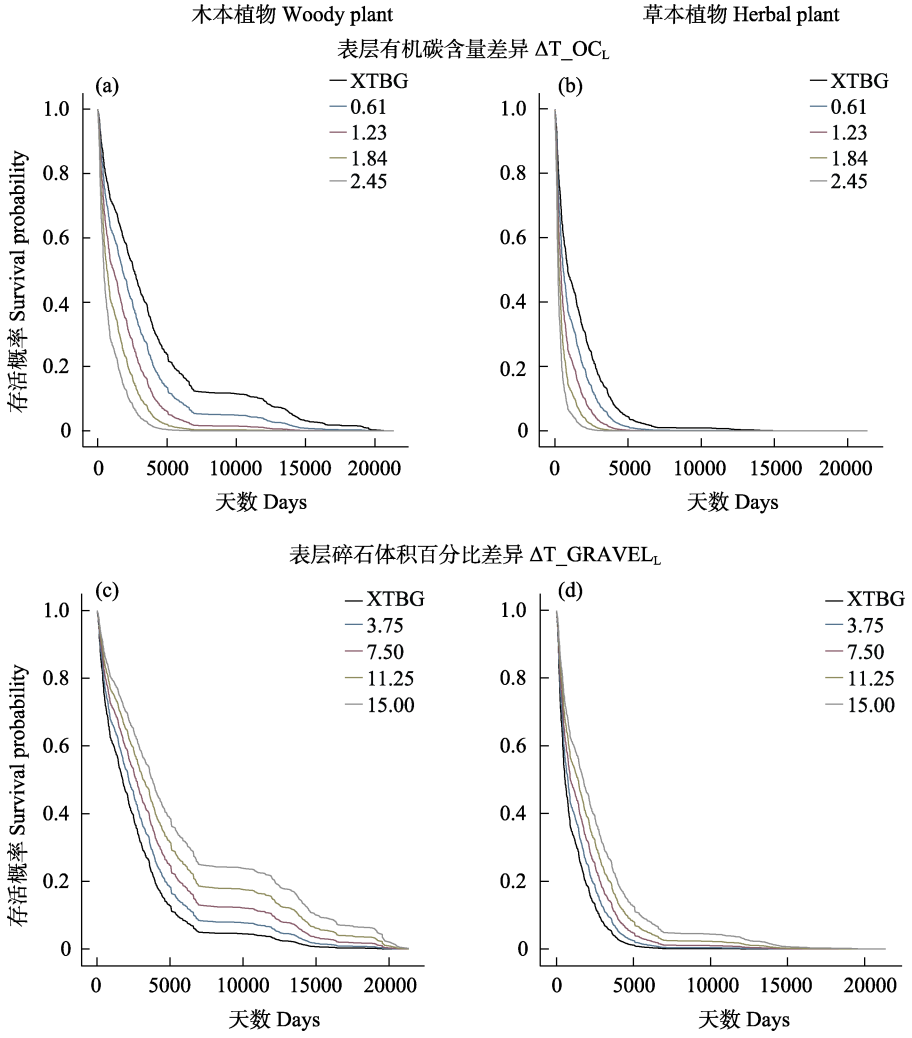


图8　基于具有最高经验支持度的土壤模型(图6中模型14)预测土壤变量对引种植物存活曲线的影响。图中显示存活概率(纵坐标)随存活天数(横坐标)的变化关系。左列为木本植物预测结果，右列为草本植物预测结果；(a–b)展示表层有机碳含量差异(ΔT_OC_L)的效应，(c–d)展示表层碎石体积百分比差异(ΔT_GRAVEL_L)的效应。每个小图中，标注为"XTBG"的曲线代表种源地与版纳植物园土壤条件无差异(差异值 = 0)的参照情景；其余4条曲线对应该土壤变量在0至最大观测差异范围内的4个等间距梯度水平(含最大值)。生存曲线基于Nelson-Aalen累积风险估计得出。

Fig. 8　Predicted effects of soil variable differences on introduced plant survival curves based on the model with the highest empirical support (Model 14 in Fig. 6). The panels display predicted survival probability (ordinate) over time since survival time (abscissa). The left column presents predictions for woody plants and the right column for herbal plants; the upper row (a–b) shows the effect of topsoil organic carbon content difference (ΔT_OC_L), and the lower row (c–d) shows the effect of topsoil gravel volume percentage difference (ΔT_GRAVEL_L). In each panel, the curve labeled "XTBG" represents the reference scenario with zero soil difference from XTBG; the other four curves correspond to four equally-spaced gradient levels of that soil variable across the range from 0 to the maximum observed difference (including the maximum). Survival curves were derived from Nelson-Aalen cumulative hazard estimates.

形成对比，他们发现基于种源地气候差异构建的模型表现更优。这种差异可能源于热带植物与温带植物在气候耐受策略上的根本不同。热带植物的生理耐受范围相对较窄，对温度偏离尤其敏感，因此，其生态位宽度相对有限，种内不同居群间的气候适应性分化可能较弱，导致引种植物的存活更依赖于栽培地气候与物种分布地整体气候条件的匹配，而非特定种源地的局地特征(Doughty & Goulden, 2008)。相比之下，温带植物表现出明显的局地适应格局(毛雪等, 2011; Barandun et al., 2025)。因此，在温带植物的迁地引种过程中，其存活更取决于栽培地气候条件与具体种源地气候之间的匹配程度，而

非物种分布地整体气候特征的平均水平。

与Thomas等(2022)在密苏里植物园的研究结果一致, 本研究同样发现最冷月最低温是制约引种植物存活的关键气候因子, 表明极端低温事件构成植物生存的临界胁迫。西双版纳地处热带北缘, 其热量条件接近热带雨林自然分布的气候极限(朱华等, 1999); 尽管复杂地形在一定程度上可削弱大尺度寒潮入侵, 但局地辐射冷却仍可使西双版纳出现1–3℃的低温极值, 这可能已接近多数典型热带植物的生理耐受阈值(张教林和曹坤芳, 2003)。尤其是热带植物长期处于年际波动较小的高温环境, 普遍缺乏对低温的系统性驯化能力, 其细胞膜结构、酶活性及光合器官功能在持续性低温下易受损, 进而死亡风险显著增加(张教林和曹坤芳, 2003)。这一评估结果与赵俊斌等(2010)关于低温对西双版纳引种植物生长具有显著负面影响的结论一致。因此, 最冷月最低温实际定义了引种植物在非周期性气候波动中的生存临界。然而, 与Thomas等(2022)在密苏里植物园的研究发现不同, 本研究未检测到最热月最高温对引种植物存活的显著限制效应。Thomas等(2022)发现, 最热月最高温是密苏里植物园引种植物的主要限制因子。相比之下, 版纳植物园虽地处热带, 但位于热带北缘, 其最热月最高温显著低于典型热带雨林核心区, 更远低于热带植物固有的生理耐受上限(赵俊斌等, 2009)。因此, 当热带植物引种至温度相对较低的热带北缘时, 最热月最高温尚未接近其保守的热耐受阈值, 不构成生理限制, 这与温带植物园中最热月最高温成为显著生存瓶颈的现象形成鲜明对比。

在气候驱动的模型中, 引种的多年生草本植物比木本植物具有更高的存活率, 这种差异源于二者在生长适应策略与资源配置方式上的分化。草本植物通常具有更强的表型可塑性, 能够通过调节萌发、开花及枯黄等物候节律, 缩短个体暴露于干旱或寒冷等不利条件下的时间(张建全等, 2014), 从而在气候波动加剧背景下维持居群稳定(Lin et al., 2025)。此外, 许多多年生草本植物依赖地下储藏器官(如鳞茎、球茎等)储存养分, 并在逆境条件下进入休眠状态, 待环境适宜时迅速恢复生长, 这种周期性的生长休眠策略有助于缓冲短期环境异常对个体生存的冲击。相比之下, 木本植物通常具有较长的生活史, 普遍缺乏灵活的物候调节与休眠对策, 在面临剧烈气候波动时适应能力较弱, 因而存活率较低(Volaire & Norton, 2006; Anderson, 2015; Lubbe et al., 2021)。

3.2 土壤因子对引种植物存活的影响

相对于宏观气候, 土壤理化性质具有更强的空间异质性与局域稳定性, 其对植物定植阶段的影响直接作用于根系环境、养分获取与微生物互作等过程(冯宇等, 2024)。本研究发现基于种源地土壤差异的模型经验支持显著高于基于分布地土壤中位数差异的模型, 揭示局域土壤适应性在热带植物引种中发挥着关键作用。土壤理化特性(如pH、有机质含量及微量元素浓度)在局域尺度上可发生显著变化, 促使植物通过微进化过程或表型可塑性形成相应的适应策略, 例如特化的根系结构、特定的菌根共生模式或差异化的养分吸收机制(赵学强等, 2023)。相比之下, 基于物种分布地土壤特征中位数构建的模型仅反映宏观平均水平, 难以捕捉植物在原生环境中对特定土壤条件形成的特异化适应。不同分布地的土壤条件差异在统计学层面上可能相互抵消, 从而掩盖了植物对局域土壤条件形成的适应特征, 降低了模型的预测能力。

模型结果表明, 土壤表层有机碳含量差异和碎石体积百分比差异是影响引种植物存活的关键因子。两者分别从养分供给与物理结构层面调控植物定植过程。土壤有机碳作为土壤肥力的核心指标, 通过多重途径调控引种植物的存活。首先, 土壤有机碳通过稳定土壤团聚体并优化孔隙结构提高土壤有效水容量, 从而缓解引种初期常见的水分胁迫(Mauget et al., 2021)。其次, 土壤有机碳含量的提高通常伴随土壤容重下降与机械阻力减弱, 有利于根系向深层与侧向扩展(Bharti, 2021), 鉴于根系建立受限是植物园引种失败的主要瓶颈, 这一土壤结构性改善具有重要价值。此外, 土壤有机碳作为土壤微生物群落的能量底物, 驱动着氮、磷等养分的矿化与循环, 维持植物养分供应的稳定性(Peng et al., 2025; Ren et al., 2025)。上述功能的有效发挥依赖于种源地与栽培地之间土壤有机碳水平的相对匹配。当两地差异较大时, 植物可能难以适应养分供应强度及微生物群落结构的改变, 从而增加死亡风险, 这为表层有机碳含量差异呈正向效应提供了解释。

与有机碳含量差异的正向效应不同, 表层碎石体积百分比差异表现出负向效应, 即偏离种源地土壤质地条件反而降低了死亡风险, 这一结果支持“中等质地优势” (intermediate texture advantage)的策略(Penksza et al., 2025), 即中等质地的壤土能优化水分并平衡通气, 较砂土和黏土两种极端质地更具适宜性, 反映出中等碎石含量土壤对热带植物迁地保护的重要性。版纳植物园的中等碎石含量土壤环境, 对两类极端质地来源的物种均表现出一定的适配性: 对来源于低碎石含量、黏质土壤的植物, 适度增加碎石比例可提升孔隙度与排水能力, 并降低紧实与缺氧风险; 而对来源于高碎石含量、粗质土壤的植物, 适度降低碎石比例则有助于增强持水与养分保持能力, 从而缓解干旱与养分限制胁迫(Penksza et al., 2025)。这种双向调节机制表明, 迁移至结构相对均衡的土壤环境, 有助于在孔隙通气性与水分保持能力之间实现配置优化, 为根系持续生长提供最稳定的基质条件。相比之下, 底层土壤容重差异和表层沙含量差异对植物存活的影响未表现出统计显著性, 提示这些因子的生态效应可能受引种物种特性与引种环境条件的调节而表现出较强的情景依赖性(吴建召等, 2020)。

土壤模型揭示, 木本植物在迁地保护中的存活率显著高于草本植物, 这一差异源于两种生长型在资源获取策略与胁迫耐受机制上的分化。木本植物通常遵循资源保守型策略, 具有发达的根系、厚实的根系组织密度以及较强的非结构性碳水化合物储备能力(El Omari, 2022; Xing et al., 2024)。这些结构与生理特征增强了其对环境波动的缓冲能力, 使其在土壤理化性质偏离最优范围(如有机碳含量波动、碎石质地相似)时, 仍能维持相对稳定的资源吸收与内环境稳态(Jhanji et al., 2025)。相比之下, 草本植物多采用快速资源获取型策略(Weigel et al., 2025), 表现为具有较高的比根长和较低的细根组织密度(Ma et al., 2018), 这种“低构建成本–快速回报”的性状组合虽然有利于在资源富集环境中迅速获取养分, 但会导致其对土壤理化性质偏离的较低耐受性(Reich, 2014; Wang et al., 2022)。当土壤理化条件(尤其是有机碳水平或质地结构)偏离其原生环境时, 草本植物由于根系组织脆弱、非结构性碳水化合物储备有限且周转率高, 缺乏足够的生理缓冲时间进行适应性调整, 极易因土壤条件偏离其狭窄的生态幅而导致定植失败(席璐璐等, 2021; Wang et al., 2022)。

3.3 随机效应结构与模型适用性

通过比较不同随机效应结构模型的表现发现, 在气候驱动模型与土壤驱动模型中, 引入物种独立随机效应显著提升了模型的解释能力, 而系统发育相关随机效应的增益有限。这与Thomas等(2022)的研究结论一致, 两者均表明引种存活差异主要由物种特异性(如独特的生理耐受阈值、差异化的生活史策略及对栽培管理措施的特异响应等)因素驱动, 而非基于系统发育亲缘关系代表的共性性状主导。尽管已有研究证实, 近缘物种可能因亲缘关系较近共享相似的环境耐受性(Doughty & Goulden, 2008), 但在进化过程中, 为降低种间竞争, 近缘物种也可能发生生态位分化, 从而在生态适应性上产生差异。因此, 亲缘关系并不必然意味着生态功能或环境响应的一致性。本研究结果表明, 在迁地保护实践中, 引种物种间的存活差异主要由物种特异性因素主导, 具体包括物种自身的遗传背景、对病虫害的敏感性以及对园艺管理措施需求的差异。

在物种组成层面, 本研究所涵盖的1,232个物种中包含了56种受威胁类群(CR、EN或VU)以及大量非受威胁常见植物, 较为真实地反映了植物园迁地保护中常见与稀有类群并存的现实场景(附录14)。在控制环境差异和生长型后, 未观察到受威胁物种与非受威胁物种在随机物种效应上的显著差异(附录15), 这与Vincent等(2020)在瑞士植物园的研究结论一致, 即在控制气候差异后, 物种分布范围(广布或狭域)本身并不必然决定其在迁地环境中的存活表现, 环境匹配程度可能是更为直接的决定因素。因此, 基于广布种构建的生态模型在理论上能够为稀有或受威胁物种提供可靠的适应性评估参考。未来若能进一步将受威胁类群潜在的随机效应偏差纳入模型校正, 有望提高模型在稀有濒危类群中的预测精度, 从而为其迁地保护提供更加稳健的理论支持。

本研究通过分别构建气候与土壤驱动的混合效应Cox比例风险模型, 发现分布地气候中位数与种源地土壤环境决定了热带植物园引种植物的存活, 其中年均温和最冷月最低温是决定引种植物存

活的主要气候因子, 表层有机碳含量和碎石体积百分比是关键的土壤因子。随机效应结构比较表明物种独立随机效应均优于系统发育相关随机效应。基于上述评估结果, 建议热带植物园迁地保护实践中应以物种分布地气候中位数为依据, 优先选择年均温和最冷月最低温匹配度高的物种, 对低温敏感的木本植物应加强风险评估与防护; 同时, 应依据种源地土壤特征优化定植, 重点匹配表层土壤有机碳含量, 适度调整碎石含量以平衡通气与持水, 对草本植物需严格执行土壤差异化管理。此外, 应基于物种特异性性状进行独立评估, 避免单纯依赖系统发育关系进行引种与扩繁。

致谢: 感谢中国科学院西双版纳热带植物园的前辈们在过去60多年里对引种植物的收集、保育与数据整理工作。感谢陈雯妍、毛雅萌等同仁在实验过程中提供的真诚帮助与宝贵支持。特别感谢责任编委和两位匿名审稿专家提出的宝贵修改意见。实验数据的获取得到了中国科学院西双版纳热带植物园园林园艺中心吴福川老师及其他老师的大力支持, 在此表示感谢。

ORCID

周丽芳 https://orcid.org/0009-0006-4161-3569
慈秀芹 https://orcid.org/0000-0002-2748-3562
陈筠灵 https://orcid.org/0009-0005-3893-8461
李捷 https://orcid.org/0000-0001-8067-749X

参考文献

Abeli T, Dalrymple S, Godefroid S, Mondoni A, Müller JV, Rossi G, Orsenigo S (2020) *Ex situ* collections and their potential for the restoration of extinct plants. Conservation Biology, 34, 303–313.

Anderson JV (2015) Advances in Plant Dormancy. Springer, Cham, Switzerland.

Barandun M, Paz A, van Tiel N, van den Hoogen J, Pellissier L, Crowther TW, Maynard DS (2025) Global patterns in plant environmental breadths. Ecography, 2025, e07637.

Bharti K (2021) Crop residues and their impact on crop production: A review. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 8, 613–618.

Briscoe Runquist RD, Gorton AJ, Yoder JB, Deacon NJ, Grossman JJ, Kothari S, Lyons MP, Sheth SN, Tiffin P, Moeller DA (2020) Context dependence of local adaptation to abiotic and biotic environments: A quantitative and qualitative synthesis. The American Naturalist, 195, 412–431.

Burnham KP, Anderson DR (2002) Model Selection and Multimodel Inference: A practical information-theoretic approach. Springer, New York.

Cayuela L, Granzow-de la Cerda Í, Albuquerque FS, Golicher DJ (2012) Taxonstand: An R package for species names standardisation in vegetation databases. Methods in Ecology and Evolution, 3, 1078–1083.

Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. Science Advances, 1, e1400253.

Chen PQ, Xue YG (2024) Relationship between functional characteristics of herbs and soil physical and chemical factors in Dashiwei Tiankeng Group, Guangxi. Seed Science and Technology, 42(12), 154–157. (in Chinese with English abstract) [陈佩琦, 薛跃规 (2024) 广西大石围天坑群草本植物功能性状与土壤理化因子的关系. 种子科技, 42(12), 154–157.]

Deng B, Wang XF, Liao J (2024) Ecophysiological responses of herbaceous and woody plants to environmental stresses in the riparian zone of Three Gorges Reservoir: A meta-analysis. Chinese Journal of Plant Ecology, 48, 623–637. (in Chinese with English abstract) [邓蓓, 王晓锋, 廖君 (2024) 环境胁迫影响三峡库区消落带草本和木本植物生理生态特征的meta分析. 植物生态学报, 48, 623–637.]

Doughty CE, Goulden ML (2008) Are tropical forests near a high temperature threshold? Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 113, 2007JG000632.

Drake JM, Wares JP, Byers JE, Anderson JT (2025) Two hypotheses about climate change and species distributions. Ecology Letters, 28, e70134.

El Omari B (2022) Accumulation versus storage of total non-structural carbohydrates in woody plants. Trees, 36, 869–881.

Fan ZF, Kabrick JM, Shifley SR (2006) Classification and regression tree based survival analysis in oak-dominated forests of Missouri's Ozark Highlands. Canadian Journal of Forest Research, 36, 1740–1748.

Feng C, Zhang J, Huang HW (2023) *Parallel situ* conservation: A new plant conservation strategy to integrate *in situ* and *ex situ* conservation of plants. Biodiversity Science, 31, 23184. (in Chinese with English abstract) [冯晨, 张洁, 黄宏文 (2023) 统筹植物就地保护与迁地保护的解决方案: 植物并地保护(*parallel situ* conservation). 生物多样性, 31, 23184.]

Feng Y, Wang YQ, Li YK, Han L, Wang HZ (2024) Relationship between leaf functional traits of *Populus euphratica* and soil factors. Acta Ecologica Sinica, 44, 1717–1726. (in Chinese with English abstract) [冯宇, 王雨晴, 李沅楷, 韩路, 王海珍 (2024) 胡杨叶功能性状与土壤因子的关系. 生态学报, 44, 1717–1726.]

Fick SE, Hijmans RJ (2017) WorldClim 2: New 1-km spatial

resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37, 4302–4315.

Harrell FE (2015) Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis. Springer, Cham, Switzerland.

Hijmans RJ (2025) *raster*: Geographic Data Analysis and Modeling. https://CRAN.R-project.org/package=raster. (accessed on 2025-04-12)

Jin Y, Qian H (2019) V.PhyloMaker: An R package that can generate very large phylogenies for vascular plants. Ecography, 42, 1353–1359.

Jhanji S, Chumber M, Kaur G, Kaur R, Goyal E, Dhingra M (2025) Nutrient driven stress resilience: Mechanisms of nutrient uptake, sensing and signaling in plants. Plant Physiology and Biochemistry, 229, 110456.

Küpper FC, Kamenos NA (2018) The future of marine biodiversity and marine ecosystem functioning in UK coastal and territorial waters (including UK Overseas Territories) with an emphasis on marine macrophyte communities. Botanica Marina, 61, 521–535.

Lee-Yaw JA, Kharouba HM, Bontrager M, Mahony C, Csergő AM, Noreen AME, Li Q, Schuster R, Angert AL (2016) A synthesis of transplant experiments and ecological niche models suggests that range limits are often niche limits. Ecology Letters, 19, 710–722.

Li CM (2020) Mortality model of *Larix olgensis-Abies nephrolepis-Picea jazoensis* mixed stands based on Cox proportional hazard function and mixed effect model. Forest Research, 33(3), 92–98. (in Chinese with English abstract) [李春明 (2020) 基于Cox比例风险函数及混合效应的落叶松云冷杉混交林林木枯损模型研究. 林业科学研究, 33(3), 92–98.]

Li WT, Migliavacca M, Forkel M, Denissen JMC, Reichstein M, Yang H, Duveiller G, Weber U, Orth R (2022) Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. Nature Communications, 13, 3959.

Lin YW, Xie T, Shan RX, Li XR (2025) Non-linear responses of life-history strategies to warming in arid desert herbaceous plants. Ecological Indicators, 176, 113742.

Liu MX, Liang GL (2016) Research progress on leaf mass per area. Chinese Journal of Plant Ecology, 40, 847–860. (in Chinese with English abstract) [刘明秀, 梁国鲁 (2016) 植物比叶质量研究进展. 植物生态学报, 40, 847–860.]

Lubbe FC, Klimešová J, Henry HAL (2021) Winter belowground: Changing winters and the perennating organs of herbaceous plants. Functional Ecology, 35, 1627–1639.

Ma Z, Guo D, Xu X, Lu M, Bardgett RD, Eissenstat DM, McCormack ML, Hedin LO (2018) Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. Nature, 555, 94–99.

Mao X, Jiang HC, Yang GF, Xu HY (2011) Preliminary study on spatial and temporal characteristics of palaeoclimate evolution in China during the last deglaciation. Quaternary Sciences, 31, 57–65. (in Chinese with English abstract) [毛雪, 蒋汉朝, 杨桂芳, 徐红艳 (2011) 我国末次冰消期古气候时空演化特征初探. 第四纪研究, 31, 57–65.]

Mauget SA, Himanshu SK, Goebel TS, Ale S, Lascano RJ, Gitz DC III (2021) Soil and soil organic carbon effects on simulated Southern High Plains dryland cotton production. Soil and Tillage Research, 212, 105040.

Moore DF (2016) Applied Survival Analysis Using R. Springer, Cham, Switzerland.

Nievola CC, Carvalho CP, Carvalho V, Rodrigues E (2017) Rapid responses of plants to temperature changes. Temperature, 4, 371–405.

Passioura JB (2002) Soil conditions and plant growth. Plant, Cell & Environment, 25, 311–318.

Peng N, Wang Y, Wu HF, Hao HJ, Sailike A, Yu ZC, Li SC, Shi RH, Hao WF, Zhang W (2025) Phosphorus cycling dominates microbial regulation of synergistic carbon, nitrogen, and phosphorus gene dynamics during *Robinia pseudoacacia* restoration on the Loess Plateau. Agronomy, 15, 797.

Penksza K, Szabó-Szöllősi T, Sipos L, Szentes S, Saláta-Falusi E, Takács A, Boros N, Sebők A, Dálnoki BA, Fuchs M, Micheli E, Gulyás M, Penksza P, Pintér O, Wagenhoffer Z, Kende Z, Csízi I, Tuba G, Zsembeli J (2025) Which soil type is optimal for *Festuca wagneri*, a species of the pannonian region adapted to drought? Land, 14, 2405.

Reich PB (2014) The world-wide 'fast–slow' plant economics spectrum: A traits manifesto. Journal of Ecology, 102, 275–301.

Ren XY, Cai LQ, Wu J, Ahmad MK, Haider FU (2025) Dynamics of soil organic carbon mineralization under straw addition: Evidence from a controlled incubation experiment. Agronomy, 15, 2642.

Rosenblad KC, Perret DL, Sax DF (2019) Niche syndromes reveal climate-driven extinction threat to island endemic conifers. Nature Climate Change, 9, 627–631.

Sáenz-Romero C, Mendoza-Maya E, Gómez-Pineda E, Blanco-García A, Endara-Agramont AR, Lindig-Cisneros R, López-Upton J, Trejo-Ramírez O, Wehenkel C, Cibrián-Tovar D, Flores-López C, Plascencia-González A, Vargas-Hernández JJ (2020) Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for *ex situ* conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. Canadian Journal of Forest Research, 50, 843–854.

Shi FX, Zhao CZ, Ren H, Zhou W, Gao FY, Sheng YP, Li LL (2012) Plant functional types and their impact environmental factors in a naturally recovered poplar-birch woodland on the north slope of Qilian Mountains, China. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 18, 546–552. (in Chinese with English abstract) [石福习, 赵成

章, 任珩, 周伟, 高福元, 盛亚萍, 李丽丽 (2012) 祁连山北坡自然恢复杨桦林地植物功能型组成及其影响因素. 应用与环境生物学报, 18, 546–552.]

Smith SA, Donoghue MJ (2008) Rates of molecular evolution are linked to life history in flowering plants. Science, 322, 86–89.

Therneau TM (2024) Coxme: Mixed Effects Cox Models. https://cran.r-project.org/web/packages/coxme/index.html. (accessed on 2025-06-20)

Therneau TM, Grambsch PM (2000) The Cox model. In: Modeling Survival Data: Extending the Cox Model (eds Dietz K, Gail M, Krickeberg K, Samet J, Tsiatis A), pp. 39–77. Springer, New York.

Thomas G, Sucher R, Wyatt A, Jiménez I (2022) *Ex situ* species conservation: Predicting plant survival in botanic gardens based on climatic provenance. Biological Conservation, 265, 109410.

Vincent H, Bornand CN, Kempel A, Fischer M (2020) Rare species perform worse than widespread species under changed climate. Biological Conservation, 246, 108586.

Volaire F, Norton M (2006) Summer dormancy in perennial temperate grasses. Annals of Botany, 98, 927–933.

Wang N, Zhao MM, Li Q, Liu X, Song HJ, Peng XQ, Wang H, Yang N, Fan PX, Wang RQ, Du N (2020) Effects of defoliation modalities on plant growth, leaf traits, and carbohydrate allocation in *Amorpha fruticosa* L. and *Robinia pseudoacacia* L. seedlings. Annals of Forest Science, 77, 53.

Wang TT, Huang L, Zhang X, Wang M, Tan DY (2022) Root morphology and biomass allocation of 50 annual ephemeral species in relation to two soil conditions. Plants, 11, 2495.

Weigel R, Werner A, Würzberg L, Zembold K, Angulo K, Bach W, Hémonnet-Dal C, Nähring T, Hiebenga M, Muffler L (2025) Root and shoot traits of two common herbs respond differently to drought and fertilization in a multifactorial global change experiment. Plant and Soil, 514, 2975–2990.

Woodall CW, Grambsch PL, Thomas W (2005) Applying survival analysis to a large-scale forest inventory for assessment of tree mortality in Minnesota. Ecological Modelling, 189, 199–208.

Woodward FI (1987) Climate and Plant Distribution. Cambridge University Press, Cambridge.

Wu JZ, Sun F, Cui Y, He JW, Liu Y, Li J, Lin YM, Wang DJ (2020) Relationship between vegetation biomass and soil bulk density on unstable slopes in different climatic regions: A case study of Jiangjiagou Watershed in Dongchuan District of Kunming City, Yunnan Province of southwestern China. Journal of Beijing Forestry University, 42(3), 24–35. (in Chinese with English abstract) [吴建召, 孙凡, 崔羽, 贺静雯, 刘颖, 李键, 林勇明, 王道杰 (2020) 不同气候区失稳性坡面植被生物量与土壤密度的关系——以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为例. 北京林业大学学报, 42(3), 24–35.]

Xi LL, Gou QQ, Wang GH, Song B (2021) The responses of typical annual herbaceous plants to drought stress in a desert-oasis ecotone. Acta Ecologica Sinica, 41, 5425–5434. (in Chinese with English abstract) [席璐璐, 缑倩倩, 王国华, 宋冰 (2021) 荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应. 生态学报, 41, 5425–5434.]

Xing YJ, Chen MH, Dao JC, Lin LX, Chen CY, Chen YL, Wang ZT (2024) Fine-root morphology of woody and herbaceous plants responds differently to altered precipitation: A meta-analysis. Forest Ecology and Management, 552, 121570.

Xu LM, Cao Y, Tang SW, Lu YH, Luo SS, Ma YS (2020) Effects of drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Arundo donax* var. *versicolor*. Science of Soil and Water Conservation, 18(3), 59–66. (in Chinese with English abstract) [许令明, 曹昀, 汤思文, 陆远鸿, 罗姗姗, 马银山 (2020) 干旱胁迫及复水对花叶芦竹生理特性的影响. 中国水土保持科学(中英文), 18(3), 59–66.]

Yang ZB, Tao JC, Huang ZY, Zong SX, Hao RM (2000) *Ex situ* conservation of rare and endangered plants of subtropical distribution in China. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 24(S1), 43–46. (in Chinese with English abstract) [杨志斌, 陶金川, 黄致远, 宗世贤, 郝日明 (2000) 中国亚热带稀有濒危活植物的迁地保育. 南京林业大学学报(自然科学版), 24(S1), 43–46.]

Zhang JL, Cao KF (2003) The effects of night chilling on chlorophyll fluorescence in seedlings of two tropical rain forest tree species. Journal of Wuhan Botanical Research, 21, 356–360. (in Chinese with English abstract) [张教林, 曹坤芳 (2003) 夜间低温对2种热带雨林树种幼苗叶绿素荧光的影响. 武汉植物学研究, 21, 356–360.]

Zhang JQ, Zhang JY, Wang YR, Han TW (2014) Adaptability of introduced species for improvement of degraded alpine grassland in Gannan areas, China. Pratacultural Science, 31, 744–753. (in Chinese with English abstract) [张建全, 张吉宇, 王彦荣, 韩天文 (2014) 高寒草甸退化草地引种适应性. 草业科学, 31, 744–753.]

Zhang XP, Luo ZR, Li X, Chen J, Wan LX (2016) Evaluation on the adaptability of the introduction of 36 species of rare and endangered plants. Journal of Green Science and Technology, (15), 33–35, 37. (in Chinese with English abstract) [张学平, 罗昭润, 李鑫, 陈杰, 万利鑫 (2016) 36种珍稀濒危植物引种适应性评价. 绿色科技, (15), 33–35, 37.]

Zhang Z, Wang SJ, Chen MK, Cao R, Li SH (2019) Temporal characteristics of soil N_2O emission of different succession stages in Xishuangbanna tropical forests. Ecology and Environment Sciences, 28, 702–708. (in Chinese with English abstract) [张哲, 王邵军, 陈闽昆, 曹润, 李少辉 (2019) 西双版纳不同演替阶段热带森林土壤N_2O排放的时间特征. 生态环境学报, 28, 702–708.]

Zhao DD, Ma HY, Li Y, Wei JP, Wang ZC (2019) Effects of water and nutrient additions on functional traits and aboveground biomass of *Leymus chinensis*. Chinese Journal of Plant Ecology, 43, 501–511. (in Chinese with English abstract) [赵丹丹, 马红媛, 李阳, 魏继平, 王志春 (2019) 水分和养分添加对羊草功能性状和地上生物量的影响. 植物生态学报, 43, 501–511.]

Zhao JB, Zhang YP, Song FQ, Xu ZF, Xiao YL (2009) A comparison of the phenological characteristics of introduced plant species in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. Bulletin of Botany, 44, 464–472. (in Chinese with English abstract) [赵俊斌, 张一平, 宋富强, 许再富, 肖云来 (2009) 西双版纳热带植物园引种植物物候特征比较. 植物学报, 44, 464–472.]

Zhao JB, Zhang YP, Song FQ, Xu ZF, Xiao LY (2010) Spring phenology of introduced species in response to extreme chilliness in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. Bulletin of Botany, 45, 435–443. (in Chinese with English abstract) [赵俊斌, 张一平, 宋富强, 许再富, 肖来云 (2010) 引种保护植物对西双版纳极端冷年的春季物候响应. 植物学报, 45, 435–443.]

Zhao XQ, Pan XZ, Ma HY, Dong XY, Che J, Wang C, Shi Y, Liu KL, Shen RF (2023) Scientific issues and strategies of acid soil use in China. Acta Pedologica Sinica, 60, 1248–1263. (in Chinese with English abstract) [赵学强, 潘贤章, 马海艺, 董晓英, 车景, 王超, 时玉, 柳开楼, 沈仁芳 (2023) 中国酸性土壤利用的科学问题与策略. 土壤学报, 60, 1248–1263.]

Zheng ZM, Kong LL, He Y (2025) TCN-GRU model with SMA-IQR and attention mechanism for ultra-short term wind power prediction. Journal of Yunnan University of Nationalities (Natural Sciences Edition), 34, 480–486. (in Chinese with English abstract) [郑哲明, 孔玲玲, 何印 (2025) 引入SMA-IQR和注意力机制的TCN-GRU模型超短期风电功率预测. 云南民族大学学报(自然科学版), 34, 480–486.]

Zhou YH, Liu H, Zhang SK, Liu FY, Liu N (2023) Adaptation strategies of 29 species to tropical coral islands based on leaf anatomical traits. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 31, 747–756. (in Chinese with English abstract) [周雨珩, 刘慧, 张世柯, 刘芳延, 刘楠 (2023) 基于叶片解剖性状探究29种植物对热带珊瑚岛的适应策略. 热带亚热带植物学报, 31, 747–756.]

Zhu H, Wang H, Li BG, Xu ZF (1999) The urgency of protection for tropical vegetation and its diversity in Xishuangbanna. Tropical Plant Research, (44), 1–10. (in Chinese) [朱华, 王洪, 李保贵, 许再富 (1999) 西双版纳热带植被及其多样性保护的迫切性. 热带植物研究, (44), 1–10.]

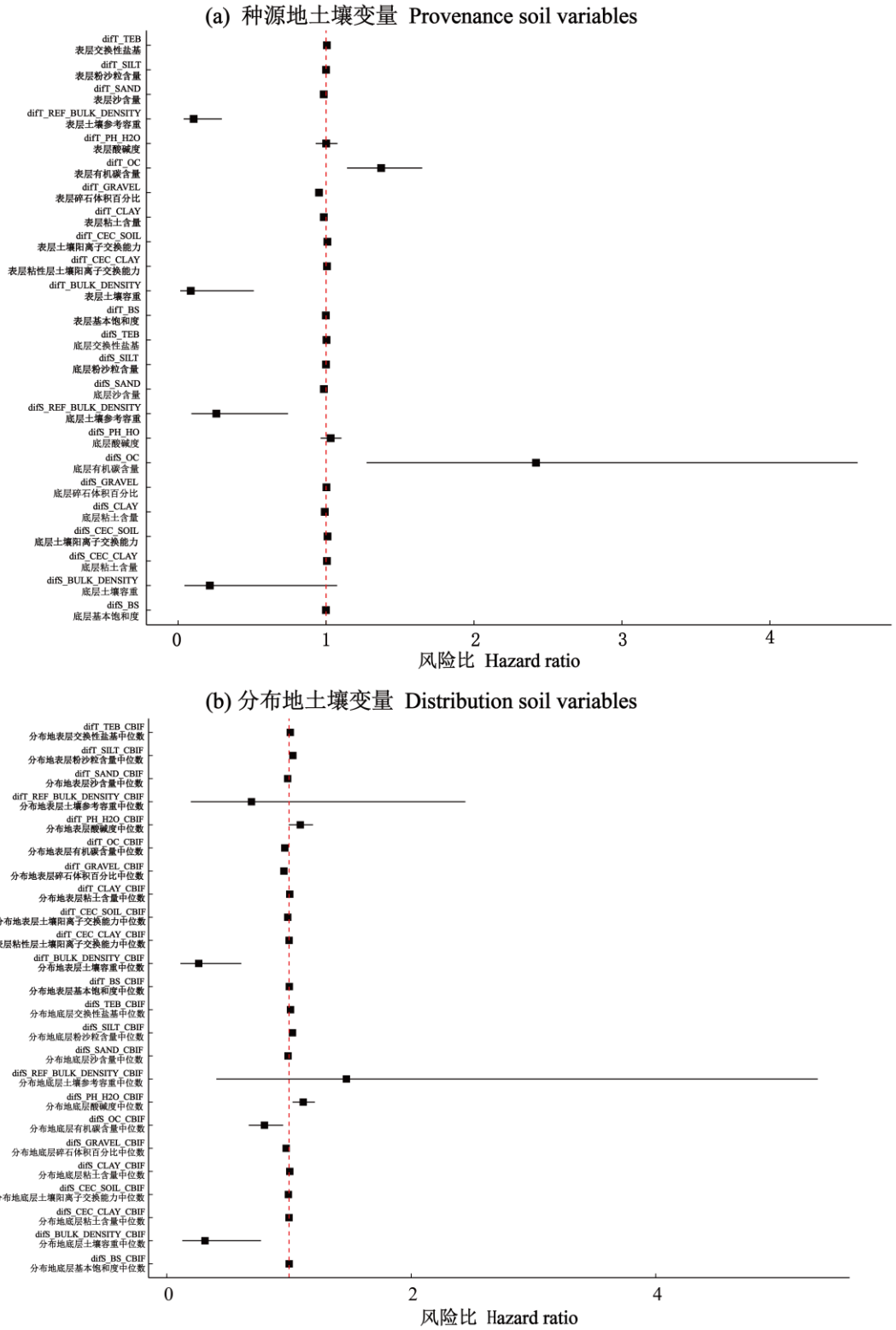
Zhu H (2007) On the classification of forest vegetation in Xishuangbanna, Southern Yunnan. Acta Bontanica Yunnanica, 29, 377–387. (in Chinese with English abstract) [朱华 (2007) 论滇南西双版纳的森林植被分类. 云南植物研究, 29, 377–387.]

Zizka A, Silvestro D, Andermann T, Azevedo J, Duarte Ritter C, Edler D, Farooq H, Herdean A, Ariza M, Scharn R, Svantesson S, Wengström N, Zizka V, Antonelli A (2019) CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. Methods in Ecology and Evolution, 10, 744–751.

(责任编委: 华方圆　责任编辑: 黄祥忠)

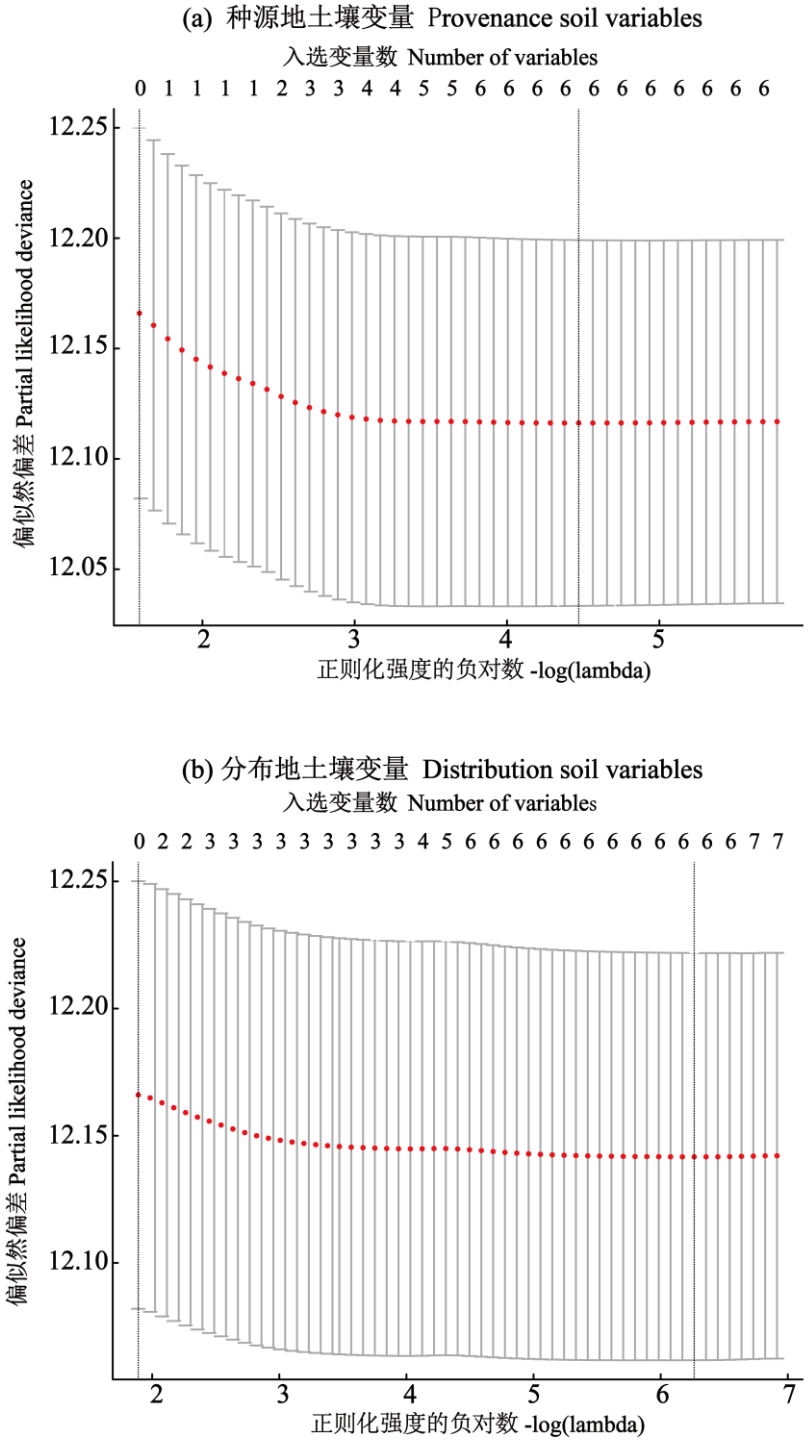
附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025482



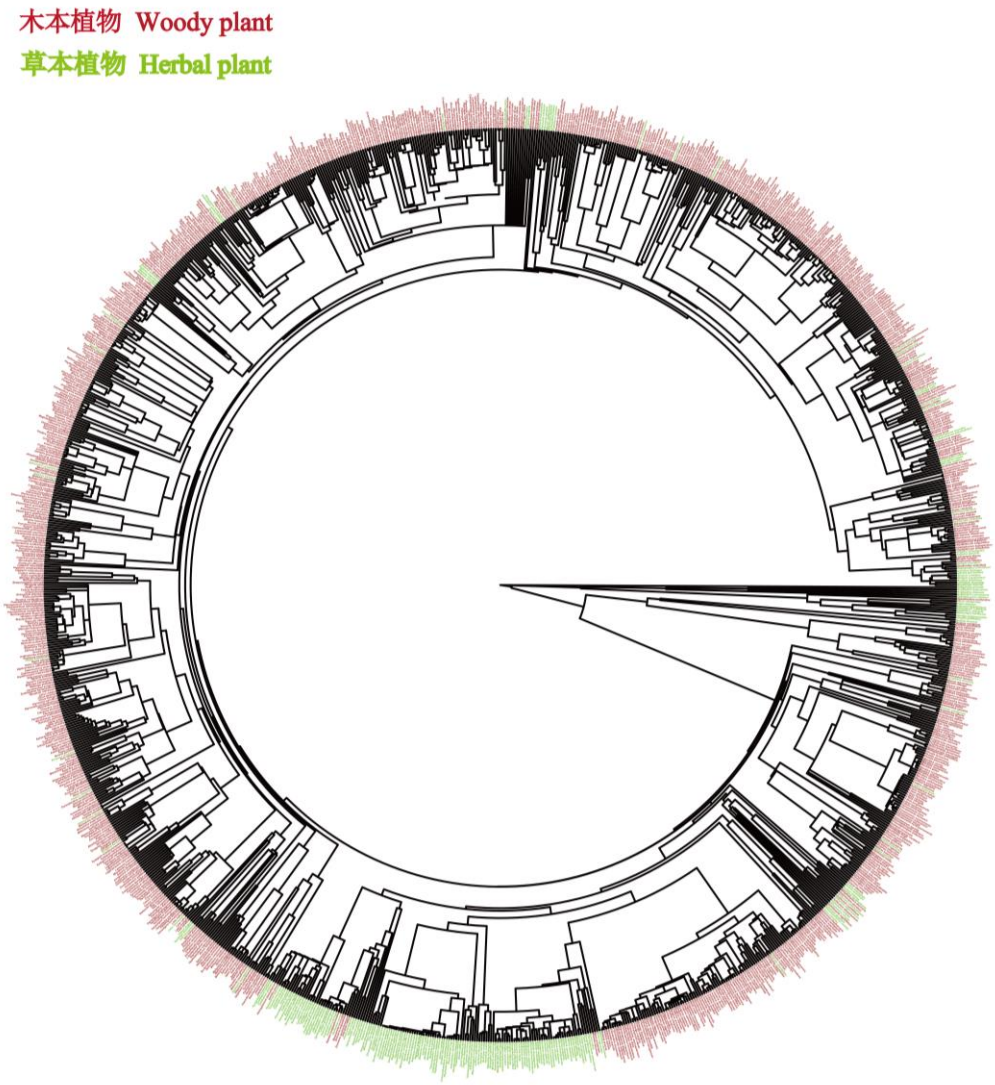
附录3　单因素Cox回归分析评估土壤变量对引种植物存活风险的影响。方形图标表示风险比(hazard ratio, HR)的点估计值，穿过该图标的黑色水平实线表示95%置信区间。红色垂直虚线表示HR = 1 (无效应线)。若变量的95%置信区间未覆盖无效应线，则该变量对存活风险的效应具有统计学意义($P < 0.1$)。

Appendix 3　Univariate Cox regression analysis evaluating the effects of soil variables on the survival risk of introduced plants. The square icons represent the point estimates of the hazard ratio (HR), and the black horizontal solid lines passing through them indicate the 95% confidence intervals. The red vertical dashed line indicates HR = 1 (the line of no effect). Variables whose 95% confidence intervals do not overlap with the line of no effect indicate statistically significant effects on survival risk ($P < 0.1$).



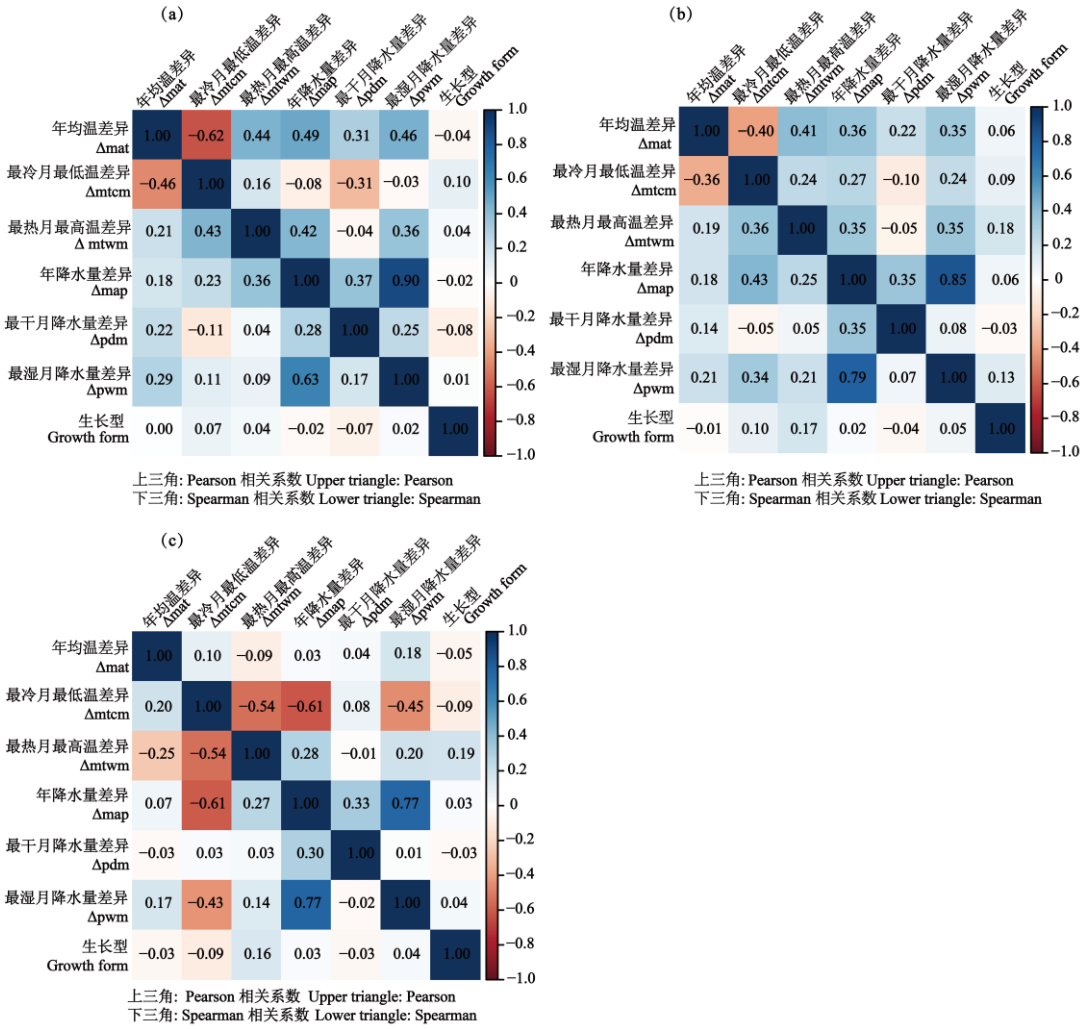
附录4　LASSO Cox回归交叉验证误差曲线用于土壤变量选择。图中黑色垂直虚线表示基于最小准则(左虚线)和1 – SE准则(右虚线)确定的最优正则化参数。红色点表示各log(lambda)取值下10折交叉验证的偏似然偏差均值，上下灰色误差线表示标准误(± SE)。横坐标上方数字表示对应正则化强度下纳入模型的非零系数变量个数(入选变量数)。

Appendix 4　LASSO Cox regression cross-validation error curves for soil variable selection. The vertical black dotted lines indicate the optimal regularization parameters determined by the minimum criterion (left, lambda.min) and the 1 – SE criterion (right, lambda.1se). Red dots represent the mean partial likelihood deviance from 10-fold cross-validation at each –log(lambda) value, with gray error bars indicating ±1 SE. Numbers above the abscissa indicate the count of variables with non-zero coefficients (selected variables) included in the model at the corresponding regularization strength.



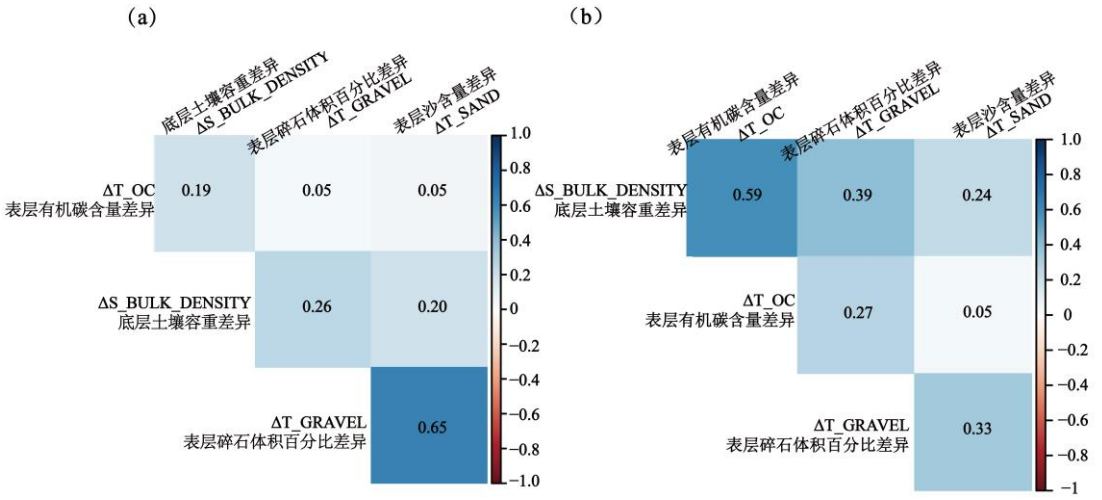
附录5　研究物种在维管植物系统发育树的映射。基于R软件包V.PhyloMaker构建的1,232个研究物种的系统发育树(环形展示)。

Appendix 5　Mapping of study species onto the Vascular Plant Phylogeny. The circular phylogenetic tree of 1,232 study species was constructed using the R package V.PhyloMaker.



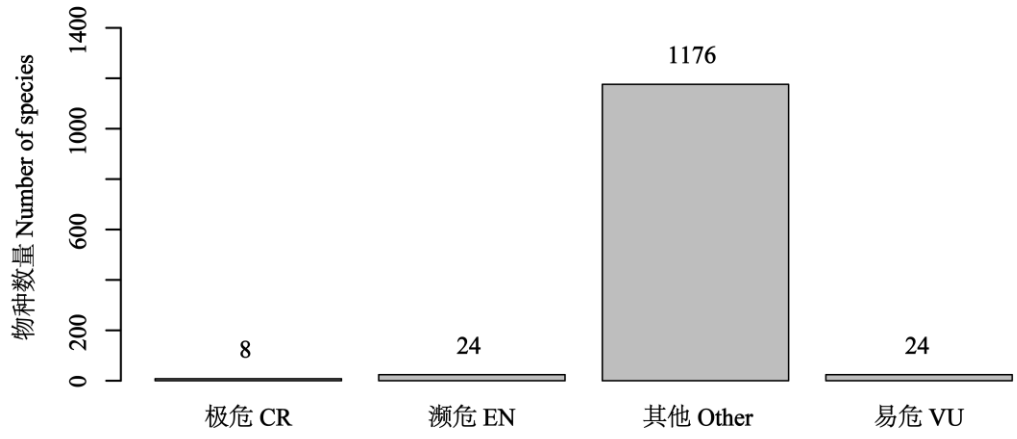
附录6 气候差异变量与植物生长型的相关性分析。在任一**Cox**模型中，解释变量之间的相关性导致的共线性均不构成问题。无论采用何种方法来衡量中国科学院西双版纳热带植物园**(XTBG)**与物种自然分布地之间的气候差异，即**(a)**种源地与**XTBG**之间的气候差异；**(b)**分布地气候中位数与**XTBG**之间的气候差异；**(c)**极端气候的比例，解释变量之间的相关性均较低。解释变量包括生长型以及**6**个气候差异变量：年均温差异**(Δmat)**、最冷月最低温差异**(Δmtcm)**、最热月最高温差异**(Δmtwm)**、年降水量差异**(Δmap)**、最干月降水量差异**(Δpdm)**和最湿月降水量差异**(Δpwm)**。除生长型为二分类变量外，其余解释变量均为连续型变量。各图的矩阵上三角显示**Pearson**相关系数，下三角显示**Spearman**相关系数。色阶深浅表示相关系数大小，蓝色和红色分别表示正与负相关。

Appendix 6 Correlation analysis of climatic difference variables and plant growth forms. Collinearity due to correlation between explanatory variables was not an issue in any of the Cox models. Correlation was low between explanatory variables, regardless of the approach to measure climate differences between Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (XTBG) and the wild distribution of species: (a) Climate differences between provenances and XTBG; (b) Climate differences between the median climate across occurrence records and XTBG ; (c) Proportion of extreme climate. Explanatory variables included growth form and six climatic difference variables: difference in annual mean temperature (Δmat), difference in minimum temperature of the coldest month (Δmtcm), difference in maximum temperature of the warmest month (Δmtwm), difference in annual precipitation (Δmap), difference in precipitation of the driest month (Δpdm), difference in precipitation of the wettest month (Δpwm). All explanatory variables are continuous except growth form which is binary. Upper triangles display Pearson correlation coefficients; lower triangles display Spearman correlation coefficients. Color intensity indicates correlation strength, with blue and red denoting positive and negative correlations.

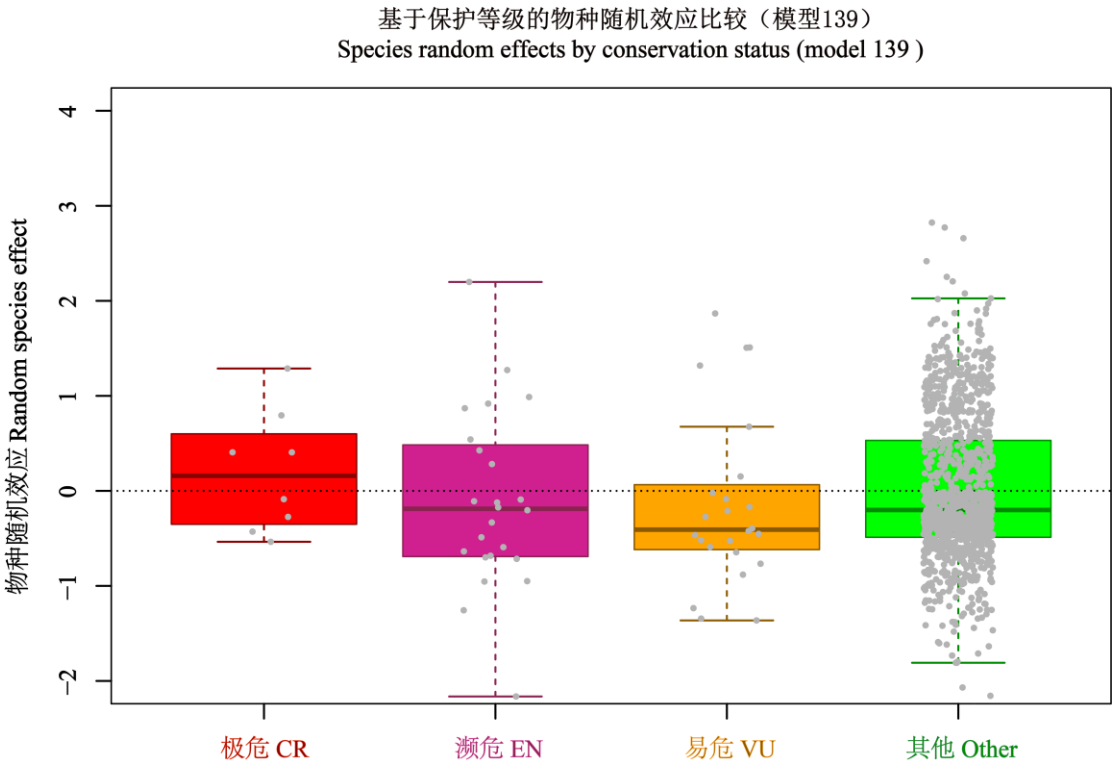


附录7　土壤差异变量与生长型的相关性分析。(a)种源地与中国科学院西双版纳热带植物园(XTBG)之间的土壤差异; (b)物种分布地土壤中位数与XTBG之间的土壤差异。矩阵显示Pearson相关系数。色阶深浅表示相关系数大小，蓝色和红色分别表示正负相关。

Appendix 7　Correlation analysis of soil difference variables and growth form. (a) Soil differences between provenances and Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (XTBG); (b) Soil differences between the median soil across occurrence records and XTBG. Matrices display Pearson correlation coefficients. Color intensity indicates correlation strength, with blue and red denoting positive and negative correlations, respectively.



附录14　物种在保护状况等级中的分布。保护状况等级基于《IUCN濒危物种红色名录》(2024)。
Appendix 14　Distribution of species among conservation status categories. Conservation status categories are based on The IUCN Red List of Threatened Species (2024).



附录15　基于最高经验支持度模型之一(模型139)比较受威胁与未受威胁物种类群的随机效应。“其他”类别包括尚未评估的物种类群，以及经评估后未被列为全球性灭绝威胁的物种类群。对于每个保护等级，箱线图显示中位数(水平线)、四分位距(箱体)以及延伸至不超过1.5倍四分位距的须线。灰点表示各物种的随机效应值，均经抖动处理以避免重叠。对于极危和濒危类别，物种数量较少(分别为8和24)。我们采用不假设方差齐性的*t*检验，检验未受威胁(“其他”类别)与受威胁物种类群间随机效应的差异。受威胁类群包括极危、濒危和易危。结果显示，两组差异无统计学意义(*t* = −0.698, *df* = 58.99, *P* = 0.488)。

Appendix 15　Comparison of species random effects between threatened and not threatened species taxa, based on one of the models with highest empirical support (Model 139). The ordinate shows species random effects for four threat categories on the abscissa: Critically Endangered (CR), Endangered (EN), Vulnerable (VU), and Other. The latter category includes species taxa that have not been evaluated as well as evaluated species taxa that are not listed as threatened with extinction in a global assessment. For each threat category, boxplots show the median (horizontal line), inter-quantile range (box), and whiskers extending to data points no more than 1.5 times the inter-quartile range. Gray dots show the random effect values for individual species, all of which are jittered to avoid overlap. In the case of the CR and EN categories, there are relatively few species taxa (n = 8 and 24, respectively). We performed a t-test, without assuming equality of variances, to examine differences in species random effects between not threatened (the “Other” category) and threatened species taxa. Threatened taxa included CR, EN, and VU species taxa. We found no significant difference between these two groups (t = −0.698, df = 58.99, P = 0.488).

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25433, pages 1–13
doi: 10.17520/biods.2025433
cstr: 32101.14.biods.2025433

•研究报告•

藏东南黑麝及其同域有蹄类物种的生态适应性差异

王倩倩[1], 陈孝国[3], 朱锐丰[7], 张明春[1], 王新[5], 李世林[5], 仁增江措[6], 彭武[8], 杨彪[2,4*]

1. 中国大熊猫保护研究中心大熊猫国家林业和草原局重点实验室, 成都 610057; 2. 西华师范大学, 四川南充 637002; 3. 西南林业大学, 昆明 650224; 4. 北京市企业家环保基金会, 北京 100020; 5. 四川省动物学会, 成都 610065; 6. 格当乡公益林专业管护站, 西藏林芝 860718; 7. 成都爱思益生态保护中心, 成都 610000; 8. 成都道微生物科技有限公司, 成都 610095

摘要: 黑麝(*Moschus fuscus*)被列为IUCN红色名录濒危等级和中国国家一级重点保护野生动物。然而, 当前研究多限于对其分类学、形态学以及部分地区的分布调查。掌握同域有蹄类的分布情况及其活动节律, 有助于理解它们的生态位关系和共存机制。本研究基于2023年4月至2025年6月在藏东南墨脱县格当区域布设的169台红外相机所收集的数据, 对黑麝及其同域有蹄类物种进行了系统研究。结果显示, 6种有蹄类物种的独立有效探测次数为3,255次, 其中黑麝的独立探测次数为202次, 相对多度指数较低(RAI = 3.38)。黑麝在> 3,500 m的高海拔区域的独立探测次数最高, 占其总独立探测次数的70.30%; 相比之下, 喜马拉雅鬣羚(*Capricornis thar*)与喜马拉雅扭角羚(*Budorcas taxicolor*)对高海拔和低海拔生境具有广幅利用, 而赤斑羚(*Naemorhedus baileyi*)、贡山麂(*Muntiacus gongshanensis*)与野猪(*Sus scrofa*)则偏好中低海拔生境, 这些物种的海拔利用模式体现出“垂直分层”的生境生态位分化机制。季节性活动模式显示, 黑麝冬季的活动频率较高, 并在1月达到峰值。同时, 该物种在春、秋、冬3季的活动最低环境温度阈值、各季节活动的最高环境温度和全年平均环境温度均为同域有蹄类中最低, 体现了其对高寒生境的生态适应性。此外, 黑麝表现出显著的夜行性特征, 其夜行性指数高达0.98。日活动节律分析显示, 黑麝从傍晚17:00开始活动, 且活动频次呈上升趋势, 至凌晨3:00达到最高峰; 而在白天10:00–16:00几乎无黑麝活动记录。黑麝与其同域有蹄类物种之间的日活动节律均存在显著分化, 尤其是与昼行性的野猪, 其活动重叠指数仅0.140。本研究基于大量野外实地调查, 首次系统揭示了黑麝种群“高海拔 + 极夜行”的生境选择和活动节律等生态特征, 为该物种野生种群与藏东南珍稀濒危野生动物的保护管理以及后续研究提供了重要的科学依据。

关键词: 黑麝; 有蹄类; 藏东南; 活动节律; 红外相机; 野生动物保护

王倩倩, 陈孝国, 朱锐丰, 张明春, 王新, 李世林, 仁增江措, 彭武, 杨彪 (2026) 藏东南黑麝及其同域有蹄类物种的生态适应性差异. 生物多样性, 34, 25433. doi: 10.17520/biods.2025433; cstr: 32101.14.biods.2025433.
Wang QQ, Chen XG, Zhu RF, Zhang MC, Wang X, Li SL, Renzeng JC, Peng W, Yang B (2026) Ecological adaptation differences of the black musk deer and sympatric ungulates in southeastern Xizang. Biodiversity Science, 34, 25433. doi: 10.17520/biods.2025433; cstr: 32101.14.biods.2025433.

Ecological adaptation differences of the black musk deer and sympatric ungulates in southeastern Xizang

Qianqian Wang[1], Xiaoguo Chen[3], Ruifeng Zhu[7], Mingchun Zhang[1], Xin Wang[5], Shilin Li[5], Jiangcuo Renzeng[6], Wu Peng[8], Biao Yang[2,4*]

1 *Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on the Giant Panda, China Conservation and Research Center for the Giant Panda, Chengdu 610057, China*
2 *China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China*
3 *Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*
4 *Society of Entrepreneurs and Ecology (SEE) Foundation, Beijing 100020, China*
5 *Sichuan Zoological Society, Chengdu 610065, China*
6 *Gedang Public Welfare Forest Professional Management and Protection Station, Linzhi, Xizang 860718, China*
7 *Chengdu Aisiyi Ecology Conservation Center, Chengdu 610000, China*
8 *Chengdu Daowei Biotechnology Co., Ltd, Chengdu 610095, China*

收稿日期 Received: 2025-10-31; 接受日期 Accepted: 2026-02-10
基金项目: 蚂蚁森林墨脱格当保护地项目 Supported by the Ant Forest of Medog Gedang Conservation Area Project
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yangb315@163.com

ABSTRACT

Aims: The black musk deer (*Moschus fuscus*) is listed as an endangered (EN) species on the IUCN Red List of Threatened Species and is classified as a first-class National Key Protected Wildlife in China. However, prior research has predominantly focused on its taxonomy, morphology, and localized distribution surveys. Understanding the distribution and activity rhythms of sympatric ungulates can help elucidate their niche relationships and coexistence mechanisms.

Methods: Data were collected from 169 camera traps deployed in Gedang, Medog, southeastern Xizang from April 2023 to June 2025, which systematically monitored the black musk deer and its sympatric ungulate species.

Results: The results revealed that among the six ungulate species, there were a total of 3,255 independent detections, with the black musk deer detected 202 times, indicating a relatively low relative abundance index (RAI = 3.38). The black musk deer was primarily detected at high elevations > 3,500 m, accounting for 70.30% of its total independent detections. In contrast, other ungulate species exhibited different elevation preferences. Himalayan serow (*Capricornis thar*) and Himalayan takin (*Budorcas taxicolor*) exhibited wide elevational ranges across high- and low-elevation habitats, whereas red goral (*Naemorhedus baileyi*), Gongshan muntjac (*Muntiacus gongshanensis*) and wild boar (*Sus scrofa*) preferred mid- to low-elevation habitats. The distribution pattern of these species reflects a "vertical stratification" mechanism of habitat-niche partitioning. Seasonal activity patterns revealed that the black musk deer had a higher activity frequency in winter, peaking in January. Meanwhile, the species displayed the lowest minimum ambient temperature threshold for activity among sympatric ungulates across spring, autumn and winter, and its upper and mean ambient temperatures during activity in all seasons were also the lowest recorded among these species, underscoring its adaptation to alpine-cold environments. Additionally, the black musk deer exhibited a strongly nocturnal activity pattern, with a night-time relative abundance index (NRAI) as high as 0.98. Daily activity rhythm analysis revealed that the black musk deer became active at 17:00 in the evening, with activity frequency increasing until it peaked at 3:00 in the early morning; during the daytime from 10:00 to 16:00, virtually no activity was recorded. There was significant differentiation in the daily activity rhythms between the black musk deer and its sympatric ungulate species, especially with the diurnal wild boar, with an activity overlap index of only 0.140.

Conclusion: Based on extensive field surveys, this study provided the first detailed insights into the "high elevation + extremely nocturnal" pattern of habitat selection and activity rhythms of the black musk deer population, offering an important scientific basis for the conservation and management of the wild population of this species and other rare and endangered wild animals in southeastern Xizang, as well as for subsequent research.

Key words: *Moschus fuscus*; ungulates; southeastern Xizang; activity rhythm; camera trap; wildlife conservation

麝科动物隶属于偶蹄类, 是一类中小型食草动物, 其历史分布范围主要集中在亚洲地区。基于分子系统学和形态学特征的研究, 目前将中国麝科动物分类为6种, 分别为林麝(*Moschus berezovskii*)、马麝(*M. chrysogaster*)、原麝(*M. moschiferus*)、喜马拉雅麝(*M. leucogaster*)、安徽麝(*M. anhuiensis*)和黑麝(*M. fuscus*) (李华杰, 2021; 刘少英等, 2022; 油志远, 2023[①]; Chen et al., 2025)。黑麝最初由我国学者在高黎贡山和碧罗雪山考察时发现并命名, 其特征为全身毛色黑褐, 体色异常深暗, 颈侧、喉部和体背完全无斑, 与当时已知的其他麝种存在显著差异(高耀亭, 1963; 李致祥等, 1981)。目前, 黑麝已被列入世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)濒危物种红色名录的濒危(EN)等级和我国国家一级重点保护野生动物(刘少英等, 2022; IUCN, 2025; 魏辅文等, 2025)。

同域物种的时空生态位分化能够揭示其对环境和气候的适应策略, 对野生动物的存活、觅食和配偶发现等都具有重要意义(陈立军等, 2019; Veldhuis et al., 2020; 邹启先等, 2021; 陈尔骏等, 2022)。例如, 油志远(2023)[①]研究发现, 在四川贡嘎山国家级自然保护区, 林麝和马麝的栖息地高度重叠, 但两者的活动时间存在显著差异: 林麝倾向于夜间活动, 而马麝则在白天更为活跃。这种时间上的分化, 结合两者较低的种群数量和充足的食物资源, 共同促进了它们在保护区的长期稳定共存。然而, 由于缺乏系统的调研, 目前对黑麝栖息地和活动情况等方面的研究极少, 且现有描述可能存在不准确性。墨脱县位于藏东南地区, 喜马拉雅山脉东段南坡, 是全球生物多样性保护热点地区之一(温

① 油志远 (2023) 贡嘎山国家级自然保护区林麝和马麝时空分布格局重叠性关系研究. 硕士学位论文, 西南民族大学, 成都.

立嘉等, 2014; 吴建普等, 2016; 翁仕洋等, 2022)。该地区地形复杂、海拔落差大、气候多样, 分布着从热带季雨林到高山冰缘植被的完整山地垂直植被带谱, 为黑麝及其他珍稀野生动物的生存繁衍提供了多样化的栖息地(孙航和周浙昆, 1996; 史湘莹等, 2023; Wang et al., 2024)。然而, 目前对于该区域珍稀有蹄类动物生态习性等的研究仍存在诸多空白, 亟待进一步加强。

红外相机作为一种无人值守的非伤害性野生动物观测设备, 能够有效调查行踪诡秘、夜行性、警惕性高的野生动物, 尤其适用于分析物种的行为及活动时间等生态特征(肖治术等, 2014; 李晟等, 2020)。近年来, 随着红外相机技术的广泛应用, 黑麝的分布范围得到了一定程度的揭示。现有记录显示, 黑麝在中国的分布范围主要包括西藏东南部、云南高黎贡山和四川贡嘎山, 而在国外的分布则涵盖缅甸、尼泊尔和不丹(史湘莹等, 2023; Wang et al., 2024; 陈星等, 2025; 李军杰等, 2025)。然而, 目前针对黑麝的研究主要集中在分类学、形态学以及部分地区的分布调查上, 对其生态习性方面的研究仍较为匮乏(章敬旗等, 2004; 彭红元等, 2010)。

鉴于此, 为探究藏东南山地的黑麝如何通过垂直生境选择与时间生态位分化来适应与同域有蹄类的共存, 本研究利用红外相机对墨脱县格当乡地区的野生动物进行了长期监测, 旨在系统揭示藏东南黑麝的栖息地分布及活动节律等生态习性, 并与同域分布的有蹄类动物的生态适应性进行对比分析。基于前期初步观测, 我们假设黑麝已演化出"高海拔 + 高夜行性指数"的双重生态位压缩策略。通过评估黑麝与同域有蹄类的生态位宽度和重叠情况, 以期为黑麝的保护管理提供重要参考, 为藏东南地区有蹄类动物的生态学研究提供理论支持, 推动该区域生物多样性保护工作的深入开展, 并为制定针对性的保护策略提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

藏东南山地的墨脱县是雅鲁藏布江进入印度阿萨姆平原前在中国境内流经的最后一个县。本研究区域为墨脱县的格当区域, 全境处于雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区内, 总面积超过2,000 km^2, 海拔范围1,327–6,315 m, 其中海拔4,000 m以上的山脉多为全年积雪覆盖(图1)。该地区降水充沛, 尤其在6–8月间降水集中。其独特的生态环境孕育了丰富的植被类型, 涵盖亚热带和热带地区山地的针叶林、亚热带常绿阔叶林、针阔混交林、灌丛和高山植被等。同时, 该区域也为多种野生有蹄类物种提供了栖息地, 包括喜马拉雅鬣羚(*Capricornis*

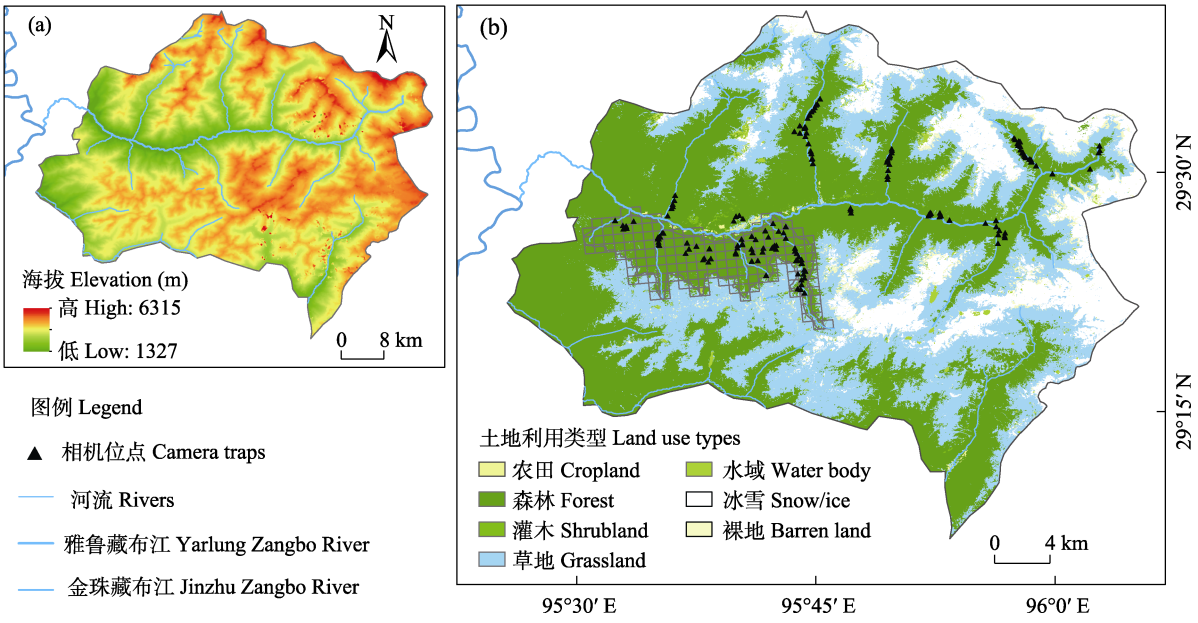


图1 藏东南墨脱县的研究区域位置和红外相机布设位点。(a)海拔范围; (b)土地利用类型。
Fig. 1 Study area and camera trap sites in Medog, southeastern Xizang. (a) Elevation range; (b) Land use types.

thar)、喜马拉雅扭角羚(*Budorcas taxicolor*)、赤斑羚(*Naemorhedus baileyi*)、贡山麂(*Muntiacus gongshanensis*)、野猪(*Sus scrofa*)和黑麝(史湘莹等, 2023; Wang et al., 2024, 2025)。

1.2 红外相机布设

2023年4月至2025年6月, 我们在藏东南格当区域的不同生境中布设了169台红外相机(型号主要为中野云护M660, 因自然损坏或丢失后补装了20台优威UVS2), 调查位点覆盖的海拔范围为1,798–3,654 m。红外相机的布设主要采用网格布设法, 利用ArcGIS 10.8软件将大面积区域划分为1 km × 1 km的网格, 每个网格布设1–2台相机; 在狭长区域, 则结合随机型和一字型布设方法(图1)。红外相机参数设置为24 h, 灵敏度调至"中", 拍照模式设定为"拍照 + 视频", 每次触发后连拍3张照片并录制一段20 s视频, 拍摄间隔设定为30 s。

红外相机的布设位点优先选择在兽径、水源地、动物粪便等动物活动痕迹较多处。安装时, 将相机直接捆绑在合适的树干上, 确保拍摄区域中心正对监测目标可能出现的位置, 并避开阳光直射、背光、遮挡物等可能影响拍摄效果的因素。安装后进行测试拍摄, 并详细记录每一台相机的布设信息, 包括相机编号、安装日期、GPS信息(经度、纬度、海拔)以及其他小生境信息(如地形、植被、动物痕迹等)。为确保相机正常运行, 每隔3–5个月更换一次电池和数据储存卡(肖治术等, 2014)。

1.3 数据处理与分析

数据卡回收后, 对收集的影像资料(照片和视频)进行仔细查看, 并对数据进行物种识别与统计(附录1, 附录2)。使用Bio-Photo V2.1软件自动提取文件编号、文件格式、拍摄时间和相机工作日等信息, 并生成相应的Excel表格。在物种鉴定过程中, 对于同一相机位点拍摄的影像资料, 以不同个体或群体的有效照片作为其独立有效探测; 若同一相机位点在30 min内连续拍摄到同一物种的影像, 则仅将其计为1次独立有效探测(O'Brien et al., 2003)。此外, 将同一位点的红外相机在野外连续工作24 h定义为1个相机日。在Excel表格中系统记录每张影像中的物种名称、数量、性别及行为等信息, 并同步录入拍摄时的环境温度, 以分析不同有蹄类动物的活动强度与温度的关系。

1.3.1 相对多度指数

基于每1,000个相机日所捕获的独立有效探测数计算物种的相对多度指数(relative abundance index, RAI)。根据研究区域的海拔升高所导致的气候条件和植被类型的变化, 以300 m为海拔梯度间隔, 将布设有红外相机的海拔范围划分为7个海拔段[①]。此外, 为比较有蹄类物种活动的季节性变化, 依据当地气候特征, 将一年划分为春季(3–5月)、夏季(6–8月)、秋季(9–11月)和冬季(12–翌年2月), 并分别计算不同季节的相对多度指数(seasonal relative abundance index, SRAI)和月相对多度指数(monthly relative abundance index, MRAI)。计算公式如下:

$$\mathrm{RAI}=\frac{A_i}{N}\times 1000 \tag{1}$$

$$\mathrm{SRAI}=\frac{S_{ij}}{N}\times 1000 \tag{2}$$

$$\mathrm{MRAI}=\frac{T_{ij}}{N}\times 1000 \tag{3}$$

其中, A_i表示第i种物种(i = 1, …, 6)的独立探测次数; S_{ij}代表物种i在第j个季节(j为春、夏、秋、冬)的独立探测次数; T_{ij}代表物种i在第j个月(j = 1, …, 12)的独立探测次数; N表示这些物种的总相机日(王志祥等, 2024; 庞大鹏等, 2025)。利用卡方拟合优度检验探究不同海拔及不同季节的物种活动分布的独立探测次数是否具有差异性。

1.3.2 夜行性分析

根据研究区域不同季节的平均日出日落时间, 本研究将19:00至次日7:00作为夜行性分析的时间段。不同物种的夜行性指数(night-time relative abundance index, NRAI)通过其在夜间时间段的相对多度指数进行分析(Azlan & Sharma, 2006):

$$\mathrm{NRAI}=\frac{D_i}{N_i}\times 100\% \tag{4}$$

其中, D_i代表第i种物种在夜间时间段的独立有效探测数, N_i代表第i种物种的独立有效探测总数。若某物种的NRAI值接近13/24 (约0.54), 表明此物种的夜行性不明显; 当NRAI > 0.54时, 表明此物种属于夜行性物种; 当NRAI < 0.54时, 则表明此物种为昼行性物种(李平等, 2021)。

① 裴枭鑫 (2023) 墨脱非飞行小型兽类多样性垂直分布格局及其形成机制. 硕士学位论文, 安徽师范大学, 安徽芜湖.

1.3.3 活动节律

采用核密度估计(kernel density estimation)法分析有蹄类物种的日活动节律。该方法假设目标物种的每次探测是从24 h周期性连续的日活动节律分布中采集的随机样本, 该分布描述了物种在特定时间段内被探测到的概率(Ridout & Linkie, 2009)。物种间活动节律的重叠程度通过日活动重叠系数(coefficient of overlapping, Δ)进行分析。Δ值介于0–1之间, 越接近1, 表明两者活动节律的重叠程度越高。重叠系数预测值取决于成对样本中较小的样本数: 当较小样本数少于50个记录时, Δ1预测值较为准确; 而当两样本数均大于75时, Δ4预测值表现更优。核密度函数公式如下:

$$f(x,v)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K_v[d(x,x_i)] \quad (5)$$

其中, K_v表示von Mises分布的概率密度函数, $d(x, x_i)$用于衡量任一点与样本i之间的角度距离。以上分析在R 4.3.3中进行, 使用overlap包和activity包完成分析与作图(Meredith & Ridout, 2014; Rowcliffe, 2016)。利用activity中的Wald Test进行概率检验, 以分析两组数据差异的显著性, 循环检测设定比较1,000次(陈立军等, 2019)。

2 结果

红外相机累计有效调查59,815个相机日, 获得6种有蹄类物种的有效影像资料22,015份, 独立探测次数3,255次(表1)。在所有相机位点中, 仅有13台相机拍摄到黑麝踪迹。黑麝通常单独活动, 仅有1次独立探测拍摄到2只一起活动的影像。从相对多度指数来看, 黑麝(RAI = 3.38)仅略高于野猪(RAI = 1.39), 贡山麂的最高(RAI = 19.56), 其次是喜马拉雅鬣羚(RAI = 16.50)、赤斑羚(RAI = 8.99)、喜马拉雅扭角羚(RAI = 4.60)。

2.1 海拔分布特征

黑麝及其同域有蹄类物种在研究区域不同海拔范围活动分布的独立探测次数存在极显著差异(χ^2 = 4,066.70, df = 30, P < 0.001)。黑麝的活动集中在海拔2,600 m以上, 其中在海拔 > 3,500 m区域的独立探测次数最高, 占该物种总独立探测次数的70.30%; 海拔3,200–3,500 m的独立探测次数次之, 占比为17.82%; 海拔2,600–2,900 m的独立探测次数占比为6.44%。相比之下, 黑麝的海拔分布偏好极显著高于同域其他有蹄类物种(χ^2 = 1156.10, df = 6, P < 0.001)。喜马拉雅扭角羚在海拔3,200–3,500 m的独立探测次数最高(40.00%), 在海拔 > 3,500 m的范围内也拍摄到少量喜马拉雅扭角羚(4.73%)和喜马拉雅鬣羚(0.91%); 赤斑羚在海拔2,600–2,900 m的独立探测次数最高(73.79%), 但在海拔> 3,500 m未监测到其活动记录; 贡山麂和野猪则偏好海拔较低的区域, 在海拔2,900 m以上未监测到野猪的活动, 而贡山麂的独立探测次数仅1次(图2, 表2)。

2.2 季节分布特征

黑麝及其同域有蹄类物种在研究区域不同季节记录的独立探测次数存在极显著差异(χ^2 = 424.89, df = 15, P < 0.001)。黑麝在冬季的活动强度最强, 独立探测次数为73次(SRAI = 1.22), 并在1月达到峰值; 春季次之, 为51次(SRAI = 0.85); 夏季最低, 仅28次(SRAI = 0.47)。赤斑羚也在冬季活动强度最强(SRAI = 3.23), 但其活动高峰出现在11月; 喜马拉雅鬣羚在秋季活动强度最强(SRAI = 6.10), 同样在11月达到峰值; 喜马拉雅扭角羚在春季活动强度最强(SRAI = 2.47), 在5月达到峰值; 贡山麂(SRAI = 6.57)和野猪(SRAI = 0.65)在秋季活动强度最强, 分别在10月和8月达到峰值(图3, 表3)。

表1 藏东南格当区域红外相机拍摄的黑麝与同域有蹄类物种情况

Table 1 The black musk deer and sympatric ungulates captured by camera traps in Gedang, southeastern Xizang

物种 Species	IUCN红色名录等级 IUCN Red List categories	相机位点数 No. of camera trap sites	有效影像数 No. of valid imagery	独立探测次数 No. of independent detections	相对多度指数 Relative abundance index (RAI)
黑麝 *Moschus fuscus*	濒危 Endangered (EN)	13	840	202	3.38
喜马拉雅鬣羚 *Capricornis thar*	易危 Vulnerable (VU)	120	6,278	987	16.50
喜马拉雅扭角羚 *Budorcas taxicolor*	易危 Vulnerable (VU)	49	3,852	275	4.60
赤斑羚 *Naemorhedus baileyi*	易危 Vulnerable (VU)	51	2,983	538	8.99
贡山麂 *Muntiacus gongshanensis*	数据缺乏 Data Deficient (DD)	59	7,445	1,170	19.56
野猪 *Sus scrofa*	无危 Least Concern (LC)	22	617	83	1.39

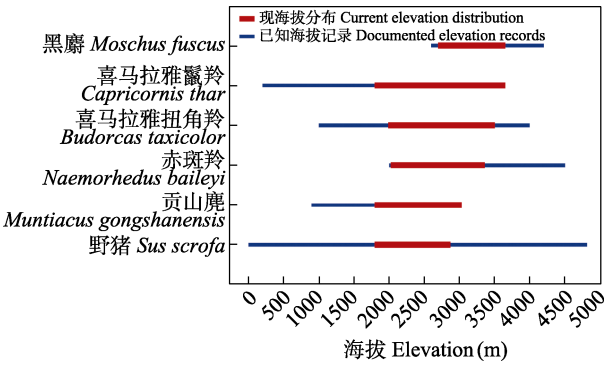


图2　藏东南格当区域黑麝及其同域有蹄类物种的分布海拔。已知海拔记录来源于IUCN濒危物种红色名录(2025-1版)。
Fig. 2　Elevational distribution of black musk deer and sympatric ungulates in Gedang, southeastern Xizang. Documented elevational records were derived from the IUCN Red List of Threatened Species (Version 2025-1).

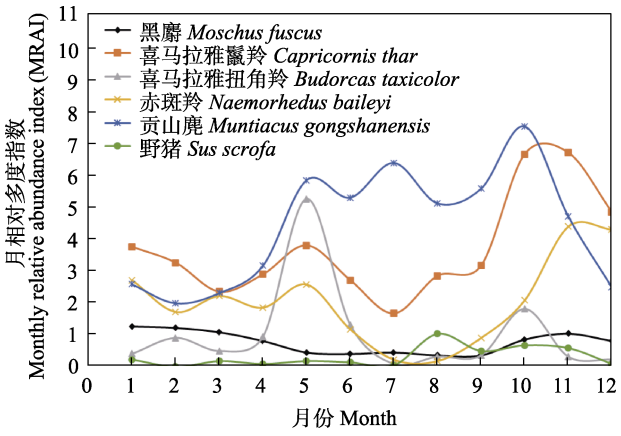


图3　藏东南格当区域黑麝及其同域有蹄类物种的月活动节律
Fig. 3　Monthly activity rhythms of black musk deer and sympatric ungulates in Gedang, southeastern Xizang

表2　藏东南格当区域黑麝与同域有蹄类物种在不同海拔的独立探测次数及其占该物种总独立探测次数的比例
Table 2　Independent detection and their proportion of the total independent detections for black musk deer and sympatric ungulates across different elevations in Gedang, southeastern Xizang

物种 Species	< 2,000 m	2,000–2,300 m	2,300–2,600 m	2,600–2,900 m	2,900–3,200 m	3,200–3,500 m	> 3,500 m	总计 Total
黑麝 *Moschus fuscus*	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	13 (6.44%)	11 (5.45%)	36 (17.82%)	142 (70.30%)	202 (100%)
喜马拉雅鬣羚 *Capricornis thar*	29 (2.94%)	48 (4.86%)	115 (11.65%)	596 (60.39%)	76 (7.70%)	114 (11.55%)	9 (0.91%)	987 (100%)
喜马拉雅扭角羚 *Budorcas taxicolor*	1 (0.36%)	18 (6.55%)	12 (4.36%)	96 (34.91%)	25 (9.09%)	110 (40.00%)	13 (4.73%)	275 (100%)
赤斑羚 *Naemorhedus baileyi*	3 (0.56%)	34 (6.32%)	77 (14.31%)	397 (73.79%)	26 (4.83%)	1 (0.19%)	0 (0%)	538 (100%)
贡山麂 *Muntiacus gongshanensis*	349 (29.83%)	330 (28.21%)	228 (19.49%)	262 (22.39%)	1 (0.09%)	0 (0%)	0 (0%)	1,170 (100%)
野猪 *Sus scrofa*	3 (3.61%)	19 (22.89%)	20 (24.10%)	41 (49.40%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	83 (100%)

表3　藏东南格当区域黑麝及其同域有蹄类物种在不同季节的拍摄情况和记录温度
Table 3　Independent detection and recorded temperatures of black musk deer and sympatric ungulates across different seasons in Gedang, southeastern Xizang

物种 Species	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn			冬季 Winter			总计 Total		
	ID	SRAI	T (℃)	ID	SRAI	T (℃)	ID	SRAI	T (℃)	ID	SRAI	T (℃)	ID	RAI	Avg (℃)
黑麝 *Moschus fuscus*	51	0.85	–6 – 9	28	0.47	7–14	50	0.84	–4 – 11	73	1.22	–11 – 3	202	3.38	1.58
喜马拉雅鬣羚 *Capricornis thar*	200	3.34	–1 – 21	160	2.67	8–32	365	6.10	–3 – 30	262	4.38	–6 – 13	987	16.50	6.28
喜马拉雅扭角羚 *Budorcas taxicolor*	148	2.47	–2 – 31	38	0.64	5–19	55	0.92	0–18	34	0.57	–1 – 13	275	4.60	7.87
赤斑羚 *Naemorhedus baileyi*	147	2.46	–1 – 32	35	0.59	8–19	163	2.72	–1 – 34	193	3.23	–3 – 37	538	8.99	6.35
贡山麂 *Muntiacus gongshanensis*	250	4.18	2–19	371	6.20	9–21	393	6.57	2–21	156	2.61	–2 – 16	1,170	19.56	11.91
野猪 *Sus scrofa*	10	0.17	6–39	27	0.45	12–33	39	0.65	7–24	7	0.12	1–15	83	1.39	13.96

ID: 物种的独立探测次数; SRAI: 不同季节的相对多度指数; T: 不同季节记录的活动温度; Avg: 年均温。
ID, Independent detection of the species; SRAI, Seasonal relative abundance index; T, Activity temperatures across different seasons; Avg, Annual mean temperature.

不同有蹄类物种在不同季节的相对活动强度与记录的环境温度存在关联。黑麝在春季、秋季和冬季活动的最低环境温度分别为–6℃、–4℃和–11℃，在这3个季节中均为同域有蹄类最低。而在

夏季, 喜马拉雅扭角羚活动的最低环境温度(5℃)为同域有蹄类中最低。同时, 黑麝在各季节活动的最高环境温度(9℃、14℃、11℃、3℃)以及全年平均环境温度(1.58℃)也为同域有蹄类中最低。相反, 野猪偏好较高温度, 其在各季节活动的最低环境温度(6℃、12℃、7℃、1℃)及全年平均环境温度(13.96℃)均为同域有蹄类中最高。野猪在春季(39℃)和夏季(33℃)活动的最高环境温度是同域有蹄类中最高的; 赤斑羚在秋季(34℃)和冬季(37℃)活动的最高环境温度是同域有蹄类中最高的。

2.3 夜行性特征

研究区域6种有蹄类物种中有4种展现出不同程度的夜行性特征: 贡山麂的NRAI为0.71, 喜马拉雅鬣羚为0.78, 赤斑羚为0.69; 黑麝的夜行性特征尤为显著, 其NRAI高达0.98, 表明该物种在本研究区域具有极高的夜间活动强度。此外, 喜马拉雅扭角羚表现出昼行性特征, NRAI为0.33; 野猪则表现出明显的昼行性, 其NRAI仅0.12 (图4)。

2.4 活动节律

日活动节律分析结果显示, 黑麝的活动高峰集中在夜间, 从傍晚17:00开始活动, 其活动频次呈上升趋势, 至凌晨3:00达到最高峰; 在白天10:00–16:00几乎无黑麝活动记录(图5)。对其他3种夜行性物种来说, 贡山麂的活动时间集中在傍晚19:00–21:00, 在清晨7:00–9:00有一段小高峰; 喜马拉雅鬣羚和赤斑羚的活动模式较为相似, 全天均有活动迹象, 但活动时间较为分散。喜马拉雅鬣羚的活动高峰集中在夜间19:00–24:00, 在清晨6:00–8:00有一段小高峰, 呈现出“一大一小”双峰型的活动特征; 赤斑羚活动频繁的时段为5:00–8:00以及19:00–24:00。对于昼行性物种, 野猪的活动时间集中在白天12:00–19:00, 呈现出明显的单峰型活动特征; 喜马拉雅扭角羚的活动强度在白天15:00–20:00相对较高, 而0:00–5:00的活动强度较低。

对有蹄类物种活动节律的重叠分析进一步表明, 黑麝与野猪的活动重叠指数仅0.140, 日活动节律曲线差异极显著($\Delta4 = 0.140$, $P < 0.001$); 黑麝与

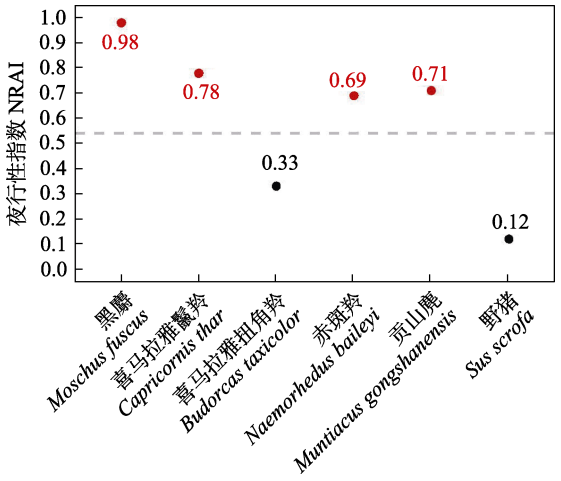


图4 藏东南格当区域黑麝及其同域有蹄类物种的夜行性指数

Fig. 4 Night-time relative abundance index (NRAI) of black musk deer and sympatric ungulates in Gedang, southeastern Xizang

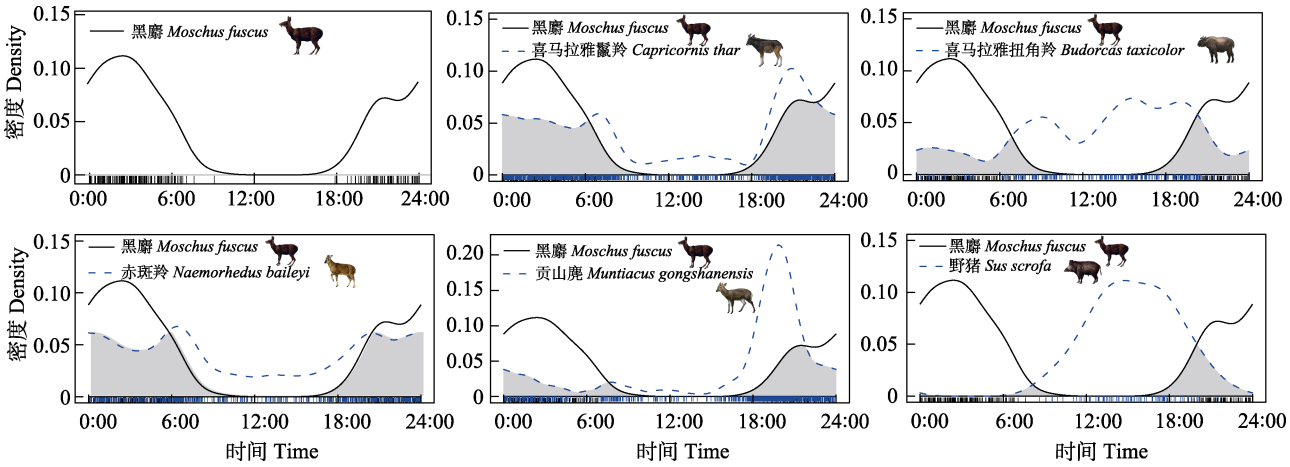


图5 藏东南格当区域黑麝及其同域有蹄类物种的日活动节律曲线与时间重叠比较

Fig. 5 Comparison of daily activity rhythms and temporal overlap of black musk deer and sympatric ungulates in Gedang, southeastern Xizang

喜马拉雅鬣羚、赤斑羚、贡山麂、喜马拉雅扭角羚的活动重叠指数分别为0.708、0.685、0.432和0.359, 日活动节律曲线差异均极显著(Δ4分别为0.708、0.685、0.432、0.359, $P < 0.001$)。由此可见, 黑麝与同域有蹄类物种之间的日活动节律均存在显著分化。

3 讨论

3.1 黑麝的栖息地分布特征

麝科仅1属, 即麝属(*Moschus*), 但其形态学特征的高度相似性导致了分类上的诸多争议。例如, 中国拥有丰富的林麝资源, 已有诸多研究关注其栖息地分布和生态习性(吴科君等, 2022; 席健等, 2023; 王安等, 2024; 蓝贤娜等, 2025)。安徽麝曾被归为林麝或原麝的亚种, 但通过系统发育和种群基因组学分析, 现已证实其为一个独立物种(王歧山等, 1982; Chen et al., 2025)。黑麝于1981年首次被发现, 后续研究进一步明确了其分类地位(李致祥等, 1981; 章敬旗等, 2004; 彭红元等, 2010)。麝科动物因其所产麝香在医药及香料市场的高额需求而成为目标物种, 在乱捕滥猎与栖息地破碎化的双重压力下, 其种群数量锐减, 分布区域变得支离破碎(Liu et al., 2021; 吴科君等, 2022; Feng et al., 2023)。然而, 受限于系统调查极度匮乏, 有关黑麝的栖息地需求与活动节律等关键信息仍缺乏可靠数据, 进而影响了其保护策略的针对性。

本研究通过在藏东南格当区域布设的红外相机调查结果发现, 黑麝主要以独居方式分布于高海拔范围, 在海拔 > 3,500 m区域的独立探测次数占该物种总独立探测次数的70%以上。该高海拔范围主要位于当地的山地寒温带暗针叶林附近, 向上过渡为亚高山寒带灌丛(附录3), 这与以往报道较为一致(冯祚建等, 1984; 孙航和周浙昆, 1996; 刘少英等, 2022; 魏辅文等, 2025): 黑麝主要栖息于海拔2,700–4,200 m及以上的高山暗针叶林、针阔混交林、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)灌丛和草甸, 并在藏东南地区活动于4,200 m以上冰雪覆盖的山坡。麝类动物偏好栖息于多岩石山地的针叶林或针阔混交林(刘少英等, 2022)。例如, 林麝主要活动于海拔1,000 m以上的针叶林和阔叶林(吴科君等, 2022; 高心宇, 2023[①]); 原麝在海拔1,200–1,500 m的针阔混交林中出现频率最高(王佩等, 2023); 安徽麝偏好海拔600–1,100 m、近水源、远离道路的阔叶林及针阔混交林[②]; 兴隆山的马麝在夏秋青草季主要活动于2,350–3,670 m的高海拔区域, 冬春枯草季则缩减至2,360–3,170 m[③]。麝类动物主要取食草本与灌木叶子, 其食谱包括杜鹃、松萝(*Tillandsia usneoides*)、苔藓植物和地衣等, 而这类森林多分布于高海拔, 这也是包括黑麝在内的麝类偏好高海拔栖息地的原因之一。

黑麝通过高海拔策略实现与研究区域中其他有蹄类的栖息地分化。在其海拔 > 3,500 m的活动核心区, 喜马拉雅扭角羚的独立探测次数占该物种总独立探测次数的4.73%, 喜马拉雅鬣羚仅0.91%, 而赤斑羚、贡山麂及野猪则集中分布于中低海拔。这与四川唐家河扭角羚(*Budorcas tibetana*)、中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)、中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)在不同季节对生境选择的研究结果相一致(吴华和胡锦矗, 2001)。黑麝占据高寒生境, 喜马拉雅鬣羚与喜马拉雅扭角羚对高海拔和低海拔生境广幅利用, 赤斑羚、贡山麂及野猪则偏好山地暖温带针阔混交林与山地亚热带常绿阔叶林的中低海拔生境, 这种垂直生态位分离使6种有蹄类在梯度镶嵌中有效避开了中低海拔资源密集带, 降低了种间竞争强度, 体现出“垂直分层”的生境生态位分化机制。

当前关于麝科动物的研究主要聚焦于栖息地适宜性方面。已有研究一致指出, 海拔和人类活动干扰是影响林麝潜在适宜栖息地分布的主要环境因子, 且栖息地破碎化对其种群恢复影响较大(温平等, 2021; 席健等, 2023; 袁雪瑾等, 2023; 邵建斌等, 2024; 王安等, 2024; 蒋夏威等, 2025)。对马麝而言, 海拔、隐蔽性及距水源距离等多种环境因子共同驱动其栖息地选择, 其栖息地同样因破碎化和人类干扰而持续丧失(孙章运, 2021[①]; Zhang LX

① 高心宇 (2023) 土地利用变化背景下陕西秦巴山区林麝(*Moschus berezovskii*)空间分布格局研究. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌.
② 包丽艳 (2024) 湖北大别山国家级自然保护区安徽麝生境选择与适宜性评价. 硕士学位论文, 华中农业大学, 武汉.
③ 孙章运 (2021) 兴隆山马麝的空间分布、活动节律和栖息地适宜性评价. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.

et al., 2022; 丁彦珂等, 2023; 申立泉等, 2023; 李海萍等, 2024)。原麝的研究进一步显示, 低破碎化、低人类影响区域是维持其种群稳定的关键, 植被类型、海拔、坡度、坡向与距河流距离等环境因子亦影响其栖息地选择(Zhang C et al., 2022; 王佩等, 2023; 焦慧芳, 2025)。在地理位置上邻近本研究区域的喜马拉雅麝, 其分布范围仅限于尼泊尔与中国西藏, 降水、温度季节性和年均温是其主要限制因子(Mainali et al., 2023)。综上, 与其他麝科动物相似, 藏东南山地的黑麝亦偏好高海拔栖息地且分布范围较为狭窄, 这可能是其对环境条件与资源分配共同约束的响应。

3.2 黑麝的活动节律特征

在研究区域的6种有蹄类动物中, 贡山鹿的RAI最高, 而黑麝则仅略高于野猪。这一结果与四川大相岭自然保护区林麝在5种有蹄类中相对多度最低的现象一致; 从季节分布来看, 黑麝的活动强度在冬季最高, 并于1月达到峰值, 夏季则为最低, 这与大相岭自然保护区林麝呈现3月与11月两个活动高峰的研究结果存在差异(李平等, 2021)。然而, 本研究区域内同域分布的有蹄类动物活动模式却较为一致, 均在深秋至冬季期间存在一个相对较强的活动高峰。推测该差异源于藏东南地区受雅鲁藏布江水汽通道输送的印度洋暖湿气流调节, 冷季气候相对温和且林下可食灌丛仍绿, 为黑麝等物种提供了持续而稳定的觅食与活动条件(附录3)。此外, 不同有蹄类物种在不同季节的相对活动强度表现出对环境温度的适应性差异。黑麝在春季、秋季和冬季的活动最低环境温度在同域有蹄类中最低, 在各季节活动的最高环境温度也为同域有蹄类中最低, 且在冬季常出现舔食冰雪的行为。这种行为可能是黑麝为了补充水分或获取某些矿物质, 同时也反映出其对寒冷环境的高度适应性。

王志祥等(2024)的研究表明, 雅鲁藏布江加查峡谷的喜马拉雅鬣羚呈夜行性, 日活动节律呈双峰型活动模式, 本研究于雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区墨脱地区的观测结果与其较为一致, 验证了该物种在青藏高原范围内的稳定活动模式。尽管本研究区域的喜马拉雅鬣羚、赤斑羚、贡山鹿和黑麝均表现出夜行性, 但黑麝的夜行性指数高达0.98, 显著高于其他物种。云南高黎贡山首次拍摄到的黑麝影像也显示为在夜间的0:00–3:00和7:00活动(李军杰等, 2025)。综合现有报道, 林麝、马麝、原麝及安徽麝均表现出一定的夜行性活动节律, 可见夜行性是麝类的共有特征(孙佳欣等, 2018; 李平等, 2021; 孙章运, 2021[①]; 焦慧芳, 2025; 庞大鹏等, 2025)。墨脱地区作为我国最后一个通公路的县城, 以往当地居民有传统的狩猎习俗。黑麝的低RAI和显著夜行性可能主要源于其分泌高经济价值的麝香, 使其成为狩猎的重要目标, 种群数量严重受损, 而夜行性作为一种适应性策略, 有助于降低被捕猎风险。同时, 黑麝体型较小且面临同目物种间的资源竞争, 进一步促使其形成显著的夜行性行为, 并导致其在本研究区域的分布范围较狭窄。

传统观点强调麝类晨昏活动频繁(刘少英等, 2022)。已有研究表明, 马麝在不同地区的日活动模式均表现为典型的晨昏节律, 且其与人类活动节律差异极显著(孙佳欣等, 2018; 孙章运, 2021[①])。大相岭野生林麝的主要高峰集中在18:00–20:00, 清晨峰不显著; 圈养林麝则呈现明显的早晚双高峰(薛程等, 2008; 李平等, 2021; Lin et al., 2023)。相比之下, 本研究中藏东南的黑麝自傍晚17:00起活动强度持续上升, 至凌晨3:00达峰值, 清晨时段高峰完全缺失, 表明典型“晨昏双峰”模式在该种群中并不具普适性, 这可能与不同地区的环境温度及光照周期等因素有关。同域有蹄类的节律分化亦支持这一观点, 安徽麝与小鹿(*Muntiacus reevesi*)的日活动曲线高度重叠, 分化不显著, 而与野猪重叠度低、分化显著(庞大鹏等, 2025)。黑麝与其同域有蹄类物种的日活动节律均存在显著分化, 同样与昼行性的野猪的活动节律差异最大, 暗示其通过极端夜行化避开昼行性竞争者和捕食风险, 并降低社交干扰。这些有蹄类物种在长期进化过程中形成了独特的生态适应策略, 黑麝通过“高海拔 + 极夜行”的双重生态位压缩策略, 以最小化种间竞争与干扰, 从而在该生境中维持种群稳定。

3.3 保护建议

在全球气候变暖的宏观背景下, 未来30–50年间, 中国麝科动物的适宜栖息区域面积预计将显著缩减, 原麝可能会向更高海拔区域的西南方

① 孙章运 (2021) 兴隆山马麝的空间分布、活动节律和栖息地适宜性评价. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.

向迁移, 而马麝、喜马拉雅麝和安徽麝则可能向更高纬度的东北方向迁移(Jiang et al., 2020; Mainali et al., 2023)。青藏高原作为我国重要的麝类分布区域, 其独特的地理环境为麝类提供了得天独厚的生存条件和天然的保护屏障(周鑫等, 2024)。然而, 升温及基建切割等导致的生境破碎化指数攀升, 使得麝类对林下植被的采食调控作用随之衰减, 威胁着高山-亚高山生态系统的稳定性(刘丛盛, 2022)。为缓解麝类资源保护与可持续利用之间愈发突出的矛盾, 亟需加快建立以黑麝等珍稀物种为主要保护对象的自然保护区, 加强其栖息地保护与修复工作。此外, 应同步探索发展契合其生境与活动节律的“近自然”人工养殖技术, 以实现麝类资源的长效保育, 增强区域生态安全屏障的稳定性(刘文华和佟建明, 2005; 吴科君等, 2022)。

本研究揭示了濒危物种黑麝在藏东南地区的高海拔夜行性行为等生态习性, 并明确了其与同域其他有蹄类动物在生态适应性方面的差异。这一生境选择模式反映了黑麝对海拔高度、环境温度以及活动节律等关键生态要素的精细化调节需求, 对其就地保护及保护区的科学管理具有重要参考价值。研究结果有助于深入探讨环境因素对黑麝的生境偏好和活动节律的影响, 以及进一步量化评估该物种的种群分布状况及其生态功能。同时, 该研究结果也丰富了对青藏高原及周边地区有蹄类动物生态适应性的理论认识, 可为藏东南野生黑麝的长期保护工作提供实践指导, 为科学制定我国黑麝资源的保护与管理策略提供有力支撑。

致谢: 感谢墨脱县格当乡公益林专业管护站的工作人员在协助野外调查与数据收集中的贡献与努力! 感谢墨脱县林业和草原局对本次调查项目以及墨脱县格当乡乡政府等多方面的支持!

参考文献

Azlan JM, Sharma DSK (2006) The diversity and activity patterns of wild felids in a secondary forest in Peninsular Malaysia. Oryx, 40, 36–41.

Chen EJ, Guan TP, Li S (2022) The sex ratio, social structure and activity pattern of Reeves' muntjac (*Muntiacus reevesi*) in Minshan Mountains, Sichuan Province. Acta Theriologica Sinica, 42, 1–11. (in Chinese with English abstract) [陈尔骏, 官天培, 李晟 (2022) 四川岷山小麂的种群性比、社会结构和活动节律. 兽类学报, 42, 1–11.]

Chen GT, Li XN, Miao YX, Pang DP, Wang H, Fan HZ, Zhang BW (2025) Population genomic analysis provides insights into the evolution and conservation of two critically endangered musk deer species. Evolutionary Applications, 18, e70134.

Chen LJ, Shu ZF, Xiao ZS (2019) Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve. Biodiversity Science, 27, 266–272. (in Chinese with English abstract) [陈立军, 束祖飞, 肖治术 (2019) 应用红外相机数据研究动物活动节律——以广东车八岭保护区鸡形目鸟类为例. 生物多样性, 27, 266–272.]

Chen X, Jin YY, Jiang Y, Jiang WH, Yang ZS, Hu DF, Yang B (2025) A new record of mammals in Sichuan Province—Black musk deer. Sichuan Journal of Zoology, 44, 373. (in Chinese) [陈星, 晋雨漪, 蒋勇, 蒋维宏, 杨志松, 胡德夫, 杨彪 (2025) 四川省兽类新记录——黑麝. 四川动物, 44, 373.]

Ding YK, Yao ZC, Zhao C, Zhang ZR, Chen JD, Teng LW, Liu ZS (2023) Habitat suitability assessment of *Moschus chrysogaster* in Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 43, 3150–3156. (in Chinese with English abstract) [丁彦珂, 姚志诚, 赵唱, 张致荣, 陈俊达, 滕丽微, 刘振生 (2023) 贺兰山马麝(*Moschus chrysogaster*)生境适宜性评价. 生态学报, 43, 3150–3156.]

Feng H, Feng TY, Mo YD, Sun SL, Wang L, Lu CB, Feng CL, Xing K, Su ZJ (2023) Integrated multi-omics analysis reveals insights into Chinese forest musk deer (*Moschus berezovskii*) genome evolution and musk synthesis. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 11, 1156138.

Feng ZJ, Cai GQ, Zheng CL (1984) A checklist of the mammals of Xizang (Tibet). Acta Theriologica Sinica, 4, 341–358. (in Chinese with English abstract) [冯祚建, 蔡桂全, 郑昌琳 (1984) 西藏哺乳类名录. 兽类学报, 4, 341–358.]

Gao YT (1963) Taxonomic notes on the Chinese musk-deer. Acta Zoologica Sinica, 15, 479–488. (in Chinese with English abstract) [高耀亭 (1963) 中国麝的分类. 动物学报, 15, 479–488.]

IUCN (2025) The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2025-1. https://www.iucnredlist.org/. (accessed on 2025-08-16)

Jiang F, Zhang JJ, Gao HM, Cai ZY, Zhou XW, Li SQ, Zhang TZ (2020) Musk deer (*Moschus* spp.) face redistribution to higher elevations and latitudes under climate change in China. Science of the Total Environment, 704, 135335.

Jiang XW, Huang JZ, Zhang L, Li TA, Yang YG, Li D, Liu H (2025) Habitat research of forest musk deer in Mianyang area based on MaxEnt model. Journal of Mianyang Teachers' College (Science), 44(5), 37–45. (in Chinese with English abstract) [蒋夏威, 黄俊忠, 张炼, 李同澳, 杨元罡, 李冬, 刘昊 (2025) 基于MaxEnt模型的林麝在绵阳地

区的栖息地研究. 绵阳师范学院学报, 44(5), 37–45.]

Jiao HF (2025) Resource investigation and suitable habitat assessment of *Moschus moschiferus* in Shanxi Yangcheng Manghe Rhesus Monkey National Nature Reserve. Shanxi Forestry Science and Technology, 54(2), 7–9, 64. (in Chinese with English abstract) [焦慧芳 (2025) 山西阳城蟒河猕猴国家级自然保护区原麝资源调查及适宜栖息地评估. 山西林业科技, 54(2), 7–9, 64.]

Lan XN, Li YX, Hai LY, Luo ZW, Jin XL, Qin XH, Hu DF, Liu G (2025) Identification and geographical distribution of wild musk deer species in North China. Biodiversity Science, 33, 24505. (in Chinese with English abstract) [蓝贤娜, 李亦欣, 海路瑶, 骆正伟, 金学林, 秦兴虎, 胡德夫, 刘刚 (2025) 华北区野生麝类的分子鉴定及分布现状. 生物多样性, 33, 24505.]

Li HJ (2021) Investigation and analysis of wild animals in Jilin Baishan Original Musk Deer National Nature Reserve. Forest Investigation Design, 50(6), 52–55. (in Chinese with English abstract) [李华杰 (2021) 吉林白山原麝国家级自然保护区野生动物调查分析. 林业勘查设计, 50(6), 52–55.]

Li HP, Zan L, Zhou X, Zhang RH, Wang G, Qi J, Meng XX (2024) Impacts of anthropogenic activities on the habitat of musk deer in the Xinglongshan National Nature Reserve on the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Journal of Ecology, 43, 1920–1927. (in Chinese with English abstract) [李海萍, 咎僚, 周鑫, 张荣红, 王功, 祁军, 孟秀祥 (2024) 人类活动对青藏高原东缘兴隆山国家级自然保护区马麝(*Moschus chrysogaster*)生境的影响. 生态学杂志, 43, 1920–1927.]

Li JJ, Zhang JH, Fang YH, Xiong Y, Huang ZP, Li YP (2025) First camera trap images of the black musk deer recorded in Yunnan Province. Sichuan Journal of Zoology, 44, 120. (in Chinese) [李军杰, 张甲辉, 房以好, 熊云, 黄志旁, 李延鹏 (2025) 首次在云南省拍摄到黑麝的野外影像. 四川动物, 44, 120.]

Li P, Zhang ZJ, Yang H, Wei W, Zhou H, Hong MS, Fu MX, Song XQ, Yu J (2021) Study on the activity rhythms of ungulates in Daxiangling Nature Reserve based on infrared camera trapping. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 42(3), 18–23. (in Chinese with English abstract) [李平, 张泽钧, 杨洪, 韦伟, 周宏, 洪明生, 付明霞, 宋心强, 余吉 (2021) 基于红外相机技术对大相岭保护区有蹄类动物活动节律的初步研究. 四川林业科技, 42(3), 18–23.]

Li S, McShea WJ, Wang DJ, Shen XL, Bu HL, Guan TP, Wang F, Gu XD, Zhang XF, Liao HH (2020) Construction progress of the Camera-trapping Network for the Mountains of Southwest China. Biodiversity Science, 28, 1049–1058. (in Chinese with English abstract) [李晟, McShea WJ, 王大军, 申小莉, 卜红亮, 官天培, 王放, 古晓东, 张晓峰, 廖灏泓 (2020) 西南山地红外相机监测网络建设进展. 生物多样性, 28, 1049–1058.]

Li ZX (1981) On a new species of musk-deer from China. Zoological Research, 2, 157–161, 204. (in Chinese with English abstract) [李致祥 (1981) 中国麝一新种的记述. 动物学研究, 2, 157–161, 204.]

Lin SW, Shen LQ, Gao HX, Wu JY, LüQX, Zhou X, Li JS, Meng XX (2023) The autumn activity patterns and time budgets of forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in captivity. Veterinary Research Forum, 14, 589–594.

Liu CS (2022) Discussion on musk deer resources conservation and ecological development strategy in the east edge of Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 53, 7955–7959. (in Chinese with English abstract) [刘丛盛 (2022) 青藏高原东缘麝类资源保护及生态型发展战略的探讨. 中草药, 53, 7955–7959.]

Liu K, Xie L, Deng M, Zhang XM, Luo J, Li XF (2021) Zoology, chemical composition, pharmacology, quality control and future perspective of musk (*Moschus*): A review. Chinese Medicine, 16, 46.

Liu SY, Wu Y, Li S (2022) Handbook of the Mammals of China. Haixia Publishing House, Beijing. (in Chinese) [刘少英, 吴毅, 李晟 (2022) 中国兽类图鉴. 海峡书局, 北京.]

Liu WH, Tong JM (2005) Analysis on protection and utilization of musk deer resources in China. Review of China Agricultural Science and Technology, 7(4), 28–32. (in Chinese with English abstract) [刘文华, 佟建明 (2005) 中国的麝资源及其保护与利用现状分析. 中国农业科技导报, 7(4), 28–32.]

Mainali KP, Singh PB, Evans M, Adhikari A, Hu YM, Hu HJ (2023) A brighter shade of future climate on Himalayan musk deer *Moschus leucogaster*. Scientific Reports, 13, 12771.

Meredith M, Ridout M (2014) Overlap: Estimates of Coefficient of Overlapping for Animal Activity Patterns. https://CRAN.R-project.org/package=overlap. (accessed on 2025-09-08)

O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. Animal Conservation, 6, 131–139.

Pang DP, Wang LR, Lu YT, Huang JW, Xu P, Jiang QY, Ding ZW, Chen YF, Ding J, Zhang BW (2025) Temporal niche patterns of Anhui musk deer (*Moschus anhuiensis*) and sympatric ungulates. Acta Theriologica Sinica, 45, 302–311. (in Chinese with English abstract) [庞大鹏, 王兰荣, 卢雨婷, 黄嘉伟, 许鹏, 江清悦, 丁仲文, 陈云峰, 丁俊, 张保卫 (2025) 安徽麝及其同域分布有蹄类动物时间生态位格局初步研究. 兽类学报, 45, 302–311.]

Peng HY, Chen WC, Zhang XY (2010) A review on the classification of musk deer. Journal of Yulin Normal University, 31(2), 66–72. (in Chinese with English abstract) [彭红元, 陈伟才, 张修月 (2010) 麝的分类研究概述. 玉林师范学院学报, 31(2), 66–72.]

Ridout MS, Linkie M (2009) Estimating overlap of daily activity patterns from camera trap data. Journal of

Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 14, 322–337.

Rowcliffe M (2016) Activity: Animal Activity Statistics. https://CRAN.R-project.org/package=activity. (accessed on 2025-09-08)

Shao JB, Guo DL, Ma YT, Zhao WC, Xie ZF, Yu YP, Ma XL, Zhang YH (2024) Impact of human activities on habitat of forest musk deer in Shaanxi Niubeiliang Nature Reserve of Qinling Mountains. Shaanxi Forest Science and Technology, 52(6), 28–35. (in Chinese with English abstract) [邵建斌, 郭东玲, 麻应太, 赵文超, 解振锋, 于艳萍, 马雪亮, 张耀红 (2024) 人类活动对陕西牛背梁国家级自然保护区林麝栖息地的影响. 陕西林业科技, 52(6), 28–35.]

Shen LQ, Gao HX, Wang G, Liu R, Qi J, Zhang XY, Wang CL, Wu JY, Meng XX (2023) Summer bed-site habitat utilization of wild alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) in Xinglongshan National Nature Reserve, Gansu Province of China. Chinese Journal of Ecology, 42, 1699–1704. (in Chinese with English abstract) [申立泉, 高浩翔, 王功, 刘瑞, 祁军, 张学炎, 王春玲, 吴佳忆, 孟秀祥 (2023) 甘肃兴隆山野生马麝夏季卧息生境选择. 生态学杂志, 42, 1699–1704.]

Shi XY, Li XY, Wei CY, Sun G, Liu Z, Zhao X, Zhou JD, Fan J, Li C, Lü Z (2023) Avian and mammal diversities and their altitudinal and seasonal distribution patterns in Yarlung Zangbo Grand Canyon, China. Biodiversity Science, 31, 22491. (in Chinese with English abstract) [史湘莹, 李雪阳, 魏春玥, 孙戈, 刘震, 赵翔, 周嘉鼎, 樊简, 李成, 吕植 (2023) 雅鲁藏布大峡谷鸟兽多样性及其海拔和季节分布. 生物多样性, 31, 22491.]

Sun H, Zhou ZK (1996) The characters and origin of the flora from the big bend gorge of Yalutsangpu (Brahmabutra) River, Eastern Himalayas. Acta Botanica Yunnanica, 18, 185–204. (in Chinese with English abstract) [孙航, 周浙昆 (1996) 喜马拉雅东部雅鲁藏布江大峡弯河谷地区植物区系的特点及来源. 云南植物研究, 18, 185–204.]

Sun JX, Li JQ, Wan YQ, Li S, Guan TP, Wang J, Xia WC, Xu HG (2018) Study on the activity rhythms of nine ungulates in summer and autumn in Sichuan. Journal of Ecology and Rural Environment, 34, 1003–1009. (in Chinese with English abstract) [孙佳欣, 李佳琦, 万雅琼, 李晟, 官天培, 王杰, 夏万才, 徐海根 (2018) 四川9种有蹄类动物夏秋季活动节律研究. 生态与农村环境学报, 34, 1003–1009.]

Veldhuis MP, Hofmeester TR, Balme G, Druce DJ, Pitman RT, Cromsigt JPGM (2020) Predation risk constrains herbivores' adaptive capacity to warming. Nature Ecology & Evolution, 4, 1069–1074.

Wang A, Wen DX, Zhou YY, Yu GQ, Chen J, Peng DY, Huang TF, Tian SR, Xiao F (2024) Assessment of habitat suitability for *Moschus berezovskii* in Hunan Province based on MaxEnt model and ArcGIS. Hunan Forestry Science & Technology, 51(1), 43–49. (in Chinese with English abstract) [王安, 文东新, 周芸芸, 于桂清, 陈军, 彭德永, 黄太福, 田书荣, 肖芬 (2024) 基于MaxEnt模型和ArcGIS软件的湖南省林麝生境适宜性评价. 湖南林业科技, 51(1), 43–49.]

Wang P, Li YJ, Yuan JG, Geng P, Li R (2023) Habitat suitability assessment for *Moschus moschiferus* based on optimized MaxEnt model. Chinese Journal of Wildlife, 44, 38–45. (in Chinese with English abstract) [王佩, 李英杰, 袁家根, 耿盼, 李蕊 (2023) 基于优化MaxEnt模型的原麝生境适宜性评价. 野生动物学报, 44, 38–45.]

Wang QQ, Yang B, Chang J, Wang X, Chen XG, Li SL, Renzeng JC, Gongqiu DZ, Zhang L (2025) The population ecological characteristics of Gongshan muntjac (*Muntiacus gongshanensis*) in Southeastern Tibet based on camera-trap technology. Ecology and Evolution, 15, e71646.

Wang QQ, Yang B, Zhu RF, Wang X, Li SL, Zhang L (2024) Unveiling the biodiversity and conservation significance of Medog: A camera-trapping survey on mammals in the Southeastern Tibetan mountains. Animals, 14, 2188.

Wang QS, Hu XL, Yan YH (1982) On a new subspecies of Siberian musk-deer (*Moschus moschiferus anhuiensis* subsp. nov.) from Anhui, China. Acta Theriologica Sinica, 2, 133–138. (in Chinese with English abstract) [王歧山, 胡小龙, 颜于宏 (1982) 我国原麝一新亚种——安徽亚种. 兽类学报, 2, 133–138.]

Wang ZX, Wang XY, Huang K, Zhu YH, Xia WC, Fei HL, Li DY (2024) Preliminary study on the activity rhythm of Himalayan *Iguana* in Jiacha Gorge of Yarlung Zangbo River. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 42(3), 76–83. (in Chinese with English abstract) [王志祥, 王雪宇, 黄凯, 朱宇航, 夏万才, 费汉榄, 黎大勇 (2024) 雅鲁藏布江加查峡谷喜马拉雅鬣羚活动节律研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), 42(3), 76–83.]

Wei FW, Yang QS, Wu Y, Jiang XL, Liu SY, Hu YB, Ge DY, Li BG, Yang G, Li M, Zhou J, Li S, Li S, Yu WH, Chen BY, Zhang ZJ, Zhou CQ, Wu SB, Zhang L, Chen ZZ, Chen SD, Deng HQ, Jiang TL, Zhang LB, Shi HY, Lu XL, Li Q, Liu Z, Cui YQ, Li YC, He K (2025) Catalogue of mammals in China (2024). Acta Theriologica Sinica, 45, 1–16. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 蒋学龙, 刘少英, 胡义波, 葛德燕, 李保国, 杨光, 李明, 周江, 李松, 李晟, 余文华, 陈炳耀, 张泽钧, 周材权, 吴诗宝, 张立, 陈中正, 陈顺德, 邓怀庆, 江廷磊, 张礼标, 石红艳, 卢学理, 李权, 刘铸, 崔雅倩, 李玉春, 何锴 (2025) 中国兽类名录(2024版). 兽类学报, 45, 1–16.]

Wen LJ, Shi K, Huang J, Song Y, Guo YM (2014) Preliminary analysis of mammal and bird diversity monitored with camera traps in Medog, Tibet. Biodiversity Science, 22, 798–799. (in Chinese with English abstract) [温立嘉, 时坤, 黄建, 宋阳, 郭玉民 (2014) 西藏墨脱鸟兽红外相机监测初报. 生物多样性, 22, 798–799.]

Wen P, Peng K, Chen X, Wei Y, Yang ZS, Dai Q (2021) Habitat suitability evaluation of four ungulate species in

Baishuihe National Nature Reserve based on MaxEnt model. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 42(1), 70–75. (in Chinese with English abstract) [温平, 彭科, 陈旭, 韦怡, 杨志松, 戴强 (2021) 基于MaxEnt模型的白水河国家级保护区有蹄类保护动物生境适宜性评价. 四川林业科技, 42(1), 70–75.]

Weng SY, Liu SS, Yang L (2022) A preliminary report on breeding bird diversity in Gawalong Mountain of northern Medog County, Tibet. Plateau Science Research, 6(4), 20–32. (in Chinese with English abstract) [翁仕洋, 刘善思, 杨乐 (2022) 西藏墨脱县北部嘎瓦龙山繁殖鸟类多样性初报. 高原科学研究, 6(4), 20–32.]

Wu H, Hu JC (2001) A comparison in spring and winter habitat selection of takin, serow and goral in Tangjiahe, Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 21, 1627–1633. (in Chinese with English abstract) [吴华, 胡锦矗 (2001) 四川唐家河羚牛、鬣羚、斑羚春冬季生境选择比较研究. 生态学报, 21, 1627–1633.]

Wu JP, Luo H, Zhu XL, Li BZ, Liu WL, Ci P (2016) Monitoring mammals and birds with camera traps at different altitudes of Medog, Tibet. Biodiversity Science, 24, 351–354. (in Chinese with English abstract) [吴建普, 罗红, 朱雪林, 李炳章, 刘务林, 次平 (2016) 西藏墨脱不同海拔区鸟兽红外相机监测. 生物多样性, 24, 351–354.]

Wu KJ, Wu SL, Su Y, Cai YH, Yang Y, Gong H, Jiang GM (2022) An overview and progress of the population distribution and food source research of *Moschus berezovskii*. South China Agriculture, 16(8), 166–169. (in Chinese) [吴科君, 吴世磊, 苏宇, 蔡永华, 杨营, 龚杭, 蒋桂枚 (2022) 林麝的种群分布及食源研究概况和进展. 南方农业, 16(8), 166–169.]

Xi J, Zhu YD, He K, Yang ZS, Li DY (2023) Habitat selection of wild training *Moschus berezovskii* individuals in Liziping National Nature Reserve, Sichuan Province. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 44(2), 51–57. (in Chinese with English abstract) [席健, 朱玉东, 何可, 杨志松, 黎大勇 (2023) 四川栗子坪国家级自然保护区林麝野化培训个体的生境选择. 四川林业科技, 44(2), 51–57.]

Xiao ZS, Li XH, Wang XZ, Zhou QH, Quan RC, Shen XL, Li S (2014) Developing camera-trapping protocols for wildlife monitoring in Chinese forests. Biodiversity Science, 22, 704–711. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李欣海, 王学志, 周岐海, 权锐昌, 申小莉, 李晟 (2014) 探讨我国森林野生动物红外相机监测规范. 生物多样性, 22, 704–711.]

Xue C, Meng XX, Xu HF, Xiao Y (2008) Activity rhythm and behavioral time budgets of the captive forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in spring. Acta Theriologica Sinica, 28, 194–200. (in Chinese with English abstract) [薛程, 孟秀祥, 徐宏发, 肖宇 (2008) 圈养林麝春季活动节律及时间分配. 兽类学报, 28, 194–200.]

Yuan XJ, Liu B, Huang TF, Tian SR (2023) The historical change and protecting strategy in population and distribution of forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Hunan Province. Journal of Hunan Ecological Science, 10(3), 121–125. (in Chinese with English abstract) [袁雪瑾, 刘搏, 黄太福, 田书荣 (2023) 湖南省林麝种群数量和分布的历史变迁与保护对策. 湖南生态科学学报, 10(3), 121–125.]

Zhang C, Fan YW, Chen MH, Xia WC, Wang JD, Zhan ZJ, Wang WL, Khan TU, Wu SH, Luan XF (2022) Identification of conservation priority areas and a protection network for the Siberian musk deer (*Moschus moschiferus* L.) in Northeast China. Animals. 12, 260.

Zhang JQ, Zhou YB, Xu WX, Hu JC, Liao WB (2004) Discussion about musk-deer's classification. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 25, 251–255. (in Chinese with English abstract) [章敬旗, 周友兵, 徐伟霞, 胡锦矗, 廖文波 (2004) 几种麝分类地位的探讨. 西华师范大学学报(自然科学版), 25, 251–255.]

Zhang LX, Sun ZY, An B, Zhang DX, Chen LY (2022) Alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) adjusts to a human-dominated semi-arid mountain ecosystem. Animals, 12, 3061.

Zhou X, Lü QX, Sangzhu ZX, Zha X, Zhou M, Li Y, Meng XX (2024) Reproduction success and the relationships to sociality and social networks in *ex-situ* conserved alpine musk deer in the east-northern edging area of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 44, 6417–6423. (in Chinese with English abstract) [周鑫, 吕青昕, 桑珠扎西, 扎西, 周密, 黎勇, 孟秀祥 (2024) 青藏高原东北缘濒危马麝迁地保育种群繁殖成效与社会性和社会网络的关系. 生态学报, 44, 6417–6423.]

Zou QX, Peng CC, Yang XW, Li GR, Mu L, Su HJ (2021) Spatiotemporal pattern of co-existence of two sympatric cervid species in Mayanghe National Nature Reserve, Guizhou, China. Chinese Journal of Wildlife, 42, 5–13. (in Chinese with English abstract) [邹启先, 彭彩淳, 杨雄威, 李光容, 穆浪, 粟海军 (2021) 两种同域分布鹿科动物的共存时空格局. 野生动物学报, 42, 5–13.]

(责任编委: 肖凌云　责任编辑: 黄祥忠)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025433

王倩倩, 陈孝国, 朱锐丰, 张明春, 王新, 李世林, 仁增江措, 彭武, 杨彪 (2026) 藏东南黑麝及其同域有蹄类物种的生态适应性差异. 生物多样性, 34, 25433. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025433



附录1　红外相机拍摄的黑麝(*Moschus fuscus*)影像。(a) 2024年11月4日拍摄于海拔3,582 m处; (b) 2025年5月11日拍摄于海拔2,918 m处; (c–d) 2024年2月1日和2025年2月24日分别于海拔3,360 m和3,594 m拍摄的黑麝舔食雪的场景。
Appendix 1　Camera trap images of the black musk deer (*Moschus fuscus*). (a) Captured on November 4, 2024, at an elevation of 3,582 m; (b) Captured on May 11, 2025, at an elevation of 2,918 m; (c–d) Images showing the black musk deer licking snow at elevations of 3,360 m and 3,594 m, captured on February 1, 2024, and February 24, 2025, respectively.



附录2　研究区域的黑麝(*Moschus fuscus*)及其同域有蹄类的影像。(a)黑麝; (b)喜马拉雅鬣羚; (c)喜马拉雅扭角羚; (d)赤斑羚; (e)贡山麂; (f)野猪。
Appendix 2　Images of black musk deer and sympatric ungulates in the study area. (a) *Moschus fuscus*; (b) *Capricornis thar*; (c) *Budorcas taxicolor*; (d) *Naemorhedus baileyi*; (e) *Muntiacus gongshanensis*; (f) *Sus scrofa*.

王倩倩, 陈孝国, 朱锐丰, 张明春, 王新, 李世林, 仁增江措, 彭武, 杨彪 (2026) 藏东南黑麝及其同域有蹄类物种的生态适应性差异. 生物多样性, 34, 25433. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025433



附录3　藏东南格当区域黑麝常出现位点的生境。(a)夏季; (b)冬季。

Appendix 3　Habitat of the common occurrence sites of black musk deer in Gedang, southeastern Xizang. (a) Summer; (b) Winter.

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 25261, pages 1–11
doi: 10.17520/biods.2025261
cstr: 32101.14.biods.2025261

•研究报告•

西南山地有蹄类栖息地利用率变化及环境影响：以关坝村红外相机监测为例

冯杰[1#], 李彦知[1#], 王书理[1], 李岚曦[1], 丁鹏飞[1], 吕冰薇[1], 孟吉[2], 史湘莹[1,3*], 李雪阳[1,4*]

1. 山水自然保护中心, 北京 100871; 2. 平武县关坝流域自然保护中心, 四川绵阳 622574; 3. 北京大学国家发展研究院, 北京 100871; 4. 北京大学生命科学学院, 北京 100871

摘要: 作为森林生态系统的关键组分, 山地有蹄类在维持生物多样性和生态系统功能方面具有重要作用。有蹄类的长期种群动态及其对人类活动的响应规律, 尤其在大型食肉动物缺位的区域, 仍缺乏长期监测和深入理解。本案例研究区域在中国西南山地、岷山山脉南部的绵阳市平武县关坝村(2019–2023年), 该地区因历史原因已无大型食肉动物分布, 有蹄类更可能受到环境资源和人类活动干扰制约。通过布设25个红外相机网格开展长期红外相机监测, 本研究重点分析了中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)、小鹿(*Muntiacus reevesi*)、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、野猪(*Sus scrofa*)、四川羚牛(*Budorcas tibetanus*) 5种常见有蹄类的栖息地利用率年际变化及占域率影响因素。结果发现, 除野猪外的其余4种有蹄类都表现出栖息地利用率和相对多度增长趋势, 其中四川羚牛的占域率从0.12 (2019年)提升至0.74 (2023年)。人类活动对不同物种的影响存在差异: 在单季节占域模型中, 仅四川羚牛在多个年份受距道路距离的正向影响显著(权重w = 0.92、1.00、0.52), 且均为距道路越远占域率越高。不同年份影响各有蹄类占域率的关键环境协变量存在类型和显著程度的差异, 表明不同年份的环境资源压力应存在差异, 有蹄类可以调整对不同类型栖息地的利用。本研究补充了大型食肉动物缺失区域有蹄类的种群变化动态, 探究了环境因素对有蹄类占域率的影响规律, 为西南山地生态系统的适应性管理提供了科学依据。

关键词: 有蹄类; 占域模型; 西南山地; 红外相机; 种群动态

冯杰, 李彦知, 王书理, 李岚曦, 丁鹏飞, 吕冰薇, 孟吉, 史湘莹, 李雪阳 (2026) 西南山地有蹄类栖息地利用率变化及环境影响: 以关坝村红外相机监测为例. 生物多样性, 34, 25261. doi: 10.17520/biods.2025261; cstr: 32101.14.biods.2025261.
Feng J, Li YZ, Wang SL, Li LX, Ding PF, Lü BW, Meng J, Shi XY, Li XY (2026) Dynamics of ungulate habitat use and their environmental drivers in the Southwest Mountains: A camera trap monitoring case study from Guanba. Biodiversity Science, 34, 25261. doi: 10.17520/biods.2025261; cstr: 32101.14.biods.2025261.

Dynamics of ungulate habitat use and their environmental drivers in the Southwest Mountains: A camera trap monitoring case study from Guanba

Jie Feng[1#], Yanzhi Li[1#], Shuli Wang[1], Lanxi Li[1], Pengfei Ding[1], Bingwei Lü[1], Ji Meng[2], Xiangying Shi[1,3*], Xueyang Li[1,4*]

1 *Shan Shui Conservation Center, Beijing 100871, China*
2 *Guanba Basin Conservation Center, Mianyang, Sichuan 622574, China*
3 *National School of Development, Peking University, Beijing 100871, China*
4 *School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*

ABSTRACT

Aims: Mountain ungulates are crucial components of forest ecosystems, playing a significant role in sustaining biodiversity and ecological functions. However, understanding of ungulate population dynamics based on systematic

收稿日期 Received: 2025-07-06; 接受日期 Accepted: 2026-01-20
基金项目: 蚂蚁森林关坝保护地项目和火溪河流域综合保护与发展项目 Supported by the Ant Forest Guanba Protection Site Project and the Huoxi River Basin Comprehensive Protection and Development Project
共同第一作者 Co-first authors
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: lixueyang@pku.edu.cn; xiangying.shi@pku.edu.cn

long-term monitoring, and their long-term responses to human activities remain limited, especially in areas where large carnivores are absent. This study aims to investigate the interannual changes of site use and the environmental factors influencing the occupancy of common ungulates in a region historically lacking large carnivores.
Methods: We conducted long-term monitoring by deploying 25 infrared camera grids in Guanba Village, Pingwu County, Mianyang City, located in the southern Minshan Mountains of Southwest China (2019–2023). We focused on analyzing the interannual changes of site use and the factors affecting the occupancy rate for five common ungulate species: Chinese goral (*Naemorhedus griseus*), Reeves's muntjac (*Muntiacus reevesi*), tufted deer (*Elaphodus cephalophus*), wild boar (*Sus scrofa*), and takin (*Budorcas tibetanus*).
Results: The findings revealed that four of the five monitored ungulate species (excluding wild boar) exhibited an increasing trend in both site use rate and relative abundance index. Notably, the occupancy rate of takins increased from 0.12 in 2019 to 0.74 in 2023. Model averaging of single-season occupancy models indicated that the impact of human activities varied across species: only takins were significantly and positively influenced by distance to roads across several years (weights of environmental variables, w = 0.92, 1.00, and 0.52 in respective years), consistently showing a preference for areas further from roads. The key environmental covariates affecting occupancy varied by species types and year, suggesting that ungulates flexibly adjust their habitat use in response to shifting environmental resource pressures.
Conclusion: This study provides a supplement to the population dynamics of ungulates in areas where large carnivores are absent and explores the patterns of environmental factors influencing ungulate occupancy rates. The results offer a scientific basis for the adaptive management of mountain ecosystems in Southwest China.
Key words: ungulates; occupancy model; Southwest Mountains; camera trap; population dynamics

山地有蹄类是森林生态系统的重要组成部分, 通过啃食、踩踏、排便、传播种子等行为, 可影响森林群落结构、食物链能量循环和生态系统功能, 被认为是生态系统的基石物种(Ramirez et al., 2018)。有蹄类种群通常受到两个方向的共同调控: 一方面是"自下而上" (bottom-up)的调控, 即受植被的质量、数量和可利用性等资源因素影响(McNaughton, 1976; Pierce et al., 2012); 另一方面是"自上而下" (top-down)的调控, 主要指顶级捕食者对有蹄类产生的直接或间接控制作用(Ripple & Beschta, 2008; Laundré et al., 2010)。与此同时, 人类活动也对这两个通路产生着影响。一方面, 通过土地利用变化、农业扩张和城市化等方式直接改变植被资源; 另一方面, 通过对捕食者种群的干预(捕猎、基础设施建设等), 影响了"自上而下"的调控链条(Muhly et al., 2013)。研究表明, 人类的干扰(如徒步、放牧等)可以像天敌一样影响有蹄类的行为, 甚至在某些情况下, 其影响强度超过了大型捕食者(Ciuti et al., 2012)。

在全球生物多样性丧失的背景下, 大型食肉动物在许多区域已普遍退缩或消失(Wolf & Ripple, 2017), 我国亦面临类似的情况(Li et al., 2020)。在顶级捕食者长期缺位的生态系统中, 有蹄类种群所承受的"自上而下"调控显著减弱, 其种群动态更可能受到资源限制和人类活动干扰的共同影响。然而, 这种调控结构的改变将会对有蹄类种群动态产生何种影响, 不同有蹄类对这些影响因素又是如何响应的, 只有在长期连续监测中才能被可靠识别。而现阶段, 国内有蹄类的研究主要集中在短期的时空分布、食性、活动节律、栖息地分析等方面(郑荣泉和鲍毅新, 2004; 李建亮等, 2020; 蒙秉顺等, 2023)。相较之下, 针对大型食肉动物缺失背景下, 有蹄类种群多年动态变化及其驱动因素的研究仍然较为匮乏, 这在一定程度上制约了对有蹄类受资源限制和人类干扰影响强度和机制的理解。

我国西南山地地区因历史人为活动, 多种顶级捕食者的分布与种群减少甚至消失(Li et al., 2020)。西南山地地区海拔高差大、生境多样、地理位置特殊, 生物多样性极为丰富, 是全球25个生物多样性热点地区之一(Myers et al., 2000), 这里栖息着丰富的野生有蹄类物种, 包括四川羚牛(*Budorcas tibetanus*)、中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)、野猪(*Sus scrofa*)、小鹿(*Muntiacus reevesi*)、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、水鹿(*Rusa unicolor*)、岩羊(*Pseudois nayaur*)、中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)等(田佳等, 2021), 生态保护价值高。在此开展长期有蹄类监测研究, 有助于揭示在捕食者缺位条件下, 有蹄类种群栖息地利用的年际变化特征, 及其对资源条件和人类活动干扰的响应规律, 从而为制定有效的野生动物管理和

生态系统恢复策略提供科学参考。

四川省绵阳市平武县关坝村位于西南山地岷山山脉南部, 本研究基于关坝村的红外相机长期监测数据, 回答两个主要科学问题: (1)自监测以来, 关坝村常见的5种有蹄类的种群变化动态; (2)识别影响有蹄类占域的关键环境因素。本研究旨在描述大型食肉动物缺位的背景下, 有蹄类在栖息地利用上的年际波动规律, 并探讨其对环境资源变化与人类干扰的响应特征, 从而为该区域野生动物的长期监测计划与保护管理策略的制定提供基础科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于四川省绵阳市平武县关坝村, 属于岷山山脉南麓, 经纬度范围在32.49°–32.58° N, 104.55°–104.65° E之间。关坝村属于亚热带山地湿润季风气候, 气候温和、四季分明, 拥有典型的温带山地森林生态系统, 海拔由低到高分布着常绿阔叶林、落叶阔叶林和针叶林等植被类型。关坝村东北部毗邻唐家河国家级自然保护区, 东南邻老河沟自然保护区, 南面为余家山县级自然保护区, 西面是小河沟省级自然保护区, 周边区域是大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)、四川羚牛等珍稀保护动物的栖息地(肖梅等, 2025)。由于历史性打猎、森林砍伐等原因, 该区域有蹄类种群受到了较大影响。直到2010年, 当地打猎现象仍然较为频繁, 从2016年开始, 关坝村开展定期巡护行动, 加大了生态保护力度, 并将关坝村范围划定为平武县关坝沟流域自然保护小区, 自主实施保护措施。2021年, 该保护小区被纳入大熊猫国家公园四川片区(图1)。本研究在保护小区范围内开展, 面积约40.3 km^2。

1.2 研究方法

1.2.1 红外相机布设与数据识别

从2018年开始, 在关坝村按照每2 km^{2}面积划分监测网格, 共计25个网格, 调查海拔范围约1,100–3,400 m。在每个网格内选取合适的位点安装相机, 总计设置25个相机位点开展长期监测(图2), 本研究基于连续多年的红外相机数据进行分析。相机布设在兽道、水源地或动物标记点, 距离地面垂直高度约50–80 cm处, 布设时清除镜头前的树枝、杂草等遮挡物。由于地形可达性等因素, 编号为GB10和GB11的相机位点布设在同一网格中; 部分位点在某些时段架设了两台临近的相机相互补充。各网格相机位点间的平均距离为958 m, 最小间距均在500 m以上(544–1,616 m)。相机设置为“拍照 + 视频”模式, 触发时连拍3张照片及30 s视频, 触发间隔为0 s, 全天24 h工作。当地的巡护队每隔3–4个月回收一次红外相机, 并根据相机工作情况对相机位点进行短距离的调整。

物种鉴定参考《中国兽类野外手册》(Smith和解焱, 2009), 在digiKam 7.0中将物种标签写入媒体元数据, 在R 4.3中利用camtrapR程序包提取物种捕获记录(包含物种名称、记录位点、记录时间等相关信息), 按同一物种在同一位点每30 min内的记录作为一次独立捕获, 统计物种独立捕获次数, 并使用最常见的每100个工作日物种的独立捕获次数计算物种相对多度(陈立军等, 2019), 作为研究区域的兽类本底信息。

1.2.2 占域模型分析

为解决引言中提到的两个主要科学问题, 本研

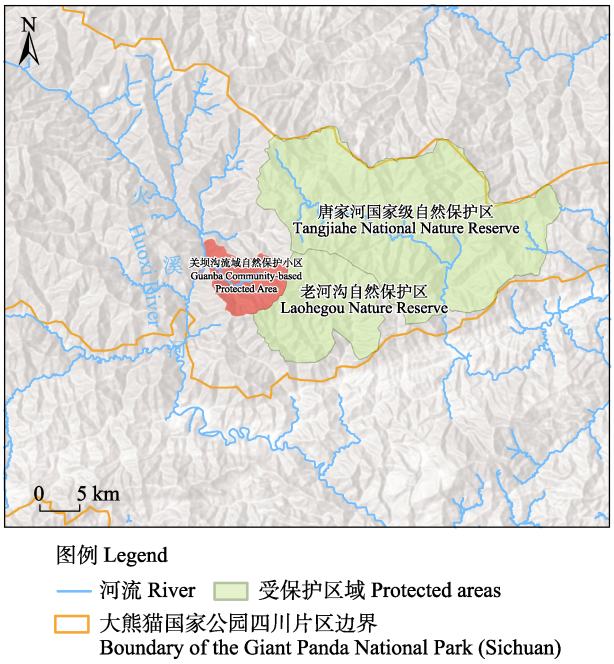


图1 四川省平武县关坝沟流域自然保护小区地理位置示意图

Fig. 1 The location of Guanba Community-based Protected Area, Pingwu County, Sichuan Province

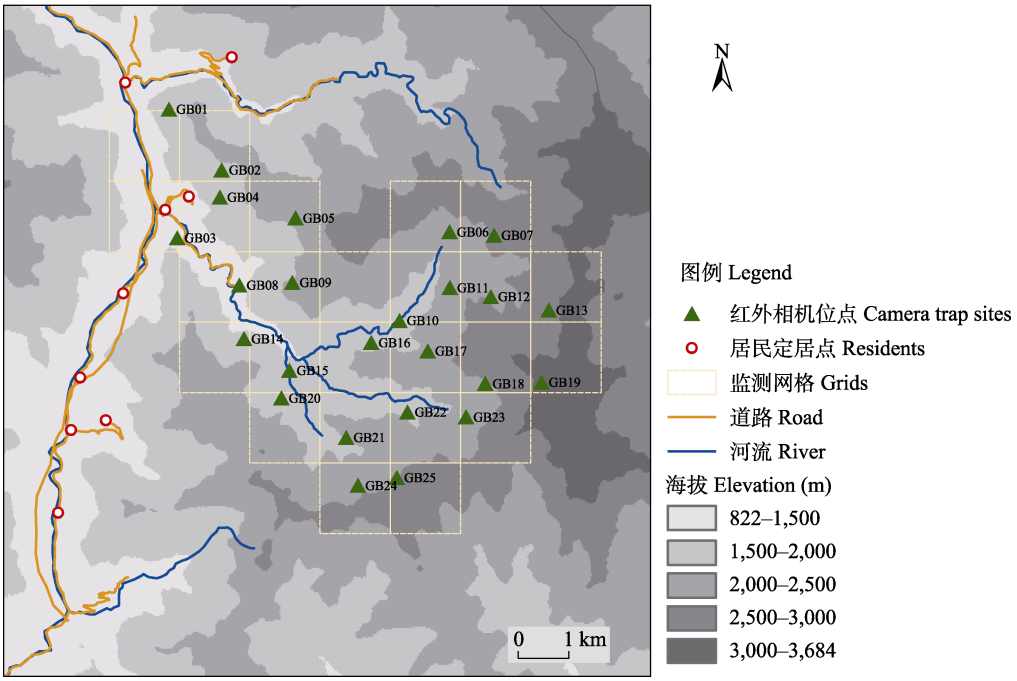


图2　四川省平武县关坝沟流域自然保护小区网格化红外相机监测示意图
Fig. 2　The grids of infrared-camera monitoring in Guanba Community-based Protected Area, Pingwu County, Sichuan Province

究采用占域模型进行分析, 红外相机监测结合占域模型分析, 可以便捷有效地评估野生动物的分布与动态变化。占域模型最早由MacKenzie等(2002)提出, 通过重复探测, 估算物种单次探测率, 从而估算物种占据某斑块的概率, 并根据不同斑块的环境特征, 研究物种空间占域率的环境影响因素。多季节占域模型引入建群率(γ)和局部灭绝率(ε)两个参数, 结合对同一探测区域不同季节的重复调查, 可对种群动态进行评估。建群率即初始调查时未被占域的调查单元在后续调查季节间被成功占据的概率, 反映物种的扩散能力和栖息地连通性; 局部灭绝率即初始调查时被占域区域在后续季节间不再占域的概率, 反映种群的局部脆弱性和栖息地质量。

占域模型的基本假设之一是种群闭合, 即在重复探测期间, 调查单元的占域状态保持不变。然而, 对于年度尺度的数据分析来说, 调查单元的物种状态往往难以保持完全闭合。在这种情况下, 模型估算的参数占域率不再严格代表物种“占据”该位点的概率, 而应被理解为物种对该位点的“栖息地利用率”, 即物种在研究时段内出现在该位点的概率(MacKenzie et al., 2006)。

在初步建模中, 引入环境协变量对于各参数进行模拟时模型不收敛, 其原因是模型参数和协变量过多。因而本研究选择针对研究问题分别建模: 第一个科学问题关注有蹄类的年际间变化, 建立不引入环境变量的多季节占域模型, 使用全年的数据纳入模型, 因而模型获得的结果为每年的建群率、局部灭绝率和栖息地利用率; 第二个科学问题关注环境变量如何影响有蹄类的占域率, 按年建立单季节模型, 为了符合种群闭合假设和避免季节间波动, 每年选取一个季度的数据建模, 获得各环境因素对占域率的影响。根据相机工作时长及工作位点的数量, 选取每年4–6月的有蹄类红外相机记录进行分析, 4–6月是植物生长季节, 有蹄类更活跃。

本研究筛选出5种相对多度高的有蹄类进行分析, 包括中华斑羚、毛冠鹿、小鹿、野猪和四川羚牛。由于相机从2018年6月开始布设, 2018年布设总时长短, 为保证调查努力一致, 本研究选取了关坝村2019–2023年全年完整的红外相机数据来分析有蹄类的年际栖息地利用率动态变化。在R 4.3中利用camtrapR程序包, 以10天作为一个探测周期, 分别统计每个周期内各位点有无探测到目标物种, 探测到记录为1, 没有探测到记录为0, 相机未工作记录为NA, 建立目标物种的探测历史。其中某些位点有

两台相近相机的, 选择工作时长更长、探测次数更多的相机记录。将每年的探测历史作为一个探测季节, 使用unmarked程序包中的colext函数建立物种多季节模型, 得到物种每年的建群率和局部灭绝率, 并使用Weir等(2009)的方法计算物种每年的栖息地利用率。

构建单季节模型分析环境因素对占域率的影响时, 本研究使用了每年4–6月的数据, 数据准备方法同多季节模型。在单季节模型的探测概率协变量上, 将每个周期内相机工作天数作为探测率的协变量建立模型, 与零模型对比, 如果赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)差值小于2, 选择零模型作为后续纳入占域率协变量建模的基本模型; 如果大于2, 选AIC更小的作为基本模型。以往文献显示, 岷山地区有蹄类的占域率受到海拔高度、地形因素、距水源距离、距道路距离的影响(韩一敏等, 2024; 龚翠凤等, 2025), 对不同植被类型的取食偏好也可能影响有蹄类的占域率; 人类活动也可能通过多种途径影响野生有蹄类占域率, 包括直接的活动影响, 及家养有蹄类(家牛、家羊)的潜在竞争。最终, 本研究在基本模型的基础上, 在占域率协变量上引入了海拔、崎岖度、坡度、栖息地类型、家畜的红外相机相对多度、距河流距离、距村落距离、距道路距离来进行分析, 各变量来源及处理方式见附录1。将所有环境变量标准化之后进行Pearson相关性分析, 对于相关系数大于0.6的环境变量, 考虑到各个变量单独建模时模型的收敛情况以及尽可能保留更多变量信息, 最后保留了崎岖度、坡度、距河流距离、距道路距离、常绿阔叶林占比、落叶阔叶林占比和2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度一共7个环境变量。对于5个有蹄类物种数据分别测试各个变量组合, 去除不收敛的模型后, 按照AIC值对模型进行排序, 选取与最优模型AIC差值小于4的模型进行平均, 得到每年有蹄类的平均占域率以及环境因子对有蹄类占域率的影响(Burnham & Anderson, 2002)。选取AIC小于4的模型, 将含有相同环境协变量的模型的权重相加, 作为该环境变量的权重, 这反映了该环境变量对目标物种占域率的影响程度, 其中权重大于0.5说明该环境变量的影响程度显著(MacKenzie et al., 2006)。

2 结果

2019–2023年间, 在关坝村共调查28,151个相机工作日, 平均每年工作日累计超过5,600个, 食肉动物除黑熊(*Ursus thibetanus*)记录相对较多外(红外相机相对多度: 0.28–0.72), 金猫(*Catopuma temminckii*)、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)的记录次数较少(各年份红外相机相对多度均在0.20以下), 以大型有蹄类为食的顶级捕食者缺失。有蹄类包括中华斑羚、毛冠鹿、小鹿、野猪、四川羚牛、林麝(*Moschus berezovskii*)、中华鬣羚7种, 其中5种较常见: 2019–2023年间, 中华斑羚的独立探测数为2,185, 朴素占域率(也即观测到目标物种的位点数占总调查位点数的比例)为0.68–0.92, 相对多度指数为6.04–10.09; 毛冠鹿的独立探测数为894, 朴素占域率为0.32–0.68, 相对多度指数为1.86–4.90; 小鹿的独立探测数为754, 朴素占域率为0.20–0.48, 相对多度指数为0.89–4.99; 野猪的独立探测数为430, 朴素占域率为0.32–0.68, 相对多度指数为0.27–2.91; 四川羚牛的独立探测数为418, 朴素占域率为0.32–0.60, 相对多度指数为0.64–3.24。其余物种记录信息见附录2。

2.1 有蹄类栖息地利用率年际间变化

多季节占域模型结果显示, 不同有蹄类每年的栖息地利用率及动态存在差别(图3)。其中, 中华斑羚多年的栖息地利用率都处于较高水平(> 0.65), 各年份间建群率(0.53–1.00)均高于灭绝率(0.00–0.17), 表明中华斑羚在研究区域内有扩散趋势和稳定的栖息地利用水平。小鹿和毛冠鹿的利用率波动增长: 小鹿的栖息地利用率偏低(0.24–0.49), 各年份间建群率(0.00–0.21)和局部灭绝率(0.00–0.21)较接近; 毛冠鹿的栖息地利用率波动较大(0.13–0.69), 其中2021年降低较多, 2020–2021年间也呈现出局部灭绝率(0.70)明显大于建群率(0.00); 野猪的栖息地利用率较高(0.48–0.70), 其动态过程呈现出建群与局部灭绝的频繁转换, 表现在建群率和局部灭绝率的数值相对大小趋势在年份间不稳定; 四川羚牛的栖息地利用率也有增加的趋势(0.32–0.66), 除2020–2022年外, 其余年份均为建群率高于局部灭绝率。各有蹄类建群率及局部灭绝率信息见附录3。

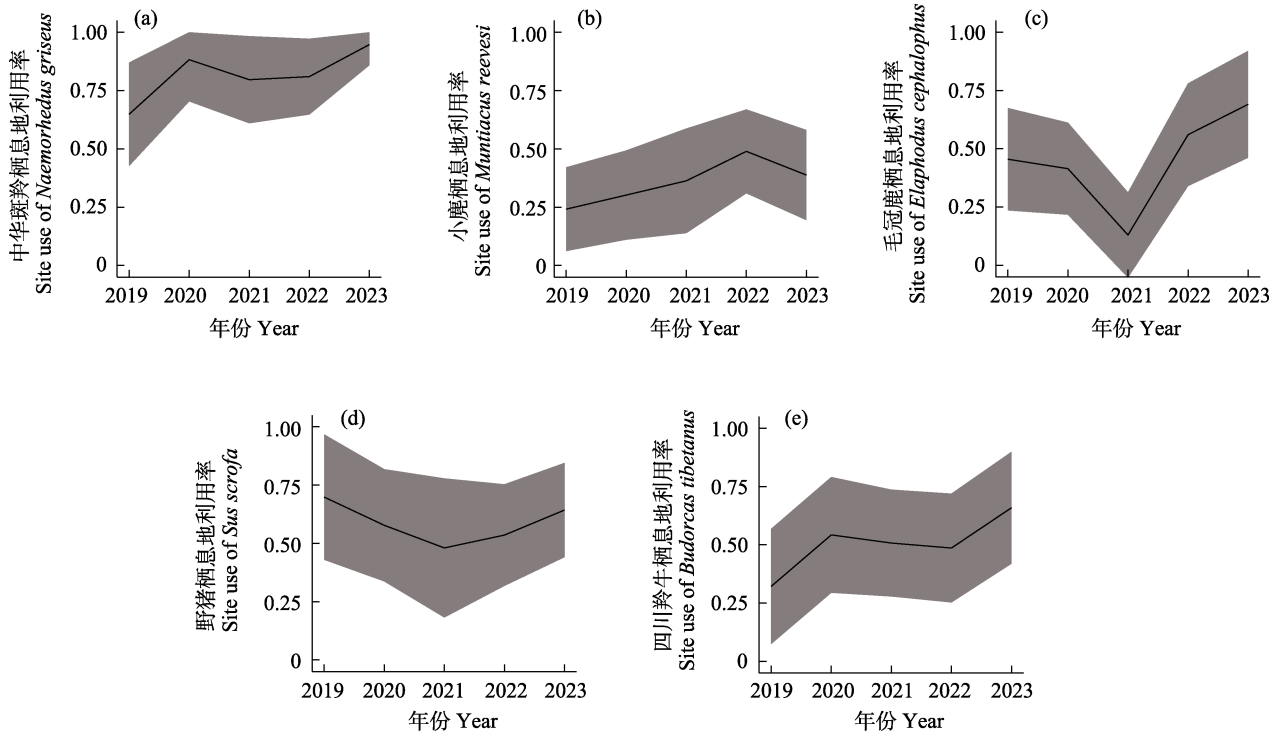


图3　四川省平武县关坝沟流域自然保护小区5种常见有蹄类2019–2023年每年的栖息地利用率及95%置信区间(灰色区域所示)
Fig. 3　The site use and 95% confidence interval (indicated by the gray area) of five common ungulate species in Guanba Community-based Protected Area, Pingwu County, Sichuan Province, from 2019 to 2023

2.2　环境因素对有蹄类占域率的影响

分析表明, 环境因素对不同有蹄类占域率的影响存在差异, 各物种的具体分析结果分述如下。

(1)中华斑羚。统计中华斑羚每年的单季节占域模型结果发现, 中华斑羚每年4–6月的平均占域率(0.80–0.98)和探测率(0.37–0.50)稳定。在影响占域率的环境协变量中, 距河流距离、距道路距离、常绿阔叶林占比和坡度参与了各个年份的模型平均。其中, 2019年距道路距离的权重较大(w = 0.66), 为正向影响(影响系数β = 1.59 ± 1.35), 也即距离道路越远, 占域率越高; 2023年坡度的权重大(w = 0.72), 为负向影响(β = −2.25 ± 1.66), 也即坡度越高, 占域率越低。其余年份各环境变量对占域率的影响程度不显著(表1, 各有蹄类模型平均情况详见附录4)。

(2)小鹿。小鹿每年的占域率偏低(0.01–0.47); 除2019年外(0.90), 探测率稳定在0.30–0.38。距道路距离、常绿阔叶林占比、落叶阔叶林占比、坡度、崎岖度参与了各个年份的模型平均(表1)。距道路距离在2020年、2021年和2023年对小鹿占域率有显著影响(w = 0.93、0.50、0.92), 且均为负向影响(β = −3.21 ± 2.76、−1.11 ± 0.90、−2.39 ± 1.68), 也即距离道路越远, 占域率越低; 此外, 崎岖度、落叶阔叶林占比在2023年影响显著, 权重占比分别为0.68、0.57, 崎岖度为负向影响(β = −4.53 ± 3.53), 也即崎岖度越高, 占域率越低, 落叶阔叶林占比影响倾向不明显(β = −5.67 ± 5.81)。

(3)毛冠鹿。毛冠鹿每年的探测率较为稳定(0.24–0.47), 占域率波动较大(0.09–0.75)。除2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度外, 其余环境因子每年都参与了模型平均, 分析环境因子对占域率的影响, 发现2019、2020年常绿阔叶林占比对其有显著影响(w = 0.97、0.97), 且偏向正向影响(β = 2.13 ± 1.34、3.81 ± 3.70); 落叶阔叶林占比在2019年影响较大(w = 0.67), 影响倾向不明显(β = −5.79 ± 6.36); 2020年, 距河流距离对其有显著影响, 但影响方向不明显(w = 0.68, β = 4.60 ± 4.75); 2022年距道路距离的影响程度较大(w = 0.52), 为负向影响(β = −3.52 ± 2.66), 也即距离道路越远, 占域率越低(表1)。

表1　2019–2023年每年单季节占域模型平均得到的各有蹄类物种占域率、探测率、环境因子影响参数及权重(*表示权重超过0.5)
Table 1　The occupancy, detection probability of ungulate species, β coefficients and weights of environmental variables (* represents weight > 0.5) from 2019 to 2023

物种 Species		年份 Year				
		2019	2020	2021	2022	2023
中华斑羚 *Naemorhedus griseus*	占域率 Occupancy	0.80 ± 0.25	0.98 ± 0.06	0.96 ± 0.09	0.97 ± 0.10	0.97 ± 0.07
	探测率 Detection probability	0.38 ± 0.06	0.50 ± 0.04	0.43 ± 0.05	0.37 ± 0.04	0.48 ± 0.04
	距河流距离 Distance to river	0.75 ± 1.12	3.80 ± 4.74	1.56 ± 2.83	3.94 ± 4.34	1.22 ± 1.45
	距道路距离 Distance to road	1.59 ± 1.35*	0.96 ± 1.29	1.16 ± 0.95	3.55 ± 3.94	−1.32 ± 2.06
	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest	0.16 ± 0.92	−1.68 ± 1.95	−1.55 ± 2.30	1.72 ± 1.86	−0.71 ± 1.30
	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest	−2.17 ± 2.75	4.31 ± 7.07	−0.74 ± 2.10	–	1.61 ± 4.51
	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	−0.65 ± 0.85	–	–	−4.24 ± 6.61	–
	坡度 Slope	1.55 ± 1.24	1.44 ± 1.65	−3.94 ± 3.37	0.39 ± 1.28	−2.25 ± 1.66*
	崎岖度 Vector ruggedness measure	3.85 ± 3.62	3.12 ± 3.16	1.07 ± 1.41	1.59 ± 3.03	–
小鹿 *Muntiacus reevesi*	占域率 Occupancy	0.02 ± 0.09	0.01 ± 0.05	0.16 ± 0.13	0.47 ± 0.16	0.06 ± 0.12
	探测率 Detection probability	0.90 ± 0.20	0.38 ± 0.09	0.34 ± 0.10	0.31 ± 0.06	0.30 ± 0.07
	距河流距离 Distance to river	–	−1.09 ± 1.47	0.10 ± 1.10	−0.68 ± 0.87	−0.08 ± 1.38
	距道路距离 Distance to road	−1.01 ± 1.33	−3.21 ± 2.76*	−1.11 ± 0.90*	−0.92 ± 0.76	−2.39 ± 1.68*
	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest	2.21 ± 2.20	0.70 ± 1.58	0.15 ± 0.82	0.11 ± 0.77	−0.76 ± 1.08
	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest	−6.06 ± 9.58	2.00 ± 2.03	0.18 ± 1.44	−0.77 ± 0.96	−5.67 ± 5.81*
	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	–	–	–	−0.90 ± 1.68	1.79 ± 2.68
	坡度 Slope	0.20 ± 1.04	2.93 ± 3.42	1.26 ± 1.16	−0.18 ± 0.71	0.59 ± 1.06
	崎岖度 Vector ruggedness measure	−3.54 ± 3.98	−5.75 ± 6.84	−1.67 ± 2.05	1.15 ± 1.49	−4.53 ± 3.53*
毛冠鹿 *Elaphodus cephalophus*	占域率 Occupancy	0.18 ± 0.33	0.27 ± 0.16	0.09 ± 0.11	0.75 ± 0.31	0.64 ± 0.20
	探测率 Detection probability	0.30 ± 0.06	0.47 ± 0.08	0.46 ± 0.11	0.24 ± 0.06	0.33 ± 0.06
	距河流距离 Distance to river	−0.47 ± 0.99	4.60 ± 4.75*	0.82 ± 1.45	−0.36 ± 1.19	0.41 ± 0.77
	距道路距离 Distance to road	0.23 ± 1.04	−0.41 ± 1.00	−1.22 ± 0.95	−3.52 ± 2.66*	−0.69 ± 0.72
	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest	2.13 ± 1.34*	3.81 ± 3.70*	1.33 ± 1.32	0.50 ± 0.75	−0.11 ± 0.70
	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest	−5.79 ± 6.36*	0.66 ± 0.95	−3.09 ± 4.00	−0.65 ± 1.57	2.63 ± 3.50
	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	0.11 ± 0.90	–	–	–	–
	坡度 Slope	−0.91 ± 2.09	0.73 ± 0.87	0.42 ± 1.07	0.80 ± 1.08	−0.56 ± 0.71
	崎岖度 Vector ruggedness measure	1.47 ± 1.85	2.15 ± 1.85*	−0.43 ± 1.38	0.46 ± 0.86	−1.25 ± 1.65
野猪 *Sus scrofa*	占域率 Occupancy	0.81 ± 0.35	0.02 ± 0.06	–	0.58 ± 0.26	0.41 ± 0.12
	探测率 Detection probability	0.17 ± 0.05	0.30 ± 0.09	–	0.17 ± 0.05	0.38 ± 0.07
	距河流距离 Distance to river	−2.66 ± 3.18	−1.35 ± 1.56	–	0.10 ± 0.97	−0.52 ± 0.57
	距道路距离 Distance to road	−0.43 ± 0.80	−2.58 ± 2.24*	–	−1.75 ± 1.26*	−0.32 ± 0.55
	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest	0.70 ± 1.41	0.42 ± 1.35	–	–	0.05 ± 0.55
	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest	4.63 ± 6.20	−5.07 ± 4.49*	–	−0.70 ± 1.62	−0.09 ± 0.87

表1 (续) Table 1 (continued)

物种 Species		年份 Year				
		2019	2020	2021	2022	2023
野猪 *Sus scrofa*	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	–	–	–	–	0.26 ± 0.48
	坡度 Slope	−1.65 ± 2.00	1.02 ± 0.96	–	−1.62 ± 1.98	−0.29 ± 0.49
	崎岖度 Vector ruggedness measure	−0.41 ± 1.47	−4.37 ± 6.61	–	−1.69 ± 2.14	−0.15 ± 0.48
四川羚牛 *Budorcas tibetanus*	占域率 Occupancy	0.12 ± 0.14	0.07 ± 0.22	0.04 ± 0.13	0.32 ± 0.27	0.74 ± 0.46
	探测率 Detection probability	0.24 ± 0.10	0.21 ± 0.08	0.19 ± 0.05	0.18 ± 0.07	0.21 ± 0.06
	距河流距离 Distance to river	0.04 ± 1.41	0.57 ± 1.76	1.48 ± 3.26	1.55 ± 1.81	−1.76 ± 2.55
	距道路距离 Distance to road	2.58 ± 1.92*	–	6.63 ± 5.65*	1.25 ± 1.46	1.49 ± 1.38*
	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest	−0.68 ± 0.94	−1.06 ± 0.86*	0.17 ± 1.49	−0.34 ± 1.18	−2.72 ± 3.49*
	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest	0.35 ± 1.80	−6.71 ± 8.09*	–	−3.14 ± 1.85*	−1.78 ± 3.52
	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	–	–	–	–	0.34 ± 1.11
	坡度 Slope	0.69 ± 1.07	0.81 ± 1.10	−0.03 ± 1.18	1.95 ± 2.16	−0.19 ± 1.08
	崎岖度 Vector ruggedness measure	0.79 ± 0.93	0.08 ± 0.87	−1.62 ± 1.95	2.08 ± 3.26*	0.50 ± 2.97

(4)野猪。2021年由于4–6月野猪的探测次数太少, 难以建模, 因此分析其他年份野猪的占域模型结果, 可以看出2019–2023年间野猪的探测率较为稳定(0.17–0.38), 占域率除2020年外(0.02), 其余年份处于较高水平(0.41–0.81)。2020年和2022年的距道路距离对野猪的占域的影响显著(w = 1.00、0.89), 偏向负向影响(β = −2.58 ± 2.24、−1.75 ± 1.26), 也即距离道路越远, 占域率越低; 落叶阔叶林占比在2020年影响显著(w = 0.83), 偏向负向影响(β = −5.07 ± 4.49); 2019年和2023年各环境因素的影响均不显著(表1)。

(5)四川羚牛。四川羚牛2019–2021年的占域率较低(0.04–0.12), 2022年有所增加(0.32), 而在2023年则高达0.74, 每年的探测率则较稳定(0.18–0.24)。分析每年影响四川羚牛占域率的环境因素发现, 距道路距离在2019年、2021年、2023年的影响程度显著(w = 0.92、1.00、0.52), 且均为正向影响(β = 2.58 ± 1.92、6.63 ± 5.65、1.49 ± 1.38), 也即距道路越远, 四川羚牛占域率越高(表1)。

3 讨论

从2019–2023年的红外相机监测结果来看, 关坝村的兽类种群以有蹄类为主, 中小型食肉动物捕获次数少, 未监测到以大型有蹄类为主要猎物的大型食肉动物。关坝村位于岷山山脉, 岷山其他区域的研究也呈现了相似的情况, 例如四川雪宝顶国家级自然保护区、四川唐家河国家级自然保护区的红外相机监测显示, 保护区内的兽类以四川羚牛、野猪、中华斑羚等有蹄类为主, 食肉动物种类少且相对多度较低, 大型食肉动物如豹(*Panthera pardus*)、狼(*Canis lupus*)等近些年在岷山地区未有记录(姬云瑞等, 2021; 田佳等, 2021; 肖梅等, 2025)。在此情况下, 野生有蹄类的种群动态应主要受食源和人类活动影响。

从2019–2023年的多季节占域模型结果来看, 关坝村的中华斑羚、小鹿、毛冠鹿、四川羚牛都表现出了栖息地利用率波动上升的趋势, 而野猪则在降低后回升, 总体表现平稳, 与红外相机相对多度所呈现的趋势一致。当物种家域面积小于等于监测网格面积时, 其占域率可以反映其种群大小(Linden et al., 2017)。从以往文献发现, 在中国台湾的研究中, 小鹿家域范围的95%置信区间为0.4–1.4 km^2 (McCullough et al., 2000), 通过粪便DNA计算的浙江山区小鹿家域面积约0.4–1.8 km^2 ①; 中华斑羚、

① 龚堃 (2016) 基于粪便分子生物学的小鹿个体识别及家域研究. 硕士学位论文, 浙江师范大学, 浙江金华.

毛冠鹿的家域面积相关研究较少, 内蒙古赛罕乌拉国家级自然保护区利用颈圈数据估计的中华斑羚家域为0.07–0.5 km^2 (Yin et al., 2024), 毛冠鹿和小鹿同属小型鹿类, 食性相近, 所以推测, 关坝村的中华斑羚、小鹿、毛冠鹿的活动范围小于监测网格面积(2 km^2)的可能性较大。虽然因数据所限, 本研究未能直接通过多季节占域模型获得占域率变化, 但栖息地利用率与红外相机相对多度一致的上升趋势, 显示了中华斑羚、小鹿、毛冠鹿很有可能在2019–2023年间经历了种群增长。而野猪家域面积较大, 从几十到几百平方公里不等(王文等, 2007; Jánoska et al., 2018), 四川羚牛的家域个体差异较大(官天培等, 2015), 因此其占域率只能反映野猪和四川羚牛种群对关坝这片区域的利用率。在调查期间, 四川羚牛栖息地利用率平稳增加, 而野猪栖息地利用率有波动, 但前后相比较为一致。由于二者经常集群活动, 而群体数量并未反映在占域率和相对多度中, 后续应该采用更多元化的方法来监测四川羚牛和野猪种群, 比如样线调查、痕迹调查、粪堆计数、DNA检测等(Engeman et al., 2013)。

单季节占域模型结果显示, 影响5种有蹄类占域率的环境变量在年际间表现出动态转换和波动性, 不同有蹄类对人类活动干扰和栖息地资源的响应存在差异。在2019–2023年间, 中华斑羚占域率的主导因素从2019年的距道路距离转向2023年的坡度, 且距道路距离从最初的正向影响转为了负向影响, 也即从距离道路越近, 占域率越低转为越高。这样的变化反映出中华斑羚的占域率限制因素从人为干扰转向栖息地环境, 且应对人类活动干扰有一定容忍度。毛冠鹿的主导因素也从常绿阔叶林占比(2019、2020年)转移至距道路距离(2022年), 且距道路距离影响也为负向, 也即靠近道路的区域占域率高。

在人类活动环境协变量中, 距道路距离对5种有蹄类均有影响, 但其影响方向及影响程度的年际波动较大。距道路距离对中华斑羚、小鹿、野猪和毛冠鹿的占域率在近年来有显著的负向影响, 也即越靠近道路占域率反而越高; 而四川羚牛对道路的排斥(正向影响)在2019、2021和2023年均显著。在该区域大型食肉动物缺失的背景下, 道路可从两个途径共同影响有蹄类: 一方面, 道路上频繁的人类活动可能会“自上而下”产生影响, 使有蹄类回避(阿卜杜赛麦提·买尔迪亚力等, 2022), 例如四川羚牛对道路的排斥, 但因保护行动的开展, 部分有蹄类也可能会逐渐适应道路周边的人类活动。另一方面, 道路周边的植被因频繁干扰通常为演替早期的植物种类, 这种植被类型的特殊性影响了有蹄类的食源, 从而可“自下而上”地影响有蹄类的活动; 以往研究中, 在广食性有蹄类中观察到了此种现象(Wirth et al., 2008)。由于本研究中距道路距离和海拔高度相关程度较高(相关系数 > 0.6), 该结果可能也受到了不同有蹄类对不同海拔高度栖息地偏好的影响。要进一步验证这些猜想, 也需要补充更多的道路两侧植被信息, 及有蹄类的食性信息。

将多季节与单季节占域模型的结果结合来看, 可初步推测野生有蹄类栖息地利用率的变化规律和制约因素。人类活动可能限制有蹄类活动扩张范围: 多季节占域模型显示四川羚牛占域率从0.04大幅度增至0.74, 结合单季节占域模型中其对道路的持续回避, 表明其利用率增长可能主要发生在远离人类活动干扰的区域。资源限制与潜在适应策略: 毛冠鹿在2019–2021年栖息地利用率持续降低, 2020–2021年间局部灭绝率陡增(0.70), 结合2020年模型中“常绿阔叶林占比”和“距河流距离”等资源驱动特征, 推测该阶段波动可能受关键生境资源数量的制约; 而随后2022年其利用率恢复且关键影响因子转向“距道路距离” (负向影响), 且2019–2022年间该变量参数绝对值持续增加, 这一转变可能反映了毛冠鹿在资源压力或保护背景下, 表现出了对人类干扰区域更高的行为适应性, 从而通过拓宽生态位来维持种群利用水平。但考虑到本研究缺乏对于气候及保护行动相关变量的分析, 以上两点推测有待后续补充相关数据进一步研究支撑。

有蹄类种群的潜在增长, 表明关坝村的生态保护起到了一定成效, 对于未来该地区食肉动物的恢复来说有一定正向作用。但现阶段由于缺少食肉动物的控制, 且人类活动的影响对除四川羚牛外的有蹄类均不显著, 如果有蹄类增长过快, 可能会加剧当地的人兽冲突。比如野猪, 由于喜食庄稼、繁殖能力强, 对人有一定的攻击性, 近些年来, 在华南山区、西南山地、陕西秦岭、东北林区等都有广泛的肇事记录, 对当地的农业造成了较大的经济损失

(王亚辉等, 2023); 毗邻关坝的四川唐家河国家级自然保护区在1999年的栖息地调查中发现, 四川羚牛、野猪的遇见率是最高的, 且对周边农作物造成了很大的损害(冉江洪等, 2002); 关坝村的野猪、四川羚牛等也有损害庄稼的记录, 因此后续对于野猪、四川羚牛等容易造成人兽冲突的物种, 需要加强种群监测, 掌握更多样化的种群信息, 弄清种群数量、分布的时空变化, 从而有针对性地为以后的野生动物保护行动、人兽冲突措施等提供科学指导。

ORCID

冯杰 https://orcid.org/0000-0003-2680-6080
史湘莹 https://orcid.org/0000-0003-4017-7495
李雪阳 https://orcid.org/0000-0003-1873-9439

参考文献

Abudusaimaiti M, Wang Y, Tao SC, Kong YP, Wang H, Lü Z (2022) Research status and challenges of road impacts on wildlife in China. Biodiversity Science, 30, 22209. (in Chinese with English abstract) [阿卜杜赛麦提·买尔迪亚力, 王云, 陶双成, 孔亚平, 王昊, 吕植 (2022) 我国道路对野生动物影响研究的现状与挑战. 生物多样性, 30, 22209.]

Burnham KP, Anderson DR (2002) Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. Springer, New York.

Chen LJ, Shu ZF, Xiao ZS (2019) Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve. Biodiversity Science, 27, 266–272. (in Chinese with English abstract) [陈立军, 束祖飞, 肖治术 (2019) 应用红外相机数据研究动物活动节律——以广东车八岭保护区鸡形目鸟类为例. 生物多样性, 27, 266–272.]

Ciuti S, Northrup JM, Muhly TB, Simi S, Musiani M, Pitt JA, Boyce MS (2012) Effects of humans on behaviour of wildlife exceed those of natural predators in a landscape of fear. PLoS ONE, 7, e50611.

Engeman RM, Massei G, Sage M, Gentle MN (2013) Monitoring wild pig populations: A review of methods. Environmental Science and Pollution Research, 20, 8077–8091.

Gong CF, Wei W, Luo G, Han YM, Wu PC, He MN, Min QY, Fu Q, Chen P (2025) Spatial distribution and coexistence of ungulates in Chongzhou Area of Giant Panda National Park. Biodiversity Science, 33, 24260. (in Chinese with English abstract) [龚翠凤, 韦伟, 罗概, 韩一敏, 吴鹏程, 何梦楠, 闵清悦, 付强, 陈鹏 (2025) 大熊猫国家公园崇州片区有蹄类动物空间分布及共存关系. 生物多样性, 33, 24260.]

Guan TP, Ge BM, Chen LM, You ZQ, Tang ZH, Liu H, Song YL (2015) Home range and fidelity of Sichuan takin. Acta Ecologica Sinica, 35, 1862–1868. (in Chinese with English abstract) [官天培, 葛宝明, 谌利民, 游章强, 唐中海, 刘昊, 宋延龄 (2015) 四川羚牛的家域与忠诚度. 生态学报, 35, 1862–1868.]

Han YM, Xiao M, He MN, Li MF, Hou R, Wu PC, He F, Chen LM, Hu J, Chen P (2024) The activity rhythm and space utilization among six species of ungulates in Tangjiahe National Nature Reserve, Sichuan, China. Acta Theriologica Sinica, 44, 598–610. (in Chinese with English abstract) [韩一敏, 肖梅, 何梦楠, 李明富, 侯蓉, 吴鹏程, 何芳, 谌利民, 胡杰, 陈鹏 (2024) 唐家河国家级自然保护区同域分布六种偶蹄类动物的活动节律与空间利用. 兽类学报, 44, 598–610.]

Jánoska F, Farkas A, Marosán M, Fodor JT (2018) Wild boar (*Sus scrofa*) home range and habitat use in two Romanian habitats. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 14, 51–63.

Ji YR, Tao Y, Li CL, Li DQ, Zhao D, Liu F (2021) Using camera traps to survey mammals and birds in Sichuan Xuebaoding National Nature Reserve. Biodiversity Science, 29, 805–810. (in Chinese with English abstract) [姬云瑞, 陶义, 李昌林, 李迪强, 赵定, 刘芳 (2021) 利用红外相机调查四川雪宝顶国家级自然保护区鸟类和兽类多样性. 生物多样性, 29, 805–810.]

Laundré JW, Hernández L, Ripple WJ (2010) The landscape of fear: Ecological implications of being afraid. The Open Ecology Journal, 3, 1–7.

Li JL, Li JQ, Wang L, Pei PZ, Ma DH, Zhuo MY, Bao XK (2020) The analysis on activity rhythms of several ungulates in extreme arid desert region based on infrared camera data. Acta Theriologica Sinica, 40, 120–128. (in Chinese with English abstract) [李建亮, 李佳琦, 王亮, 裴鹏祖, 马东辉, 禚孟雅, 包新康 (2020) 基于红外相机技术分析极旱荒漠有蹄类动物的活动节律. 兽类学报, 40, 120–128.]

Li S, McShea WJ, Wang DJ, Gu XD, Zhang XF, Zhang L, Shen XL (2020) Retreat of large carnivores across the giant panda distribution range. Nature Ecology & Evolution, 4, 1327–1331.

Linden DW, Fuller AK, Royle JA, Hare MP (2017) Examining the occupancy–density relationship for a low-density carnivore. Journal of Applied Ecology, 54, 2043–2052.

MacKenzie DI, Nichols JD, Lachman GB, Droege S, Royle JA, Langtimm CA (2002) Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. Ecology, 83, 2248–2255.

MacKenzie DI, Nichols JD, Royle JA, Pollock KH, Bailey LL, Hines JE (2006) Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence. Academic Press, San Diego.

McCullough DR, Pei KCJ, Wang Y (2000) Home range, activity patterns, and habitat relations of Reeves' muntjacs in Taiwan. Journal of Wildlife Management, 64, 430–441.

McNaughton SJ (1976) Serengeti migratory wildebeest:

Facilitation of energy flow by grazing. Science, 191, 92–94.

Meng BS, Huang XL, Xie B, Wang WX, Huang JC, Zhang T, Ran JC, Zhang MM (2023) Distribution of suitable habitat for ungulates in Fanjingshan National Nature Reserve, Guizhou Province. Acta Theriologica Sinica, 43, 664–675. (in Chinese with English abstract) [蒙秉顺, 黄小龙, 谢波, 王维熙, 黄继池, 张涛, 冉景丞, 张明明 (2023) 贵州梵净山国家级自然保护区有蹄类动物适宜栖息地分布. 兽类学报, 43, 664–675.]

Muhly TB, Hebblewhite M, Paton D, Pitt JA, Boyce MS, Musiani M (2013) Humans strengthen bottom-up effects and weaken trophic cascades in a terrestrial food web. PLoS ONE, 8, e64311.

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403, 853–858.

Pierce BM, Bleich VC, Monteith KL, Bowyer RT (2012) Top-down versus bottom-up forcing: Evidence from mountain lions and mule deer. Journal of Mammalogy, 93, 977–988.

Ramirez JI, Jansen PA, Poorter L (2018) Effects of wild ungulates on the regeneration, structure and functioning of temperate forests: A semi-quantitative review. Forest Ecology and Management, 424, 406–419.

Ran JH, Liu SY, Sun ZY, Liu SC, Wang HJ, Liu XG, He WH (2002) Main associated animals in giant panda habitat in Qingchuan County, Sichuan. Sichuan Journal of Zoology, 21, 50–52. (in Chinese) [冉江洪, 刘少英, 孙治宇, 刘世昌, 王鸿加, 刘小庚, 何万红 (2002) 四川青川县大熊猫栖息地主要伴生哺乳动物调查. 四川动物, 21, 50–52.]

Ripple WJ, Beschta RL (2008) Trophic cascades involving cougar, mule deer, and black oaks in Yosemite National Park. Biological Conservation, 141, 1249–1256.

Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]

Tian J, Zhu SY, Zhang XF, He LW, Gu XD, Guan TP, Li S (2021) The diversity of large- and medium-sized terrestrial mammals and birds in the Giant Panda National Park: A meta-analysis based on camera-trapping data. Biodiversity Science, 29, 1490–1504. (in Chinese with English abstract) [田佳, 朱淑怡, 张晓峰, 何礼文, 古晓东, 官天培, 李晟 (2021) 大熊猫国家公园的地栖大中型鸟兽多样性现状: 基于红外相机数据的分析. 生物多样性, 29, 1490–1504.]

Wang W, Zhang J, Ma JZ, Liu HB (2007) Analysis on wild boars home ranges in south Lesser Khingan Mountains. Acta Theriologica Sinica, 27, 257–262. (in Chinese with English abstract) [王文, 张静, 马建章, 刘海波 (2007) 小兴安岭南坡野猪家域分析. 兽类学报, 27, 257–262.]

Wang YH, Yang AX, Yang QY, Kong XB, Fan H (2023) Spatiotemporal characteristics of human–boar conflicts in China and its implications for ecosystem “anti-service”. Acta Geographica Sinica, 78, 163–176. (in Chinese with English abstract) [王亚辉, 杨遨郗, 杨庆媛, 孔祥斌, 樊辉 (2023) 中国人–野猪冲突时空特征及对生态系统“反服务”的启示. 地理学报, 78, 163–176.]

Weir L, Fiske IJ, Royle JA (2009) Trends in anuran occupancy from northeastern states of the North American Monitoring Program. Herpetological Conservation and Biology, 4, 389–402.

Wirth R, Meyer ST, Leal IR, Tabarelli M (2008) Plant herbivore interactions at the forest edge. In: Progress in Botany, Vol. 69 (eds Lüttge U, Beyschlag W, Murata J), pp. 423–448. Springer, Berlin, Heidelberg.

Wolf C, Ripple WJ (2017) Range contractions of the world’s large carnivores. Royal Society Open Science, 4, 170052.

Xiao M, Wang H, He F, Cai LJ, Li MF, Yang X, Chen LM, Li SQ (2025) Camera-trapping survey of wild mammals and birds in Tangjiahe National Nature Reserve, Sichuan Province. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 46(1), 11−21. (in Chinese with English abstract) [肖梅, 王红, 何芳, 蔡丽君, 李明富, 杨旭, 谌利民, 李生强 (2025) 利用红外相机监测四川唐家河国家级自然保护区鸟兽多样性. 四川林业科技, 46(1), 11–21.]

Yin YQ, Tang SP, Teng Y, Han ZY, Wu LJ, Gao FL, Bao WD (2024) A pilot study on home range of female Chinese goral (*Naemorhedus griseus*): Exploring GPS tracking data in a cliff landscape. Journal of Forest Research, 29, 123–129.

Zheng RQ, Bao YX (2004) Study methods and procedures for ungulate food habits. Acta Ecologica Sinica, 24, 1532–1539. (in Chinese with English abstract) [郑荣泉, 鲍毅新 (2004) 有蹄类食性研究方法及研究进展. 生态学报, 24, 1532–1539.]

(责任编委: 申小莉　责任编辑: 闫文杰)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025261

附录1 单季节占域模型的环境协变量

Appendix 1 The environmental variables for single-season occupancy model

环境变量 Environmental variables	描述 Description	来源 Source
Ele	海拔 Elevation	Aster digital elevation model v003
Vrm	崎岖度 Vector ruggedness measure	Aster digital elevation model v003, 使用Arcmap 10.8 vrm工具提取 Extracted by vrm tool in Arcmap 10.8 from Aster digital elevation model v003
Slope	坡度 Slope	Aster digital elevation model v003, 使用Arcmap 10.8 坡度工具提取 Extracted by Slope Tool in Arcmap 10.8 from Aster digital elevation model v003
Dis_riv	距河流距离 Distance to river	卫星数据(https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}), 使用Arcmap 10.8 欧式距离工具提取 Satellite data, extracted by distance tool in Arcmap 10.8
Dis_road	距道路距离 Distance to road	
Dis_res	距村落距离 Distance to nearest resident	
habitat1–3	红外相机位点半径400 m范围内常绿阔叶林占比(habitat1)、落叶阔叶林占比(habitat2)、常绿针叶林占比(habitat3) Proportion of evergreen broad-leaved forests, deciduous broad-leaved forests, and evergreen needle-leaved forest respectively within the radius of 400 m of camera trap sites	全球30 m精细地表覆盖类型(GLC_FCS30-2020), 使用Arcmap 10.8中区域制表工具计算比例 Global 30 m surface coverage classification products (GLC_FCS30-2020), the proportion was calculated by the tabulate tool in Arcmap 10.8
RAI19–23	2019–2023年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023	红外相机数据 Camera trap data

附录2 2019–2023年调查期间关坝各兽类物种的红外相机相对多度

Appendix 2 Relative abundance index of mammal species in Guanba during 2019–2023

物种 Species	2019	2020	2021	2022	2023
四川羚牛 *Budorcas tibetanus*	0.85	1.21	1.14	0.64	3.24
中华鬣羚 *Capricornis milneedwardsii*	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
中华斑羚 *Naemorhedus griseus*	6.04	7.79	7.01	7.45	10.09
毛冠鹿 *Elaphodus cephalophus*	2.75	3.34	1.86	2.63	4.90
小麂 *Muntiacus reevesi*	0.89	1.57	2.61	2.89	4.99
林麝 *Moschus berezovskii*	0.05	0.05	0.02	0.15	0.08
野猪 *Sus scrofa*	1.83	1.07	0.27	1.22	2.91
金猫 *Catopuma temminckii*	0.00	0.00	0.08	0.00	0.09
豹猫 *Prionailurus bengalensis*	0.16	0.05	0.00	0.08	0.06
猪獾 *Arctonyx collaris*	0.09	0.45	0.10	0.08	0.34
黄喉貂 *Martes flavigula*	0.16	0.09	0.02	0.02	0.14
鼬獾 *Melogale moschata*	0.02	0.04	0.10	0.11	0.14
黄鼬 *Mustela sibirica*	0.14	0.02	0.04	0.00	0.05
大熊猫 *Ailuropoda melanoleuca*	0.11	0.11	0.10	0.26	0.14
黑熊 *Ursus thibetanus*	0.28	0.33	0.37	0.43	0.72
花面狸 *Paguma larvata*	0.14	0.36	0.23	0.30	0.17
猕猴 *Macaca mulatta*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
藏酋猴 *Macaca thibetana*	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
川金丝猴 *Rhinopithecus roxellana*	0.92	0.83	0.89	0.56	1.54
豪猪 *Atherurus macrourus*	1.30	1.16	0.56	0.62	1.09
岩松鼠 *Sciurotamias davidianus*	5.13	3.83	3.60	3.10	4.33

附录3 关坝自然保护小区5种有蹄类不同年份间的建群率和局部灭绝率

Appendix 3 The colonization rate and extinction rate of five ungulate species between sessions in Guanba

物种 Species		2019–2020	2020–2021	2021–2022	2022–2023
中华斑羚 *Naemorhedus griseus*	建群率 Colonization rate	0.70 ±0.19	0.53 ±0.36	0.56 ±0.26	1.00
	局部灭绝率 Extinction rate	0.00	0.17 ±0.10	0.13 ±0.09	0.07 ±0.06
小麂 *Muntiacus reevesi*	建群率 Colonization rate	0.07 ±0.07	0.17 ±0.10	0.21 ±0.12	0.00
	局部灭绝率 Extinction rate	0.00	0.19 ±0.17	0.00	0.21 ±0.14
毛冠鹿 *Elaphodus cephalophus*	建群率 Colonization rate	0.13 ±0.12	0.00	0.49 ±0.12	0.64 ±0.16
	局部灭绝率 Extinction rate	0.27 ±0.17	0.70 ±0.19	0.00 ±0.04	0.27 ±0.16
野猪 *Sus scrofa*	建群率 Colonization rate	0.32 ±0.23	0.13 ±0.12	0.20 ±0.17	0.44 ±0.17
	局部灭绝率 Extinction rate	0.30 ±0.16	0.29 ±0.23	0.13 ±0.13	0.17 ±0.15
四川羚牛 *Budorcas tibetanus*	建群率 Colonization rate	0.29 ±0.15	0.00	0.29 ±0.18	0.33 ±0.20
	局部灭绝率 Extinction rate	0.00	0.00 ±0.01	0.32 ±0.16	0.00 ±0.01

附录4 五种有蹄类每年占域模型信息以及环境因子权重

Appendix 4 Single season occupancy model information and environmental covariate weights for five ungulate species

物种 Species	年份 Year	用于模型平均的模型数量 The number of models for model average	用于模型平均的模型权重 The weight of models for model average	环境因子权重 Weight of environmental variables						
				距河流距离 Distance to river (Dis_riv)	距道路距离 Distance to road (Dis_road)	常绿阔叶林占比 Proportion of evergreen broad-leaved forest (habitat1)	落叶阔叶林占比 Proportion of deciduous broad-leaved forest (habitat2)	2019–2023 年每年家畜的红外相机相对多度总和 Pooled relative abundance index (RAI) of livestock from 2019 to 2023 (RAI19–23)	坡度 Slope	崎岖度 Vector ruggedness measure (Vrm)
中华斑羚 *Naemorhedus griseus*	2019	50	0.81	0.30	**0.66**	0.20	0.49	0.25	0.42	0.43
	2020	24	0.94	0.47	0.22	0.48	0.10	–	0.33	0.42
	2021	28	0.91	0.36	0.23	0.38	0.23	–	0.49	0.29
	2022	13	0.94	0.24	0.35	0.18	–	0.45	0.21	0.11
	2023	17	0.87	0.27	0.25	0.26	0.25	–	**0.72**	–
小鹿 *Muntiacus reevesi*	2019	19	0.96	–	0.27	0.47	0.29	–	0.21	0.33
	2020	24	0.94	0.07	**0.93**	0.18	0.49	–	0.45	0.46
	2021	28	0.91	0.23	**0.50**	0.23	0.21	–	0.41	0.45
	2022	13	0.94	0.26	0.45	0.21	0.31	0.23	0.19	0.29
	2023	17	0.87	0.12	**0.92**	0.34	**0.57**	0.36	0.12	**0.68**
毛冠鹿 *Elaphodus cephalophus*	2019	18	0.68	0.04	0.22	**0.97**	**0.67**	0.20	0.18	0.29
	2020	20	0.79	**0.68**	0.22	**0.97**	0.25	–	0.29	**0.64**
	2021	37	0.93	0.25	0.47	0.42	0.35	–	0.19	0.26
	2022	33	0.87	0.19	**0.52**	0.24	0.34	–	0.29	0.27
	2023	41	0.88	0.26	0.37	0.22	0.34	–	0.32	0.45
野猪 *Sus scrofa*	2019	23	0.91	0.24	0.25	0.22	0.36	–	0.26	0.23
	2020	10	0.62	0.25	**1.00**	0.32	**0.83**	–	0.05	0.26
	2022	14	0.83	0.18	**0.89**	–	0.21	–	0.35	0.44
	2023	29	0.64	0.25	0.20	0.18	0.17	0.20	0.20	0.18

四川羚牛 *Budorcas tibetanus*	2019	18	0.72	0.16	**0.92**	0.25	0.22	–	0.24	0.30
	2020	15	0.86	0.29	–	**0.61**	**0.76**		0.26	0.13
	2021	8	0.94	0.30	**1.00**	0.13	–	–	0.13	0.38
	2022	38	0.99	0.44	0.25	0.20	**0.52**		0.44	**0.58**
	2023	46	0.77	0.26	**0.52**	**0.54**	0.22	0.25	0.13	0.31

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 26051, pages 1–11
doi: 10.17520/biods.2026051
cstr: 32101.14.biods.2026051

•研究报告•

朱鹮对滨海食物的适应性：恢复东部沿海朱鹮种群的初步探索

朱芸[1], 王凯红[2], 李洪磊[2], 徐向龙[1], 雷宇[1], 陈浩[2], 陈卫华[2], 蔡新杰[2], 丁长青[1*]

1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区, 江苏盐城 224057

摘要: 面对全球生物多样性持续衰退的严峻挑战, 再引入已成为拯救濒危动物、恢复区域生物多样性的关键保护措施。放归前进行野化训练对人工繁育个体的野外存活至关重要, 其中食物丰容训练主要通过增加食物类型、模拟自然觅食环境等方式提高动物对放归地的适应能力。然而, 目前对食物丰容效果的动态过程及其量化评估研究仍为空白。为评估朱鹮(*Nipponia nippon*)对滨海湿地食物的适应性、探索行为学方法在野化训练成效评价中的应用, 本研究于2023年7–8月在江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区开展了野化训练朱鹮的食性转换实验。采用全事件取样法系统记录朱鹮对滨海食物的取食多样性及觅食行为变化, 以探明其滨海食物适应潜力与行为适应过程。结果表明: (1)朱鹮对滨海食物的取食比例达78.47%, 实验期间滨海食物的取食量逐渐升高、原有主食泥鳅逐渐降低, 表明其具备适应当地野外食物资源的潜力。(2)朱鹮的行为适应过程遵循“观望–试探–取食”的渐进模式。随着实验的进行, 其试探与取食行为频次显著升高, 体现了食物丰容措施驱动朱鹮探索行为和觅食行为多样性提高的动态过程。(3)个体适应能力存在显著差异, 活动能力较强的个体表现出更快的适应速度与更高的取食多样性。本研究基于行为学方法从时间维度上探明了食物丰容训练对行为多样性的促进作用, 证实科学设计的食物丰容实验能够有效引导圈养动物的行为结构向提高自然探索行为与功能性觅食行为多样性的方向发生显著调整。基于实验结果建议在再引入实践中构建“训练–放归–监测”全周期的本地食物丰容管理方案, 即放归前通过针对性食性转换训练拓宽濒危动物的食谱, 同步建立个体行为档案实现个体质量评估并筛选出合格个体实施放归, 监测放归后的高适应性食物并进行放归初期的过渡性食物补充。本研究为优化朱鹮及其他濒危物种的再引入技术方案提供了关键的理论依据与实践支撑。

关键词: 朱鹮; 再引入; 野化训练; 食物丰容; 行为适应; 滨海湿地

朱芸, 王凯红, 李洪磊, 徐向龙, 雷宇, 陈浩, 陈卫华, 蔡新杰, 丁长青 (2026) 朱鹮对滨海食物的适应性: 恢复东部沿海朱鹮种群的初步探索. 生物多样性, 34, 26051. doi: 10.17520/biods.2026051; cstr: 32101.14.biods.2026051.

Zhu Y, Wang KH, Li HL, Xu XL, Lei Y, Chen H, Chen WH, Cai XJ, Ding CQ (2026) Adaptation of Crested Ibis to coastal foods: A pilot study for reestablishing population in the eastern coastal region of China. Biodiversity Science, 34, 26051. doi: 10.17520/biods.2026051; cstr: 32101.14.biods.2026051.

Adaptation of Crested Ibis to coastal foods: A pilot study for reestablishing population in the eastern coastal region of China

Yun Zhu[1], Kaihong Wang[2], Honglei Li[2], Xianglong Xu[1], Yu Lei[1], Hao Chen[2], Weihua Chen[2], Xinjie Cai[2], Changqing Ding[1*]

1 *School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
2 *Jiangsu Yancheng Wetland & Rare Birds National Nature Reserve, Yancheng, Jiangsu 224057, China*

ABSTRACT

Aim: In response to ongoing global biodiversity decline, reintroduction serves as a vital conservation strategy for rescuing endangered species and restoring regional biodiversity. Pre-release acclimation plays an indispensable role in

收稿日期 Received: 2026-02-12; 接受日期 Accepted: 2026-04-21
基金项目: 国家自然科学基金(32270554; 32400400)、江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2022]20)和国家建设高水平大学公派研究生项目(202506510045) Supported by the National Natural Science Foundation of China (32270554; 32400400), Jiangsu Forestry Science and Technology Innovation and Promotion Project (LYKJ[2022]20), and Program of China Scholarship Council (202506510045)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: cqding@bjfu.edu.cn

this process, as it prepares captive-bred individuals—which often lack survival experience in the wild—for release. Food-based enrichment constitutes a core element of such training, primarily by modifying food types and simulating natural foraging environments to enhance animals' adaptability to local food resources. However, research on the dynamic process of food enrichment and its quantitative evaluation remains scarce. To assess the adaptability of the Crested Ibis (*Nipponia nippon*) to coastal wetland foods and to explore the application of behavioral methods in evaluating the effectiveness of acclimation, this study examined the Crested Ibis undergoing acclimation at the Jiangsu Yancheng Wetland & Rare Birds National Nature Reserve.

Methods: We conducted 37 diet-shifting experiments during July and August 2023. Firstly, we employed the all-occurrence sampling method to record the diversity of coastal foods consumed and the frequencies of associated behaviors (observing, probing, ingesting). Secondly, we used generalized linear models (GLMs) to analyze foraging behavior, foraging activity, and adaptation time in the diet-shifting experiments. Counts of observing, probing, and ingesting behaviors per round were initially modeled with Poisson GLM, switching to negative binomial GLM if overdispersion was detected. Normality of daily total foraging amount, daily foraging ratio, first probing time, and first ingesting time was assessed using the Shapiro-Wilk test. Normally distributed data were analyzed with linear regression, right-skewed data with Gamma GLM, and left-skewed data with inverse Gaussian GLM.

Results: The results revealed a clear dietary shift in the Crested Ibis individuals throughout the experiments. Their consumption of coastal foods increased to 78.47%, while their reliance on loach declined progressively, demonstrating a strong potential for adaptation to local wild food resources. Secondly, the behavioral adaptation of the Crested Ibis individuals followed a sequential process of "observing-probing-ingesting". With the progression of the diet-shifting experiments, the frequencies of probing and ingesting behaviors increased significantly ($P < 0.001$), reflecting the dynamic process of food-based enrichment driving positive adjustments in behavioral structure. Individual adaptability also varied. Less mobile individuals accepted fewer types of coastal foods and took longer to first probe and ingest them than more mobile individuals.

Conclusion: This study, based on behavioral methodologies, revealed the promotive effect of food enrichment on behavioral diversity from a temporal perspective. The findings indicated that scientifically designed food enrichment training can effectively guide positive adjustments in the behavioral organization of captive animals, thereby increasing the diversity of their natural exploratory and functional foraging behaviors. Based on the results, we recommend establishing a full-cycle "acclimation-release-monitoring" food enrichment management protocol in reintroduction practice. Specifically, this entails pre-release systematic diet-shifting training to broaden the food spectrum of endangered species, the establishment of individual behavioral profiles for quality assessment and precise release planning, and the transitional food supplement feeding based on highly adaptive foods after releasing. This study provides crucial theoretical underpinnings and practical support for optimizing reintroduction protocols for the Crested Ibis and other endangered species.

Key words: Crested Ibis (*Nipponia nippon*); reintroduction; acclimation; food-based enrichment; behavioral adaptation; coastal wetland

面对生物多样性丧失这一全球性挑战(Ceballos et al., 2015), 如何有效恢复濒危物种的种群规模、在其历史分布区逐步重建野外种群, 已成为保护生物学实践工作的紧迫任务(Seddon et al., 2007)。再引入(reintroduction)是指通过人工方式, 在濒危物种已经消失的历史分布区(historic range)重引入其人工繁育或野生个体, 在当地建立一个可自我维持的野生种群(IUCN/SSC, 2013)。再引入是拯救濒危物种、恢复区域生物多样性的重要手段, 但在实际操作中面临着诸多技术瓶颈。长期圈养的人工繁育个体缺乏野外生存经验, 例如一些重要生存和繁殖行为的减少或缺失、刻板行为的增加、对陌生食物及环境适应能力降低等[①], 直接将其放归野外将面临存活率低的风险, 最终导致再引入失败。因此, 放归前进行野化训练(acclimation)是濒危动物再引入过程中的重要环节(Liu et al., 2016), 通过环境丰容(environmental enrichment)、食物丰容(food-based enrichment)和行为训练(behavior training)等方式有利于动物行为和食性多样性的提升, 进而提高野化放归个体的生存和适应能力。已有研究表明, 在围栏中野化训练6个月的弯角剑羚(*Oryx dammah*)比训练1个月的个体放归后扩散更远(Mertes et al., 2019);

① 卢靖 (2011) 朱鹮(*Nipponia nippon*)非繁殖期行为研究及野化训练技术规程. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

在释放前训练黑尾土拨鼠(*Cynomys ludovicianus*)的反捕食行为和社交行为, 可帮助其释放后通过社会互动躲避捕食者(Hamilton et al., 2010); 在大鸨(*Otis tarda*)幼鸟扩散前逐渐减少补充食物, 可提高其再引入的成功率(Gooch et al., 2015)。

食物丰容是野化训练的重要组成部分, 通过增加食物多样性、调整投喂策略、模拟自然觅食环境或提供活体饵料等方式, 可提升圈养动物的觅食能力、健康水平以及对野外环境的适应能力(Shepherdson et al., 1993; Edge et al., 2014; Xu et al., 2025), 可能对提高再引入成功率具有重要作用(Roberts & Luther, 2023)。Xu等(2025)的研究发现, 食物丰容通过调节免疫功能相关基因的表达, 可显著增强黄姑鱼(*Nibea albiflora*)的免疫能力。Pedersen等(2020)探讨了环境丰容对快速生长型肉鸡健康与发育的影响, 发现设置垂直隔板并扩大食物间距可促进肉鸡的肌肉与骨骼生长, 对改善其腿部健康具有潜在的积极意义。Roberts和Luther (2023)通过对近37年来91个鸟类迁地保护案例的文献分析发现, 食物丰容是显著提升鸟类放归后首年存活率的最主要影响因素, 这类训练包括引入活体饲料、模拟野外生存压力的资源调控方式(例如在沙漠环境中限制水资源)以及在野化训练网笼内增加本地植物模拟野外觅食环境等。

行为学评估是量化食物丰容效果的常用方法(de Almeida et al., 2018; Khan, 2023)。动物自然行为的表达水平, 如觅食、探索和玩耍等, 通常被视为评估其心理与生理状态的重要指标(Spiezio et al., 2018)。在圈养条件下, 动物常因环境单调、刺激不足而表现出刻板行为, 如反复踱步、啃咬笼具或自身等。因此, 通过食物丰容策略, 如引入新食物类型、增加觅食难度或延长觅食时间, 可促使其恢复自然行为模式, 减少刻板行为的发生, 从而提升其整体福利(蒋志刚, 2004; 孟秀祥等, 2007; 卢靖, 2011[①]; Kalan et al., 2020)。例如, 在蓝黄金刚鹦鹉(*Ara ararauna*)的圈养环境中添加促进其身体运动、认知刺激和食物种类的丰容物品后, 鹦鹉啃咬自身和反复踱步等异常行为相较于丰容前期显著减少(de Almeida et al., 2018)。与此类似, 在圈养小熊猫(*Ailurus fulgens*)的活动空间内分散放置竹子以模拟自然栖息地的食物丰容方式可显著提高其行为多样性(1.6倍), 增加其觅食行为(3.6倍), 减少其踱步行为(5.8倍)和攻击行为(近3倍) (Khan, 2023)。同样地, 对小食蚁兽(*Tamandua tetradactyla*)采取增加新型液态与固态食物种类、延长投喂时段、实施分段投喂、改变食物呈现方式、扩展投喂频率等食物丰容方式, 可显著增加其自然活跃行为(Eguizábal et al., 2013)。此外, 个体生理状态、个性等差异会影响动物对新事物的行为反应(Teixeira et al., 2007; Patrick et al., 2017), 从而影响野化训练效果及野外存活率。例如, 较勇敢的漂泊信天翁(*Diomedea exulans*)在搜寻与觅食行为的权衡中更倾向于探索新觅食地, 较羞怯的个体则更倾向于开发现有觅食地(Patrick et al., 2017); 加拿大盘羊(*Ovis canadensis*)中较勇敢的个体在野外更具生存优势(Réale et al., 2000)。快速探索个体在放归后通常能占据更大的扩散面积(Dingemanse et al., 2003), 因此优先挑选探索性强、应激水平低和行为偏侧化弱的积极型大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)进行野化放归, 将可能极大提高其在极度陌生环境中的适应能力、福利水平以及放归成活率(Li et al., 2026)。上述研究表明, 科学的食物丰容策略能够有效引导圈养动物的行为模式向更多样化、更接近自然状态的方向转变, 且个体差异是影响野化放归成效的重要因素。然而, 对于这种转变是一次性还是分阶段完成、不同阶段的行为学标志是什么, 以及个体质量对丰容训练的响应差异, 目前仍缺乏系统的、基于时间序列的定量化评估研究。

朱鹮(*Nipponia nippon*)是我国国家一级保护野生动物, 被列为我国《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》中抢救性保护珍稀濒危野生动物的旗舰种和实施野化放归的关键种。历史上朱鹮曾广泛分布于东亚地区, 在我国东部为冬候鸟或旅鸟(丁长青, 2004)。20世纪中叶朱鹮的种群数量不断下降, 分布于我国东部沿海地区的迁徙种群逐渐消失, 留鸟仅存于陕西洋县及其周边县区(史东仇和曹永汉, 2001; 丁长青, 2004)。研究发现, 野生朱鹮在山区和平原的种群繁殖早期存在显著的觅食生态位差异(Xu et al., 2022), 提示在异地野化放归过程中将人工繁育个体放归到不同栖息地时, 应关注食性差异

① 卢靖 (2011) 朱鹮(*Nipponia nippon*)非繁殖期行为研究及野化训练技术规程. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

对其适应能力和再引入成功率的影响。江苏省为朱鹮迁徙种群的历史分布区(Birdlife International, 2018), 为扩大野生朱鹮的分布范围、恢复其在江苏省及东部沿海的历史分布, 2023年江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区从浙江省朱鹮抢救保护基地先后引入朱鹮20只。然而, 人工繁育个体主要以泥鳅、大麦虫等饵料为食, 对盐城滨海湿地生境中的自然食物无取食经验。因此, 放归前开展野化训练是提高朱鹮对滨海生境和滨海食物适应能力的重要环节。为探明野化训练朱鹮能否取食滨海地区的自然食物以摆脱对泥鳅等淡水食物的依赖, 并探究行为学评估方法在量化食物丰容阶段性效果中的实用性, 本研究对江苏盐城野化训练大网笼内首批引入的10只朱鹮进行了食性转换实验, 采用全事件取样法观察朱鹮实验期间的行为, 量化朱鹮对滨海食物的取食多样性和行为适应过程。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究于江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区(以下简称"盐城保护区")开展。盐城保护区地处江苏省中部沿海(119°53′–121°18′ E, 32°48′–34°29′ N), 是我国最大的海岸带保护区, 总面积2,472.60 km^2, 主要保护丹顶鹤(*Grus japonensis*)等珍稀濒危野生动物及其赖以生存的滩涂湿地生态系统。盐城保护区东临黄海, 海岸线长582 km, 雨水丰沛, 日照充足, 无霜期长(210–224天/年), 年均气温为13.70–14.60℃, 年均降水量为980–1,070 mm。盐城保护区核心区湿地的主要水源来自于新洋港和斗龙港, 潮汐现象明显, 属正规半日潮流(王国祥, 2017)。朱鹮野化训练大网笼位于保护区的实验区(120°30′ E, 33°36′ N), 面积约2,000 m^2, 中心柱高约25 m。笼内挖掘潮沟引入新洋港海水, 形成天然潮汐现象, 并营造了与野外相似的生境, 包括滩涂、潮沟、草地、乔木、淡水塘、海水塘等生境类型(图1)。

1.2 食性转换实验

2023年7月14日至8月23日, 在朱鹮野化训练大网笼内开展食性转换实验。实验对象为2023年6月17日首批引入的10只朱鹮, 脚环编号为01–10。实验在每日上午9:00–11:00朱鹮未投食前进行, 采取混

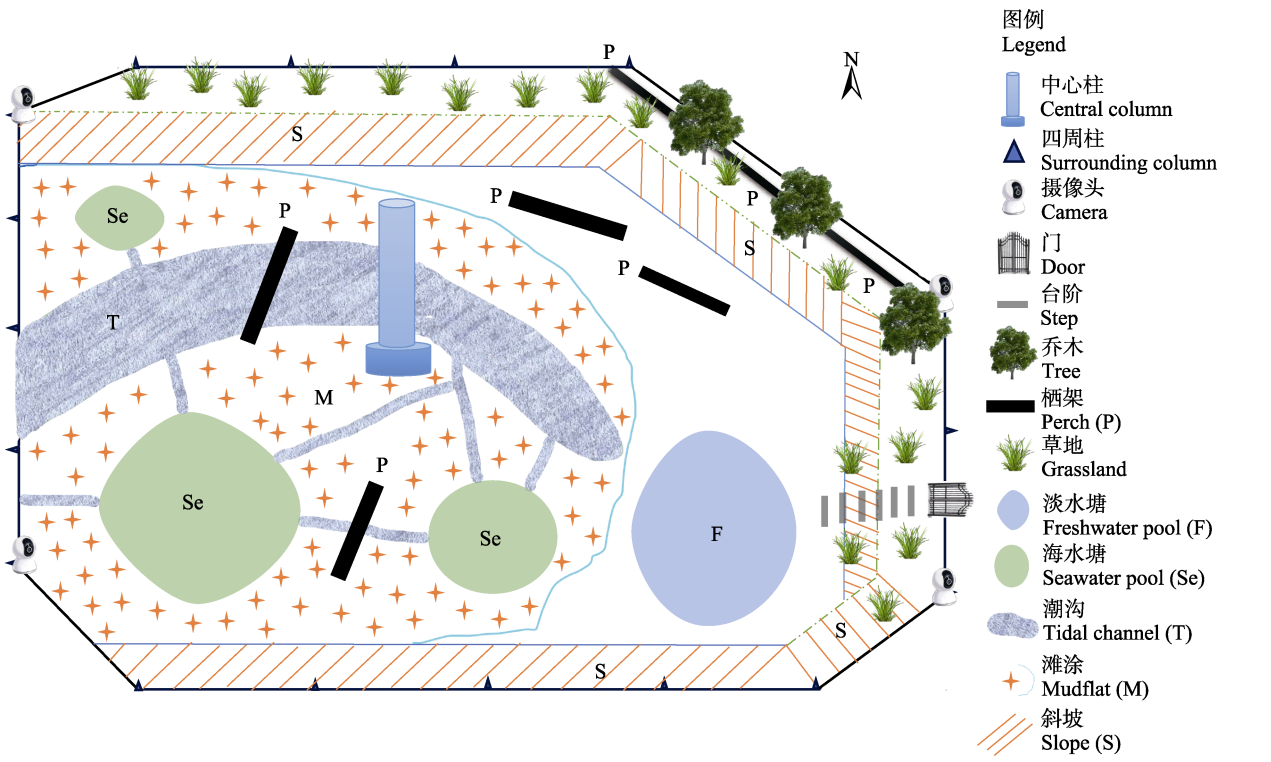


图1 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区朱鹮野化训练大网笼环境丰容示意图

Fig. 1 Layout of environmental enrichment in the large aviary for Crested Ibis acclimating at Jiangsu Yancheng Wetland & Rare Birds National Nature Reserve

合投食的方式。首先使用天平称量食物的重量, 分别放入不同食盘后加入与该食物野外生存环境相同的海水或淡水, 以保持食物的鲜活状态。其次将食盘放在大网笼内部的滩涂或草地上, 使用视频监控(海康威视)观察朱鹮的取食行为。最后将剩余食物取回称重。依据王国祥(2017)和余晓韵(2010)[①]选择江苏盐城滨海湿地中野外常见的自然食物(包括淡水和海水食物)用于实验。预实验期间, 共投喂了21种食物, 其中, 泥螺(*Bullacta exarata*)、缢蛏(*Sinonovacula constricta*)、石磺(*Onchidium verruculatum*)和黄鳝(*Monopterus albus*)等4种食物在5次投食实验中均未被取食; 尖锥拟蟹守螺(*Cerithidea largillierti*)、托氏蝠螺(*Umbonium thomasi*)、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、青蛤(*Cyclina sinensis*)和克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)等5种具有坚硬外壳的食物在1–3次投食实验中均未被取食; 中华乌塘鳢(*Bostrychus sinensis*)和拉氏狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)在放归地野外环境中难以获取, 未作为正式野化训练食物; 活体大麦虫(*Zophobas atratus*)被用作诱导朱鹮接近并尝试取食陌生滨海食物的诱饵。最终, 选择9种食物进行混合投食实验, 包括双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)、脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)、弹涂鱼(*Periophthalmus cantonensis*)、天津厚蟹(*Helice tridens*)和斑尾刺虾虎鱼(*Acanthogobius ommaturus*) 5种海水食物, 以及日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)、鲚(*Hemiculter leucisculus*)、黑鲫(*Carassius carassius*)和泥鳅(*Misgurnus anguilicaudatus*) 4种淡水食物(附录1)。实验使用规格统一的塑料食盘(外径: 560 mm × 370 mm × 80 mm, 内径: 525 mm × 340 mm × 70 mm), 放置在固定位置, 便于朱鹮发现并产生记忆。滨海食物的物种鉴定参照《中国生物物种名录2025版》(http://www.sp2000.org.cn)、王国祥(2017)和余晓韵(2010)[①]。

1.3 行为观察

参照朱鹮行为谱(朱芸等, 2024), 本研究将观望行为(observing)定义为朱鹮靠近食盘、抬升颈部、向斜上方歪头、侧视或双眼观察目标物体的行为; 或颈部前伸数次、偶尔伴随有小步向前的探看行为。包括单眼注视、双眼注视和探头观望。将试探行为(probing)定义为朱鹮伸长颈部、用喙轻触陌生物体又快速缩回的行为。取食行为(ingesting)仅记录朱鹮成功吞下食物的行为, 包括啄咽、吞咽、颈蠕动和呕吐。三类行为均属于觅食过程中的行为, 区别在于观望行为只靠近但不接触食物, 试探行为用喙部与食物有触碰但未吞咽, 取食行为则伴有吞下食物的动作。依据Altmann (1974)和Lehner (1992)的行为取样方法, 本研究采用全事件取样法(all occurrences sampling)连续记录所有朱鹮个体对目标食物的观望、试探、取食等特定行为发生的时间及频次, 并记录每只朱鹮首次试探和首次取食滨海食物的时间(即从放置食盘开始到试探和取食行为第一次发生的时间, 单位为min)。大网笼内部四个方向均安装有可旋转和缩放的高清视频监控(海康威视), 可全程无干扰地观察记录实验期间朱鹮的行为。朱鹮腿部均佩戴彩色数字环志, 可作个体识别。

1.4 数据分析

首先, 计算每种滨海食物的平均取食比例(average foraging ratio, *R*)和日取食比例(daily foraging ratio, *DR*)以及全部滨海食物的日取食总比例(daily total foraging ratio, *DtR*), 以探究朱鹮对滨海食物的取食情况、日消耗率变化和总体取食活跃度。计算公式如下:

$$R_i = \frac{TF_i / D_i}{\sum_{j=1}^{n}\left(TF_j / D_j\right)} \tag{1}$$

式中, R_i表示食物i的日均取食量在全部食物日均取食量总和中的占比, 即食物i的平均取食比例; TF_i表示食物i在实验期间的总取食量(total foraging amount); D_i表示食物i的实验天数; $\sum_{j=1}^{n}(TF_j / D_j)$表示所有食物日均取食量的总和。

$$DR_i = \frac{DF_i}{DO_i} \tag{2}$$

式中, DR_i表示某日食物i的取食量占其当日投放量的比例, 即食物i的日取食比例; DF_i表示食物i的实际日取食量(daily foraging amount); DO_i表示同日食

① 余晓韵 (2010) 盐城自然保护区湿地大型底栖动物群落研究. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.

物i的投放总量(daily offered amount)。

$$DtR = \frac{\sum_{i=1}^{n} DtF_i}{\sum_{i=1}^{n} DtO_i} \quad (3)$$

式中，DtR表示全部滨海食物的日取食总比例; $\sum_{i=1}^{n} DtF_i$表示当日所有食物的实际取食总量; $\sum_{i=1}^{n} DtO_i$表示当日所有食物的投放总量。

其次，利用广义线性回归模型(generalized linear models, GLMs) (Nelder & Wedderburn, 1972)分析食性转换实验期间朱鹮对滨海食物的觅食行为、取食活跃度和适应时间变化。行为频次数据(每轮实验期间观望、试探、取食行为发生的次数)采用泊松广义线性回归(Poisson GLM)分别拟合模型并评估是否存在过度离散。若残差偏差与自由度之比明显大于1，则表明模型过度离散，使用负二项广义线性回归(negative binomial GLM)进行分析。而后，对日取食总量和日取食比例、首次试探时间和首次取食时间进行正态性检验(Shapiro & Wilk, 1965)，若符合正态分布则使用普通线性回归拟合模型; 若不符合正态分布且数据右偏，则使用伽马广义线性回归(Gamma GLM)拟合模型，反之数据左偏则采用逆高斯广义线性回归(inverse Gaussian GLM)拟合模型并进行残差诊断。显著性P值设置为0.05，数据分析与制图均在R 4.5.1 (R Core Team, 2024)中完成。

2 结果

2.1 朱鹮对滨海食物的取食情况

本研究共进行了37次食性转换实验。其中，7月17次，8月20次。混合投食实验表明，在朱鹮取食的食物总量中，滨海地区自然食物的平均取食比例达78.47%。其中，取食比例最高的是双齿围沙蚕(29.16%)，高于泥鳅的21.53%，其次是日本沼虾、脊尾白虾、黑鲫、天津厚蟹、斑尾刺虾虎鱼、鳌和弹涂鱼(图2A)。实验期间，朱鹮对泥鳅的日取食量逐渐降低，除弹涂鱼的取食量持平、斑尾刺虾虎鱼的取食量下降外，朱鹮对其他滨海食物的日取食量随着实验次数的增加呈上升趋势，其中双齿围沙蚕的日取食量增长最为显著(图2B)。食性转换实验期间，滨海食物的日取食总量和日取食总比例显著增加(图2C，蓝色实线，$R^2 = 0.165$, $P = 0.019$; 图2C，橙色实线，$R^2 = 0.183$, $P = 0.013$)。其中，日取食量、日取食比例最高的是双齿围沙蚕和泥鳅，且第9次和第14次实验双齿围沙蚕的日取食比例最高(图2D)。

2.2 朱鹮对滨海食物的行为适应

实验期间共记录朱鹮对滨海食物的观望行为8,444次，试探行为16,137次，取食行为15,216次。朱鹮对滨海食物的适应行为表现为先观望、再试探、然后取食的渐进模式。实验初期，观望行为频次较高，试探和取食行为频次较低; 随着实验的进行，观望行为频次略有下降，但变化趋势不显著(IRR = 0.962, 95% CI: 0.924–1.000, $P = 0.124$)，试探行为(IRR = 1.095, 95% CI: 1.064–1.127, $P < 0.001$)和取食行为(IRR = 1.090, 95% CI: 1.055–1.128, $P < 0.001$)频次均显著升高; 实验后期，当新食物出现时观望行为频次增加，试探行为和取食行为频次则继续升高(图3)。

2.3 朱鹮对滨海食物适应的个体差异

在食性转换实验中，野化训练朱鹮对滨海食物的适应具有明显的个体差异，活动能力较差的个体在食性转换实验中对新食物的接受程度或适应速度低于其他身体状况无明显异常的个体。在取食多样性方面，08号和09号个体的食物谱最广泛，实验中的全部滨海食物均可取食; 左脚残疾的07号个体取食多样性最低，仅能取食4种滨海食物(图4A)。在适应时间方面，03、04、08、09、10号个体首次取食滨海食物的时间最短，适应较快; 07号个体首次取食时间最长，适应最慢(图4B)。随着实验的进行，朱鹮群体首次试探和取食滨海食物的时间显著降低(图4C, $R^2 = 0.048$, $P = 0.028$; 图4D, $R^2 = 0.100$, $P < 0.001$)，适应时间越来越短。尾羽磨损不能上树夜栖的02号个体首次试探滨海食物时间则显著增加(图4C, $R^2 = 0.240$, $P = 0.054$)，右眼残疾的01号个体首次取食滨海食物的时间变化不显著(图4D, $R^2 = 0.015$, $P = 0.813$)。

3 讨论

本研究通过系统的食性转换实验，首次评估了野化训练朱鹮对我国东部沿海(江苏盐城)滨海湿地自然食物的适应潜力与行为响应。结果表明，野化

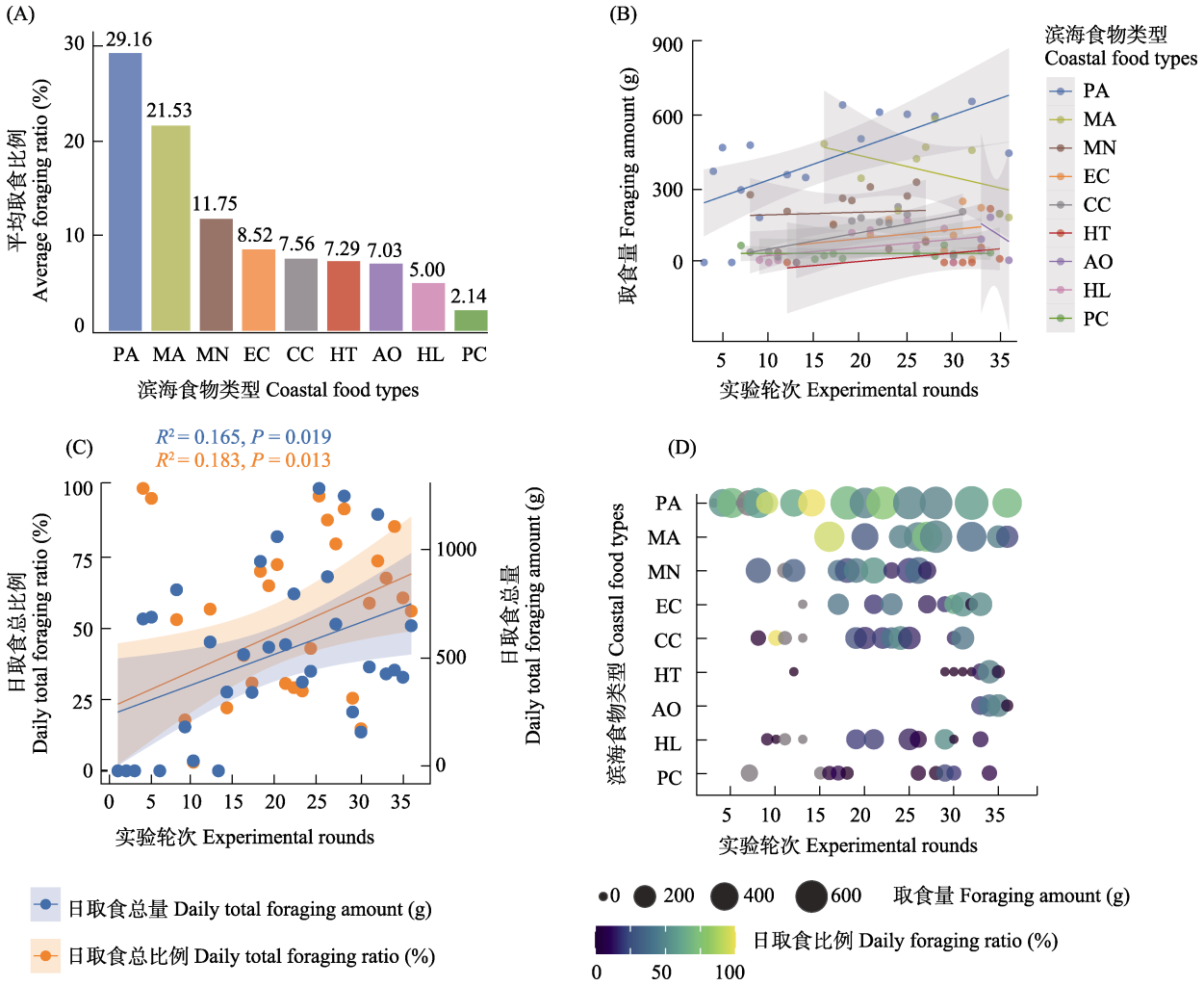


图2　江苏盐城野化训练朱鹮对滨海食物的取食情况。取食比例(A)，取食量变化(B)，日取食总比例和日取食总量变化(C)，日取食比例和取食量变化(D)。PA：双齿围沙蚕; **MA**：泥鳅; **MN**：日本沼虾; **EC**：脊尾白虾; **CC**：黑鲷; **HT**：天津厚蟹; **AO**：斑尾刺虾虎鱼; **HL**：鯻; **PC**：弹涂鱼。

Fig. 2　Dietary composition of coastal foods in Crested Ibis during acclimation in Yancheng, Jiangsu. (A) Average foraging ratio; (B) foraging amount; (C) daily total foraging ratio and daily total foraging amount; (D) daily foraging amount and ratio. PA, *Perinereis aibuhitensis*; MA, *Misgurnus anguilicaudatus*; MN, *Macrobrachium nipponense*; EC, *Exopalaemon carinicauda*; CC, *Carassius carassius*; HT, *Helice tridens*; AO, *Acanthogobius ommaturus*; HL, *Hemiculter leucisculus*; PC, *Periophthalmus cantonensis*.

训练期间的食物丰容能有效提高朱鹮对滨海食物的适应潜力，其行为适应过程遵循“观望–试探–取食”的渐进模式，并且个体活动能力是影响其适应能力的重要内在因素。《世界自然保护联盟放归和其他易地保护指南》(IUCN Guidelines for Reintroductions and Other Conservation Translocations)明确指出，对于需要恢复其复杂觅食行为的物种，放归前应通过针对性训练帮助个体发展或重新学习关键的生存技能，且确定合适的放归阶段与个体筛选(例如选择可塑性更强的年轻个体)是提高成功率的重要环节(IUCN/SSC, 2013)。本研究中年龄均为2–4岁的野化训练朱鹮对放归地多样化的滨海食物表现出的积极探索取食与快速行为适应，符合年轻个体可塑性更强的观点(Joseph & Wunderle, 1991)。

食物丰容实验期间，野化训练朱鹮对双齿围沙蚕、日本沼虾、脊尾白虾等常见滨海食物表现出较高的取食比例(总体达78.47%)，对原有主食泥鳅的依赖性逐渐降低。随着实验的进行，日取食量、日取食总量和取食活跃度逐渐升高。这表明人工繁育朱鹮能够摆脱对主要食物泥鳅的绝对依赖，具备适应盐城滨海湿地自然食物的潜力，且适应程度越来

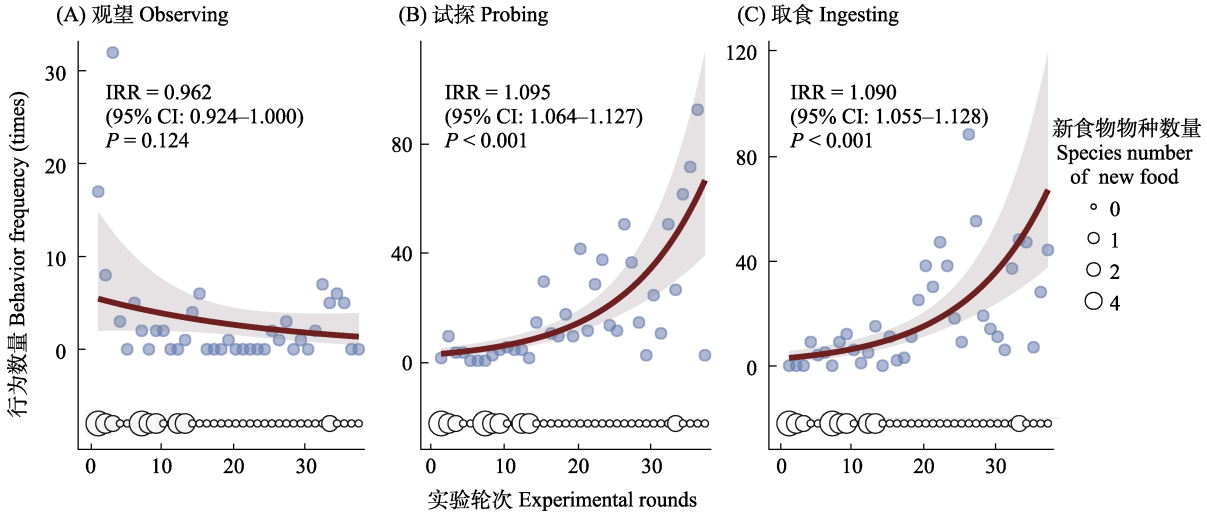


图3　江苏盐城野化训练朱鹮食性转换实验期间的觅食行为变化。IRR为发生率比: 95% CI包含1、*P* > 0.05则差异无统计学意义; 95% CI不包含1、*P* < 0.05时，IRR > 1显著升高，IRR < 1显著降低。

Fig. 3　Changes in foraging behaviors during the diet-shifting experiments of Crested Ibis acclimated in Yancheng, Jiangsu. IRR denotes incidence rate ratio: The 95% CI including 1 and $P > 0.05$ indicates no statistically significant difference. When the 95% CI does not include 1 and $P < 0.05$, an IRR > 1 indicates a significant increase, whereas an IRR < 1 indicates a significant decrease.

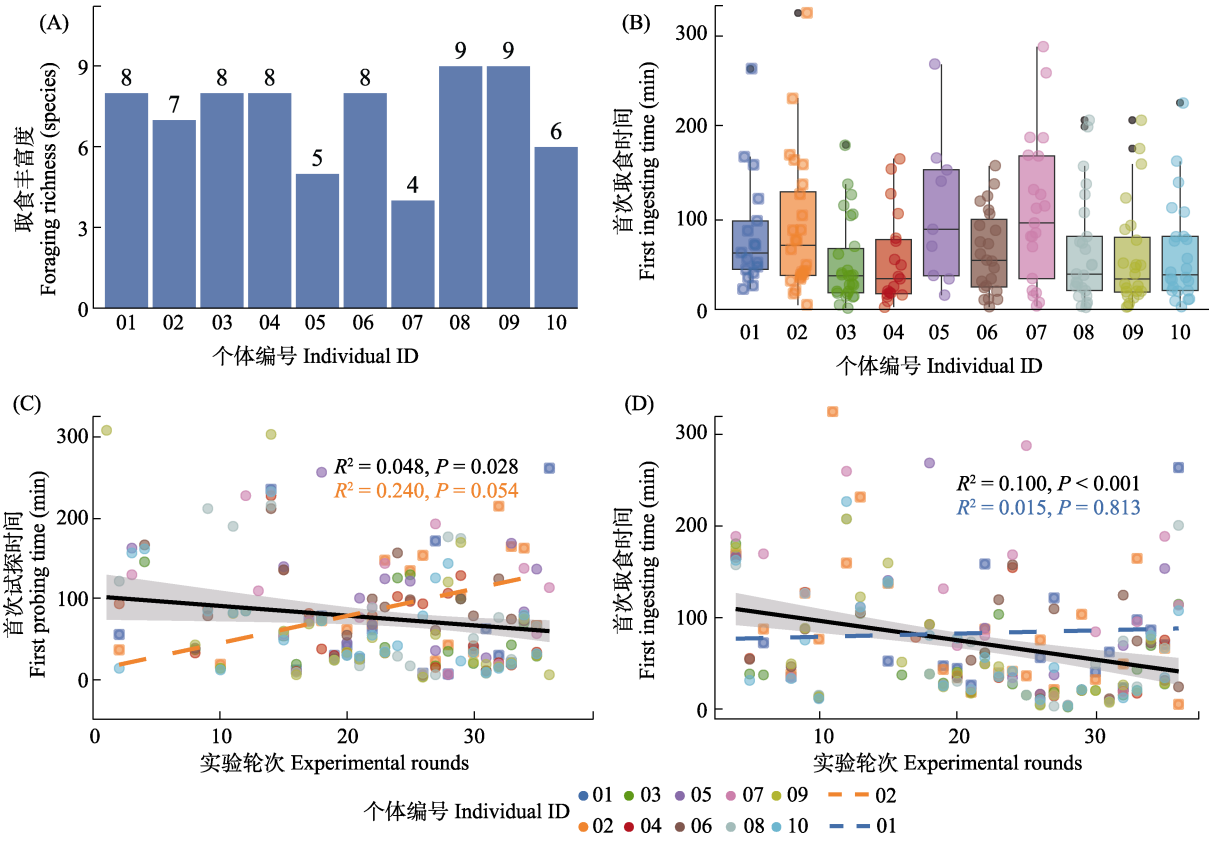


图4　江苏盐城野化训练朱鹮滨海食物取食丰富度和觅食行为的个体差异。滨海食物的取食丰富度(A); 个体首次取食时间(B); 群体首次试探时间(C, 橙色虚线表示02号朱鹮的首次试探时间); 群体首次取食时间(D, 蓝色虚线表示01号朱鹮的首次取食时间)。

Fig. 4　Individual variation in coastal foods foraging richness and behaviors of acclimating Crested Ibis in Yancheng, Jiangsu. (A) Foraging richness on coastal foods; (B) First ingesting time across individuals; (C) First probing time across experimental rounds within groups (the orange dashed line represents individual No. 02); (D) First ingesting time across experimental rounds within groups (the blue dashed line represents individual No. 01).

越高。该研究结果对于在缺乏大面积淡水湿地支撑的滨海生境中建立可自我维持的种群具有重要意义。与河北北戴河野化训练朱鹮的研究结果[①]相比, 本研究野化训练朱鹮在食物选择上呈现出显著的地域差异, 例如不取食缢蛏但可取食天津厚蟹幼体, 对双齿围沙蚕取食量最高且适应时间最短。这表明再引入前的野化训练方案必须紧密结合放归地的食物资源进行针对性设计, 以提高野化训练成效。例如在丰容食物组成方面, 本研究新增了脊尾白虾、弹涂鱼、斑尾刺虾虎鱼、天津厚蟹等盐城本地常见物种, 而未涉及当地分布较少的日本和美虾(*Nihonotrypaea japonica*)和裸体方格星虫(*Sipunculus nudus*)。本研究中, 斑尾刺虾虎鱼的日取食量逐渐下降的原因可能与高温天气有关, 其在暴晒条件下易死亡并产生异味, 导致朱鹮拒食。

在行为层面, 朱鹮对陌生食物的适应过程表现为从谨慎“观望”、积极“试探”到最终“取食”的行为序列转变。“首次试探时间”与“首次取食时间”是衡量个体对新食物接受程度与探索能力的关键行为学指标。首次试探时间越短, 通常表明个体对新事物的恐惧水平越低、探索性越强; 首次取食时间越短, 则表明个体具有更强的快速学习能力和风险决策能力。随着实验的进行, 朱鹮对滨海食物的首次试探时间和首次取食时间显著减少, 表明其对新食物的恐惧水平降低、接受度越来越高。食物丰容实验期间, 朱鹮试探和取食的功能性觅食行为的频率与多样性显著提升, 表明通过引入多样化的本地食物(即食物丰容), 能够有效引导圈养动物的行为结构向更复杂、更接近自然状态的方向转变(Shepherdson et al., 1993; de Almeida et al., 2018; Kalan et al., 2020), 为放归前需系统重建濒危物种的自然行为模式提供了实证依据(IUCN/SSC, 2013)。实验后期引入全新食物后, 观望行为短暂回升, 体现了朱鹮进行审慎评估的正常学习行为和认知能力的运用, 也是动物行为弹性的体现(蒋志刚, 2004; 孟秀祥等, 2006)。圈养环境及食物的配置均会影响动物的行为结构(Eguizábal et al., 2013), 动物通过主动调整或改变行为以适应环境的变化(孟秀祥等, 2006)。放归前的食物丰容训练在无天敌压力的条件下为濒危动物提供了一个行为发展与调整的窗口期, 使其在安全环境中充分发展识别、搜寻与处理食物等关键行为的能力, 为其放归后适应当地食物资源提供了重要的技能训练与行为准备。本研究基于行为学方法从时间维度上探明了食物丰容训练对行为多样性的促进作用, 即通过科学设计、基于放归地资源的食物丰容策略, 能够有效引导圈养动物的行为结构向提高自然探索行为与功能性觅食行为多样性的方向显著调整。本实验中, 在模拟野外滨海湿地生境的大网笼中进行的食物丰容训练不仅提高了人工繁育朱鹮的觅食多样性和觅食行为多样性(频率、发生时间), 其觅食行为序列的转变也更趋近于在自然环境中所需的审慎评估与主动探索模式。

不同活动能力的个体对新食物的行为响应时间和取食多样性存在差异, 揭示了个体差异评估在再引入野化训练成效评估实践中的重要性。本研究中, 身体状况较好的个体(如09号)展现出快速的适应能力和广泛的食物谱, 而活动能力较差的个体(如右眼残疾的01号、尾羽磨损的02号和左脚残疾的07号)则表现出较长的适应时间和较低的取食丰富度。这一结果表明, 个体活动能力影响了取食多样性和行为模式的变化(Wemelsfelder et al., 2000), 可作为评估和预测其野化训练成效及放归后生存能力的重要因子。因此, 在野化放归实践中对放归个体进行基于行为的定量化评估与管理至关重要(Mertes et al., 2019), 对于适应能力较弱的个体, 应考虑制定更长期、更具针对性的训练方案, 并作为其放归评估中的重要筛选依据。

4 结论与展望

本研究证实了野化训练朱鹮具备适应江苏盐城滨海湿地自然食物的潜力, 并通过行为生态学方法, 揭示了食物丰容驱动行为适应的动态过程。研究成果为优化朱鹮及其他濒危动物的再引入技术体系提供了理论支撑与实践指导。基于本研究结果, 对江苏盐城朱鹮的再引入项目提出以下建议, 放归前的野化训练: (1)食物丰容。应借助平时常用食盘, 诱导朱鹮发现并“认识”陌生食物、尝试取食, 应包含多样化的本地食物, 特别是双齿围沙蚕、脊尾白虾、日本沼虾、黑鲫等高适应度物种, 以提高朱鹮

① 刘莉 (2021) 北戴河朱鹮半野化种群对低温和滨海食物的适应性. 硕士学位论文, 安徽师范大学, 安徽芜湖.

搜索食物和处理食物的能力。(2)栖息地丰容。通过在网笼内引入潮沟、模拟滨海湿地环境等栖息地丰容措施，锻炼朱鹮在滩涂觅食的技能，在大网笼内主动觅食并锻炼“自主获取”滨海食物能力。(3)个体监控与筛选。建立个体行为档案，监测野化训练个体的觅食行为效率与身体状况，尤其关注适应较慢的个体，为后续筛选放归个体提供重要依据。放归后的管理: (1)食物补充。放归初期在栖息地内分散设置投食点，优先提供朱鹮接受度高的滨海食物，以鼓励其自然觅食，帮助其度过环境适应期。(2)跟踪监测。调查并分析放归个体对自然食物的选择偏好与取食效率，以优化食性转换实验和野化训练方案，最大限度地恢复其觅食技能与行为多样性，为朱鹮在东部沿海地区的种群重建提供科学支持。

致谢: 感谢贵州师范大学张仁意教授和盐城工学院隋延鸣副教授在滨海食物鉴定中给予的帮助!

ORCID

朱芸 https://orcid.org/0009-0000-7719-5676
徐向龙 https://orcid.org/0000-0001-7062-3535
雷宇 https://orcid.org/0000-0003-2007-7366

参考文献

Altmann J (1974) Observational study of behavior: Sampling methods. Behaviour, 49, 227–267.

BirdLife International (2018) The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T22697548A132069229. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22697548A132069229.en. (accessed on 2024-10-01)

Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. Science Advances, 1, e1400253.

de Almeida AC, Palme R, Moreira N (2018) How environmental enrichment affects behavioral and glucocorticoid responses in captive blue-and-yellow macaws (*Ara ararauna*). Applied Animal Behaviour Science, 201, 125–135.

Ding CQ (2004) Research on the Crested Ibis. Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, Shanghai. (in Chinese) [丁长青 (2004) 朱鹮研究. 上海科技教育出版社, 上海.]

Dingemanse NJ, Both C, van Noordwijk AJ, Rutten AL, Drent PJ (2003) Natal dispersal and personalities in great tits (*Parus major*). Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 270, 741–747.

Edge C, Thompson D, Hao CY, Houlahan J (2014) The response of amphibian larvae to exposure to a glyphosate-based herbicide (Roundup WeatherMax) and nutrient enrichment in an ecosystem experiment. Ecotoxicology and Environmental Safety, 109, 124–132.

Eguizábal GV, Palme R, Villarreal D, Dal Borgo C, Di Rienzo JA, Busso JM (2013) Assessment of adrenocortical activity and behavior of the collared anteater (*Tamandua tetradactyla*) in response to food-based environmental enrichment. Zoo Biology, 32, 632–640.

Gooch S, Ashbrook K, Taylor A, Székely T (2015) Using dietary analysis and habitat selection to inform conservation management of reintroduced Great Bustards *Otis tarda* in an agricultural landscape. Bird Study, 62, 289–302.

Hamilton LP, Kelly PA, Williams DF, Kelt DA, Wittmer HU (2010) Factors associated with survival of reintroduced riparian brush rabbits in California. Biological Conservation, 143, 999–1007.

IUCN/SSC (IUCN Species Survival Commission) (2013) Guidelines for Reintroductions and Other Conservation Translocations. Version 1.0. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2013-009.pdf. (accessed on 2024-10-01)

Jiang ZG (2004) Principle of Animal Behavior and Methods in Species Conservation. Science Press, Beijing. (in Chinese) [蒋志刚 (2004) 动物行为原理与物种保护方法. 科学出版社, 北京.]

Joseph M, Wunderle JR (1991) Age-specific foraging proficiency in birds. In: Current Ornithology (ed. Dennis MP), pp. 273–324. Plenum Publishing Corporation, New York.

Kalan AK, Kulik L, Arandjelovic M, Boesch C, Haas F, Dieguez P, Barratt CD, Abwe EE, Agbor A, Angedakin S, …, Tagg N, Tennie C, Vergnes V, Welsh A, Wessling EG, Willie J, Wittig RM, Yuh YG, Zuberbühler K, Kühl HS (2020) Environmental variability supports chimpanzee behavioural diversity. Nature Communications, 11, 4451.

Khan AS (2023) The influence of food-based enrichment on the behaviour of captive red pandas *Ailurus fulgens fulgens*. Prithivya, 3, 17–28.

Lehner PN (1992) Sampling methods in behavior research. Poultry Science, 71, 643–649.

Li YH, Yu C, Liao J, Jiang YX, Liu TJ, Luo LJ, Yang S, Yang B, Xu X, Deng T, Li DS, Ran JH (2026) Panda profiles: Integrating personality, cognition, and physiology for conservation success. Conservation Physiology, 14, coag019.

Liu BY, Li L, Lloyd H, Xia CW, Zhang YY, Zheng GM (2016) Comparing post-release survival and habitat use by captive-bred Cabot’s Tragopan (*Tragopan caboti*) in an

experimental test of soft-release reintroduction strategies. Avian Research, 7, 19.

Meng XX, Yang QS, Feng ZJ, Xia L, Feng JC, Zhou YJ, Xu HF (2006) Behavioral diversity of captive alpine musk deer in Xinglongshan Musk Deer Farm. Acta Zoologica Sinica, 52, 1026–1033. (in Chinese with English abstract) [孟秀祥, 杨奇森, 冯祚建, 夏霖, 冯金朝, 周宜君, 徐宏发 (2006) 兴隆山圈养马麝的行为多样性. 动物学报, 52, 1026–1033.]

Meng XX, Yang QS, Feng ZJ, Xu HF, Feng JC, Zhou YJ (2007) Stereotypic behavior of alpine musk deer in captivity. Journal of Northeast Forestry University, 35, 47–48, 57. (in Chinese with English abstract) [孟秀祥, 杨奇森, 冯祚建, 徐宏发, 冯金朝, 周宜君 (2007) 圈养马麝的刻板行为. 东北林业大学学报, 35, 47–48, 57.]

Mertes K, Stabach JA, Songer M, Wacher T, Newby J, Chuven J, Al Dhaheri S, Leimgruber P, Monfort S (2019) Management background and release conditions structure post-release movements in reintroduced ungulates. Frontiers in Ecology and Evolution, 7, 470.

Nelder JA, Wedderburn RWM (1972) Generalized linear models. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 135, 370–384.

Patrick SC, Pinaud D, Weimerskirch H (2017) Boldness predicts an individual's position along an exploration-exploitation foraging trade-off. The Journal of Animal Ecology, 86, 1257–1268.

Pedersen IJ, Tahamtani FM, Forkman B, Young JF, Poulsen HD, Riber AB (2020) Effects of environmental enrichment on health and bone characteristics of fast growing broiler chickens. Poultry Science, 99, 1946–1955.

R Core Team (2024) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.

Réale D, Gallant BY, Leblanc M, Festa-Bianchet M (2000) Consistency of temperament in bighorn ewes and correlates with behaviour and life history. Animal Behaviour, 60, 589–597.

Roberts JL, Luther D (2023) An exploratory analysis of behavior-based and other management techniques to improve avian conservation translocations. Biological Conservation, 279, 109941.

Seddon PJ, Armstrong DP, Maloney RF (2007) Developing the science of reintroduction biology. Conservation Biology, 21, 303–312.

Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52, 591–611.

Shepherdson DJ, Carlstead K, Mellen JD, Seidensticker J (1993) The influence of food presentation on the behavior of small cats in confined environments. Zoo Biology, 12, 203–216.

Shi DC, Cao YH (2001) The Crested Ibis of China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [史东仇, 曹永汉 (2001) 中国朱鹮. 中国林业出版社, 北京.]

Spiezio C, Valsecchi V, Sandri C, Regaiolli B (2018) Investigating individual and social behaviour of the northern bald ibis (*Geronticus eremita*): Behavioural variety and welfare. PeerJ, 6, e5436.

Teixeira CP, Azevedo CS, Mendl M, Cipreste CF, Young RJ (2007) Revisiting translocation and reintroduction programmes: The importance of considering stress. Animal Behaviour, 73, 1–13.

Wang GX (2017) Yancheng Coastal Wetland: Comprehensive Scientific Survey Report of Jiangsu Yancheng Wetland & Rare Birds National Nature Reserve. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王国祥 (2017) 盐城沿海湿地: 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区综合科学考察报告. 科学出版社, 北京.]

Wemelsfelder F, Haskell M, Mendl MT, Calvert S, Lawrence AB (2000) Diversity of behaviour during novel object tests is reduced in pigs housed in substrate-impoverished conditions. Animal Behaviour, 60, 385–394.

Xu AL, Zheng YT, Zhang XM, Xu DD, Wang JX, Sun JP (2025) Effect of food enrichment based on diverse feeding regimes on the immunity of *Nibea albiflora* by biochemical and RNA-seq analysis of the spleen. Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 53, 101363.

Xu XL, Jiang JH, Lei Y, Wang C, Qing BP, Ding CQ (2022) Using stable isotope to compare the habitat use and trophic level between the new and old breeding range of wild Crested Ibis in the early breeding season. Avian Research, 13, 100007.

Zhu Y, Wang KH, Li HL, Xu XL, Duan WB, Chen H, Qiu GQ, Chen WH, Lu J, Ding CQ (2024) Ethogram and PAE coding system of Crested Ibis in non-breeding season. Biodiversity Science, 32, 24075. (in Chinese with English abstract) [朱芸, 王凯红, 李洪磊, 徐向龙, 段文斌, 陈浩, 邱国强, 陈卫华, 卢靖, 丁长青 (2024) 朱鹮非繁殖期行为谱及PAE编码系统. 生物多样性, 32, 24075.]

(责任编委: 刘阳 实习责任编辑: 葛兴芳)

附录 Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2026051

朱芸, 王凯红, 李洪磊, 徐向龙, 雷宇, 陈浩, 陈卫华, 蔡新杰, 丁长青 (2026) 朱鹮对滨海食物的适应性: 恢复东部沿海朱鹮种群的初步探索. 生物多样性, 34, 26051. doi: 10.17520/biods.2026051; cstr: 32101.14.biods.2026051.



附录 1　江苏盐城野化训练朱鹮食性转换实验所用的滨海食物

Appendix 1　Coastal foods used in diet-shifting experiments on Crested Ibis during acclimation in Yancheng, Jiangsu

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 26004, pages 1–12
doi: 10.17520/biods.2026004
cstr: 32101.14.biods.2026004

•三维生态学专题•

应用激光雷达技术探究北京地区乌鸦夜栖地选择机制

谢冰[1], 杨海涛[2], 曹吉鑫[3], 李进宇[3], 王茂良[3], 张微[4], 李建强[1], 徐基良[1*]

1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 海南大学生态学院, 海口 570228; 3. 北京市园林绿化科学研究院, 北京 100102; 4. 北京市西山试验林场管理处, 北京 100093

摘要: 城市鸟类夜栖地选择是其在人工环境中适应与生存的关键。现有研究多关注宏观生境或微生境, 对鸟类直接利用的栖枝信息缺乏精准的测量手段和研究。激光雷达技术的高精度数据测量能力使得对鸟类栖枝的三维结构研究成为可能。本研究以北京城区冬季夜栖乌鸦为研究对象, 于2023–2025年在北京市六环内乌鸦主要聚集区域开展调查。在采集36个夜栖样方和36个对照样方的18个生境因子数据的基础上, 进一步使用激光雷达技术测量了1,361个夜栖枝条和581个对照枝条的4个变量, 以分析影响乌鸦夜栖地选择的主要因子。结果表明: 夜栖样方的树高、郁闭度、冠幅、噪声和照度均显著大于对照样方; 夜栖枝条的高度、直径、长度均显著大于对照枝条, 角度显著小于对照枝条。广义线性混合模型和广义线性模型结果表明, 栖树树高和噪声及4个枝条变量均是影响北京城区乌鸦夜栖地选择的关键生境变量, 乌鸦倾向于选择树高更高、环境噪声更大的区域夜栖, 在栖枝上偏好高度较高, 角度平缓, 较短的粗枝条或较长的细枝条。研究揭示了北京城区乌鸦夜栖地选择机制, 为城市鸟类管理提供了一定的科学依据, 同时验证了通过激光雷达技术开展鸟类栖息地精细化研究的可行性。

关键词: 夜栖地选择; 地基激光雷达; 乌鸦; 栖枝结构; 城市鸟类

谢冰, 杨海涛, 曹吉鑫, 李进宇, 王茂良, 张微, 李建强, 徐基良 (2026) 应用激光雷达技术探究北京地区乌鸦夜栖地选择机制. 生物多样性, 34, 26004. doi: 10.17520/biods.2026004; cstr: 32101.14.biods.2026004.
Xie B, Yang HT, Cao JX, Li JY, Wang ML, Zhang W, Li JQ, Xu JL (2026) LiDAR-based investigation of the mechanisms governing nocturnal roost selection by crows in the Beijing urban area. Biodiversity Science, 34, 26004. doi: 10.17520/biods.2026004; cstr: 32101.14.biods.2026004.

LiDAR-based investigation of the mechanisms governing nocturnal roost selection by crows in the Beijing urban area

Bing Xie[1], Haitao Yang[2], Jixin Cao[3], Jinyu Li[3], Maoliang Wang[3], Wei Zhang[4], Jianqiang Li[1], Jiliang Xu[1*]

1 *School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
2 *School of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China*
3 *Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China*
4 *Administration of Xishan Mountain Experimental Forest Farm, Beijing 100093, China*

ABSTRACT

Aims: The selection of nocturnal roosting sites is a critical aspect of urban birds' adaptation and survival within built environments. Existing studies have predominantly focused on macrohabitat or microhabitat characteristics, yet lack precise measurement methods and research on the perching branch information directly utilized by birds. LiDAR technology, with its high-precision data measurement capabilities, makes it possible to study the three-dimensional structure of avian perching branches. As a typical urban-adapted species, crows often form large-scale aggregated roosting groups in cities in winter, triggering human–wildlife conflict issues. To explore the key factors influencing their nocturnal roost selection and verify the feasibility of LiDAR in the refined research of bird habitats, this study took winter roosting crows in urban Beijing as the focal species and conducted surveys in the main crow aggregation areas within the 6th Ring Road of Beijing from 2023 to 2025.

收稿日期 Received: 2026-01-04; 接受日期 Accepted: 2026-03-13
基金项目: 北京市科学技术委员会资助项目(Z221100005222015) Supported by the Beijing Municipal Science and Technology Commission (Z221100005222015)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xujiliang@bjfu.edu.cn

Methods: Based on data collected on 18 habitat factors from 36 roosting quadrats and 36 control quadrats, we further employed terrestrial laser scanning to measure four variables for 1,361 roosting branches and 581 control branches. Among the control branches, 349 were from roosting trees and 232 from non-roosting trees. The Mann-Whitney U test was used to compare differences in the 18 habitat factors between roosting and control quadrats. The Kruskal-Wallis test was applied to examine pairwise differences among roosting branches, control branches on roosting trees, and control branches on non-roosting trees. Further, generalized linear mixed models (GLMMs) and generalized linear models (GLMs) were adopted to identify the key variables affecting crow nocturnal roost selection.
Results: The results indicated that tree height, canopy closure, crown width, noise, and illuminance were significantly higher in roosting quadrats compared to control quadrats. Furthermore, the height, diameter, and length of nocturnal roosting branches were significantly greater than those of both control branch groups, while the branch angle was significantly smaller. Between the two control groups, only branch height showed a significant difference. Analyses using GLMM revealed that tree height and noise were key habitat factors affecting nocturnal roost selection. GLM analyses revealed that branch angle, the quadratic term of branch height, and the interaction between branch diameter and branch length all had significant effects on the nocturnal roosting site selection by crows.
Conclusion: Crows exhibited a clear preference for nocturnal roosting sites characterized by taller trees and higher ambient noise levels. At the branch scale, they selectively perched on branches positioned at greater heights with shallower angles, which were typically either long and moderately thick or short and thick. This study elucidates the nocturnal roosting selection mechanism of crows in urban Beijing and offers a scientific basis for evidence-based urban bird management. Furthermore, it demonstrates the feasibility and distinct advantages of employing LiDAR technology in fine-scale habitat research, highlighting its potential to advance urban ornithological studies.
Key words: nocturnal roost selection; terrestrial laser scanner; crows; roosting branch architecture; urban birds

夜栖地是动物夜间休息的场所。昼行性鸟类夜间视觉能力降低, 感知危险的能力降低, 因此, 适宜的夜栖地对其夜间的安全极为重要(原宝东等, 2012)。目前国内外已有不少关于鸟类夜栖地的报道(Thiel et al., 2007), 但多集中在自然生态系统中, 对大型城市中鸟类夜栖地特征的研究则相对较为薄弱。在北方, 冬季恶劣的气候条件和稀少的食物资源给鸟类带来了多重压力(Sherry & Holmes, 1996)。在这种条件下, 鸟类生存需要形成生理或行为的适应, 例如选择安全且有利于减少能量损失的冬季夜栖地(Thiel et al., 2007)。基于鸟类对夜栖地的明显偏好性和选择性(原宝东等, 2017), 明确影响城市中鸟类冬季夜栖地选择的因素可为城市鸟类的保护和管理提供科学依据。

乌鸦是雀形目鸦科鸦属(*Corvus*)鸟类的俗称(https://www.britannica.com/animal/crow-bird), 广泛分布在世界上除南极洲外的大部分地区, 对城市环境表现出高度的适应性(Cunningham et al., 2016)。小嘴乌鸦(*Corvus corone*)等11种乌鸦可利用城市环境作为夜栖地(Benmazouz et al., 2021), 且常会形成大规模的夜栖集群。在北京城区, 每年冬季小嘴乌鸦的大规模聚集性夜栖行为已经成为一种独特的城市生态现象(王宁等, 2016), 但其带来的噪声、卫生等问题也在一定程度上导致了人鸟冲突。准确揭示其冬季栖息地偏好是理解其城市适应策略的关键, 对科学管理其种群也具有重要的参考价值(Nyhus, 2016)。

对于在城市越冬的鸟类, 植被结构和环境条件对其夜栖地的选择至关重要。已有研究多采用栖息地样方调查的方法, 通过测量栖树特征(如树高、胸径等)与环境因子(如温度、人为干扰等), 以揭示这些变量对鸟类夜栖地选择的影响(杨勇等, 2011)。这一方法成熟可靠, 但在量化树冠内部复杂的三维结构信息方面仍存在测量效率和精度的挑战, 而枝条直径、角度等精细的结构很可能决定了鸟类对具体停栖位置的选择(Holland et al., 2024)。近年来, 激光雷达技术的发展极大地提高了环境测量的精度和效率(李顺等, 2019), 基于激光雷达数据的植被结构指标被广泛用于研究动物与栖息地的关系(Ackers et al., 2015; 白梓彤等, 2026)。其中, 地基激光雷达(terrestrial laser scanner, TLS)以其毫米级的高精度和强大的穿透性, 使得对树冠内部复杂三维结构的精准测量成为可能(卢军等, 2021)。

目前, 将TLS应用于城市鸟类栖息地选择研究, 特别是针对树冠内部栖枝三维结构的研究还属于探索前沿(Holland et al., 2024)。因此, 本研究在通

过栖息地样方法采集栖树特征与环境因子的基础上, 进一步使用TLS测量枝条结构, 旨在探明微生境尺度影响乌鸦夜栖地选择的关键因子, 还从更精细的栖枝结构上揭示其夜栖地选择策略, 以期为北京城市鸟类保护和精细化管理提供更精准的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地点

北京市(115°24′–117°30′ E, 39°38′–41°05′ N)位于华北平原北部, 西、北和东北三面环山, 东南部为平原, 地势西北高、东南低。北京地区属暖温带半湿润半干旱季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 年均降水量585.4 mm, 年均气温13.4℃。北京市总面积16,410.5 km^2, 中心城区包括东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区, 城市布局具有明显的环带特征, 中心地区主要分布在六环以内。

1.2 夜栖地微生境调查

以北京市六环内的城区为研究区域, 于2023–2025年秋冬季对乌鸦的数量及夜栖地分布开展调查。结合历史文献记录和实地调查结果, 在研究区域内确定3个最主要的乌鸦集群夜栖区域: 清华大学及其周边、北京师范大学及其周边、西单(图1), 并于2024年1月和12月在以上区域开展生境因子的调查。

若在19:00后观察到乌鸦集群停歇于某一树, 树下可观察到大量粪便, 即将此树确定为夜栖树, 记录该树树种和地理坐标, 并以夜栖树为中心, 设置10 m × 10 m的样方测定树高、胸径、冠幅、郁闭度、噪声、照度、温度、风速、到最近水体距离、人流量、车流量、街道走向、到最近道路距离、最近道路宽度、到最近建筑距离、建筑密度、最近建筑高度、最近建筑是否高于栖树(附录1)。在夜栖树随机方向上的200–300 m距离内选取一棵无乌鸦停歇, 且地上无鸟类粪便的树设置对照样方, 测量上述生境因子。在清华大学及其周边(THU, n = 34)、北京师范大学及其周边(BNU, n = 30)及西单(XD, n = 8) 3个主要夜栖区域共调查了72处样方(夜栖与对照各36处)。

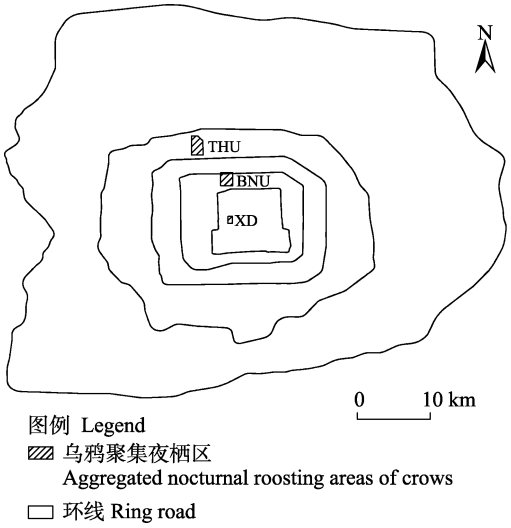


图1 北京城区乌鸦主要集群夜栖区域。THU: 清华大学及其周边; BNU: 北京师范大学及其周边; XD: 西单。
Fig. 1 Major aggregated nocturnal roosting areas of crows in the urban area of Beijing. THU, Tsinghua University and its surrounding area; BNU, Beijing Normal University and its surrounding area; XD, Xidan.

1.3 TLS数据采集与处理

于2025年2月, 在夜间11:00后乌鸦进入稳定栖息状态且道路上车流量和人流量减少时, 使用LiPod P1 (北京数字绿土科技股份有限公司)采集TLS数据。LiPod P1是一款高精度的激光扫描仪, 扫描频率为1,200,000点/s, 测程600 m, 100 m处测距精度5 mm。在乌鸦3个聚集夜栖区域的核心分布路段, 沿道路以20 m为间隔设置采样站点进行数据采集, 共采集64站。通过多站点云的拼接和配准, 生成扫描区域的高精度三维环境结构。

使用LiDAR360MLS 8.2软件(https://www.greenvalleyintl.com/LiDAR360MLS)内置的城市道路场景深度学习分类模型对点云数据进行自动化分类, 该模型以Point-Voxel CNN (PVCNN)架构为核心构建, 能够有效识别典型城市地物类别。对模型分类有误的点云进行人工修正, 以提高分类精度。随后进行归一化处理, 并筛选分类结果中的“高植被点”, 对树木上的乌鸦进行目视解译, 有乌鸦栖息的树确定为夜栖树。测量乌鸦夜栖枝条的高度、直径、长度和与水平面的角度(图2, 附录2)。同时在同一批夜栖树及同路段的非夜栖树上随机选取未被乌鸦利用的枝条为对照枝条, 以代表研究区域内乌鸦可利用的全部枝条资源。共测量乌鸦夜栖枝条1,361个, 对

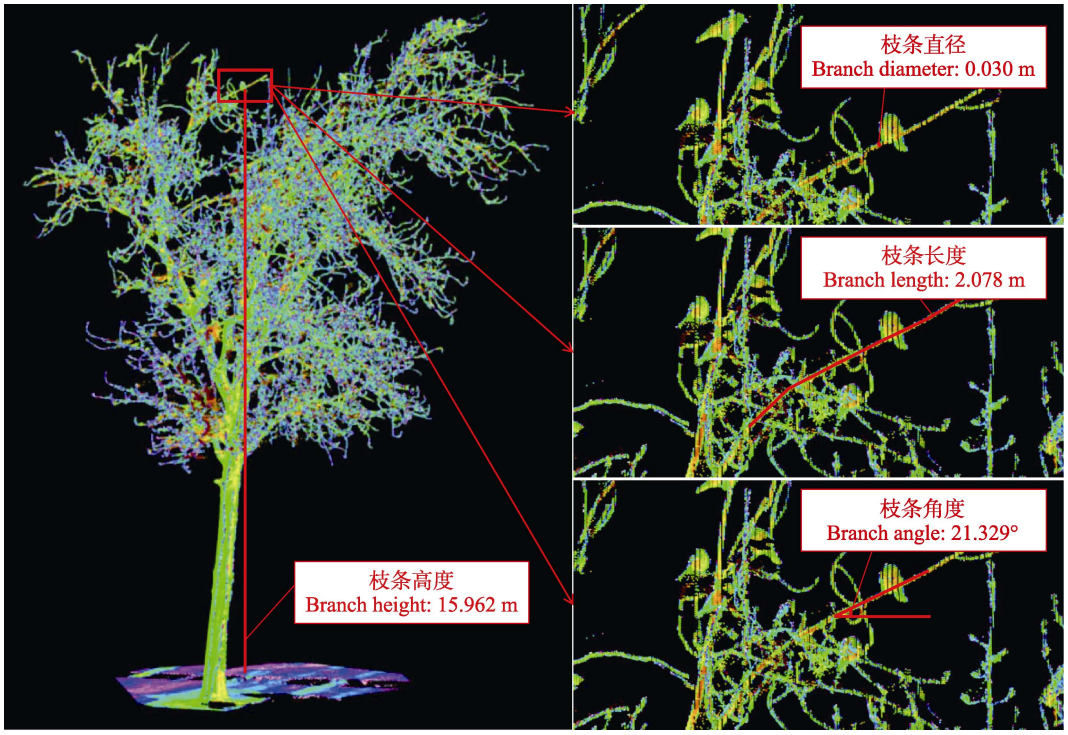


图2　基于点云数据的枝条变量测量示意图
Fig. 2　Schematic of point cloud-based branch variable measurement

照枝条581个。对照枝条中, 349个来自夜栖树, 232个来自非夜栖树。

1.4　数据分析

对微生境调查的18个生境因子和激光雷达测量的4个枝条变量分别进行统计分析。首先对微生境调查的夜栖组和对照组进行单变量差异性检验。对连续变量进行正态性检验, 分类变量则使用卡方检验进行分析, 符合正态分布的变量使用配对样本*t*检验, 不符合正态分布的变量使用Wilcoxon符号秩检验。随后使用广义线性混合模型(generalized linear mixed model, GLMM)中的逻辑斯谛回归(logistic regression)构建模型, 以探究影响乌鸦夜栖地选择最重要的因子。在构建模型前对生境因子进行筛选以提高模型精度(Urbanowicz et al., 2018)。首先保留差异性检验中结果显著的生境因子, 其次将所有生境因子分别进行单变量的GLMM分析, 剔除拟合优度$R^2 < 0.1$的生境因子(MacDonald et al., 2019)。然后通过Spearman相关分析检验余下各生境因子的相关性, 基于单变量GLMM分析结果, 剔除相关性值$|r| > 0.7$的生境因子中小样本校正后的赤池信息准则(Akaike information criterion corrected for small sample size, AIC_c)较高的变量(Dormann et al., 2013), 得到最终用于构建模型的生境因子集。以夜栖组和对照组的二项变量(0/1)作为响应变量, 将样方编号(每个夜栖样方及其对照样方为一组)作为随机效应, 生境因子作为固定效应构建全模型并进行全子集回归, 根据AIC_c值对模型子集进行优度排序, 保留$\Delta AIC_c < 2$的模型为最优模型并进行模型平均(Burnham et al., 2011)。最优模型包含的每个生境因子的相对重要性(relative importance, RI)由包含该生境因子的所有模型的模型权重(Akaike weight)之和计算得来(Chen et al., 2020)。

对激光雷达测量的夜栖枝条和对照枝条变量同样进行差异性检验, 根据枝条来源分为3组: 夜栖枝条、夜栖树上的对照枝条、非夜栖树上的对照枝条。使用Kruskal-Wallis检验比较3组间的整体差异, 若结果显著, 进一步采用Dunn检验进行事后两两比较, *P*值经Bonferroni校正。随后, 为探究枝条特征对乌鸦夜栖选择的影响, 建立2个广义线性模型(generalized linear model, GLM)进行分析。模型设定如下: (1)模型1以夜栖枝条和夜栖树上的对照枝条为数据集; (2)模型2以夜栖枝条和非夜栖树上的对

照枝条为数据集。所有数据按80%与20%的比例随机划分为训练集和测试集。考虑到枝条变量与夜栖概率间可能存在的非线性与交互效应，首先基于4个主效应建立基线模型，再采用基于赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)的向前逐步回归(forward stepwise regression)依次纳入二次项与交互项，保留使AIC值下降超过2的项，获得最终模型。模型参数以优势比(odds ratio, OR)及95%置信区间(confidence interval, CI)表示。模型判别能力通过受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)下面积(area under the curve, AUC)进行评估。

上述数据处理在R 4.5.1 (R Core Team, 2024)中进行，所有变量平均值在描述时采用算术平均值 ± 标准差(mean ± SD)表示。

2 结果

2.1 对夜栖地微生境的选择

在所有夜栖树因子中，夜栖地样方和对照样方的树高、郁闭度和冠幅之间存在显著差异($P < 0.05$)，胸径差异不显著($P > 0.05$)。在所有夜栖环境因子中，噪声和照度存在显著差异($P < 0.05$)，其他生境因子差异均不显著($P > 0.05$)。夜栖地样方的树高(15.58 ± 0.69 m)、郁闭度(2.31 ± 0.87)、冠幅(11.26 ± 0.52 m)、噪声(70.89 ± 1.31 dB)和照度(6.67 ± 11.44 lx)均显著大于对照样方(表1)。

经过筛选，最终保留树高、郁闭度、胸径、冠幅、噪声、照度和街道走向7个生境因子用于多变量GLMM分析。结果显示，共有3个模型的$\Delta AIC_c < 2$，包含5个生境因子(表2)。模型平均结果表明，树高($P < 0.01$)和噪声($P < 0.05$)对乌鸦夜栖地选择具有显著影响(表3)，乌鸦倾向于选择树高较高的夜栖地，且所在夜栖地通常会有较大的环境噪声(图3)。

2.2 对夜栖枝条的选择

夜栖枝条和两组对照枝条的所有测量变量间均存在显著差异($P < 0.001$)，两组对照枝条间仅枝条高度存在显著差异($P < 0.01$) (图4)。

经过筛选，2个GLM的最终模型均纳入了6个变量，包括4个枝条变量的主效应、高度的二次项以及直径与长度的交互项。基于测试集评估，模型1和模型2的AUC值分别为0.923和0.961，具有较高的预测

表1 乌鸦夜栖样方和对照样方生境比较

Table 1 Comparison of habitat variables between roosting plots and control plots

变量 Variables	夜栖样方 Roosting plot (n = 36)	对照样方 Control plot (n = 36)	T/Z	χ^2	P
树高 Tree height (m)	15.58 ± 0.69	12.18 ± 0.47	4.18		< 0.001
胸径 Diameter at breast height (cm)	44.76 ± 19.38	34.92 ± 12.98	–1.76		0.078
冠幅 Crown width (m)	11.26 ± 0.52	9.63 ± 0.52	2.04		0.049
郁闭度 Canopy closure	2.31 ± 0.87	1.83 ± 0.85	–2.51		0.012
噪声 Noise (dB)	70.89 ± 1.31	64.23 ± 1.50	4.24		< 0.001
照度 Illuminance (lx)	6.67 ± 11.44	2.71 ± 2.56	–2.58		0.010
温度 Temperature (℃)	1.90 ± 0.37	1.73 ± 0.34	0.89		0.382
风速 Wind speed (m/s)	0.82 ± 0.67	0.97 ± 0.78	–1.01		0.314
到最近水体距离 Distance to the nearest water (m)	1,329.80 ± 71.54	1,353.85 ± 75.13	–0.80		0.429
人流量 Pedestrian flow (person/min)	13.47 ± 16.34	9.49 ± 10.08	–0.87		0.386
车流量 Traffic flow (vehicle/min)	40.09 ± 38.51	30.77 ± 34.55	–1.27		0.204
到最近道路距离 Distance to the nearest road (m)	3.03 ± 4.43	2.30 ± 4.03	–0.16		0.867
最近道路宽度 Width of the nearest road (m)	17.86 ± 13.00	15.48 ± 12.27	–0.75		0.456
建筑密度 Building side count (count)	1.72 ± 0.78	1.72 ± 0.85	–0.08		0.938
到最近建筑距离 Distance to the nearest building (m)	15.63 ± 9.95	17.70 ± 14.20	–0.58		0.561
最近建筑高度 Height of the nearest building (m)	30.83 ± 17.35	29.18 ± 25.88	–0.66		0.509
街道走向 Street orientation	–	–		1.89	0.596
最近建筑是否高于栖树 Whether the nearest building is higher than the roosting tree	–	–		1.69	0.242

T和Z分别为配对样本t检验和Wilcoxon符号秩检验的统计量。T and Z are the test statistics for the paired t-test and Wilcoxon signed-rank test, respectively.

表2　乌鸦夜栖地选择关键生境因子的模型选择结果

Table 2　Results of model selection for key habitat factors affecting the nocturnal habitat selection of crows

模型参数 Model parameters	*df*	Log(*L*)	AIC_c	ΔAIC_c	权重 Weight
TH + SO(N-S) + N + IL	8	–29.89	78.07	0	0.23
TH + DBH + SO(N-S) + N + IL	9	–29.10	79.11	1.03	0.14
TH + N + IL	5	–34.52	79.94	1.87	0.09

TH: 树高; SO(N-S): 街道走向(南北走向); N: 噪声; IL: 照度; DBH: 胸径。Log(*L*)是log-likelihood (对数似然比)。模型通过ΔAIC_c值和Akaike权重(Weight)进行排序。只展示$\Delta AIC_c < 2$的模型。TH, Tree height; SO(N-S), Street orientation (north-south); N, Noise; IL, Illuminance; DBH, Diameter at breast height. Log(*L*) is the log-likelihood. Models are ranked based on the difference in Akaike information criterion corrected for small sample size (ΔAIC_c) and Akaike weight (Weight). Only models with $\Delta AIC_c < 2$ are presented here.

表3　$\Delta AIC_c < 2$的广义线性混合模型中各保留变量的显著性

Table 3　Significance of retained variables in generalized linear mixed models with $\Delta AIC_c < 2$

变量 Variables	估计值 Estimate	标准误 Standard error	Wald *Z*	相对重要性 Relative importance	*P*
树高 Tree height	1.23	0.46	2.70	0.95	0.007
噪声 Noise	1.04	0.42	2.46	0.93	0.014
照度 Illuminance	1.41	0.83	1.70	0.83	0.089
街道走向(南北走向) Street orientation (north-south)	–0.21	0.73	0.29	0.72	0.772
胸径 Diameter at breast height	0.56	0.53	1.06	0.37	0.290

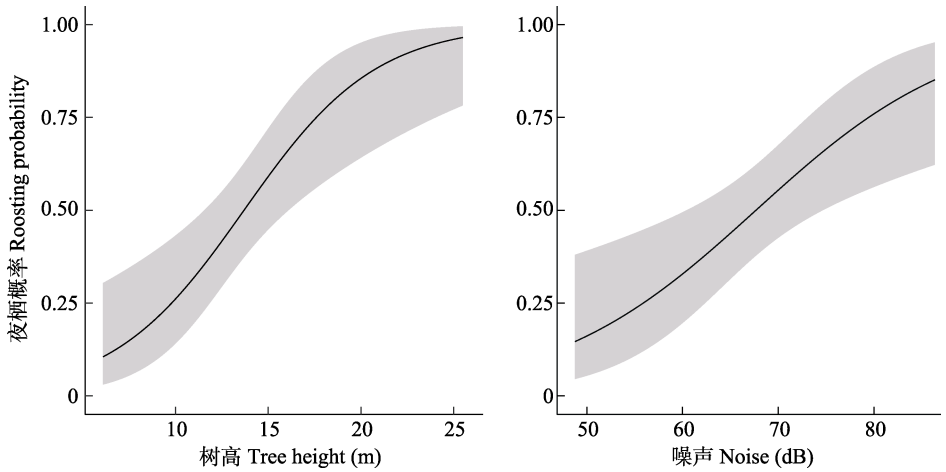


图3　显著生境变量与夜栖选择概率的回归曲线。灰色部分为95%的置信区间。

Fig. 3　Regression curves of significant habitat variables on roost-site selection probability. Gray shading indicates 95% confidence interval.

性能。在模型1中，除枝条长度外，其余变量均对乌鸦的夜栖选择具有显著影响($P < 0.05$; 图5A)；在模型2中，枝条长度和直径的交互效应存在显著影响，枝条角度、枝条高度的二次项对乌鸦的夜栖选择也有显著影响($P < 0.05$; 图5B)。

模型1通过限定样本于夜栖树内部，排除了树间环境差异的干扰，更适于检验枝条结构对乌鸦栖息位置选择的影响，故基于模型1进行进一步分析。结果表明，高度对乌鸦夜栖的选择概率有显著的正效应，其二次项呈显著负效应，即随高度增加乌鸦夜栖的选择概率先上升后下降，存在最适区间。角度与乌鸦夜栖的选择概率显著负相关。枝条直径与枝条长度的交互效应为负向，表明在长枝条水平下，随着枝条直径的增加，乌鸦夜栖选择概率降低(图6)。

3　讨论

3.1　乌鸦夜栖地的栖树和环境特征

多数昼行性鸟类都将隐蔽性作为夜栖地选择的标准之一，如西方灰伯劳(*Lanius excubitor*)选择体积大、茎数密度高的灌丛以回避捕食者(Antczak,

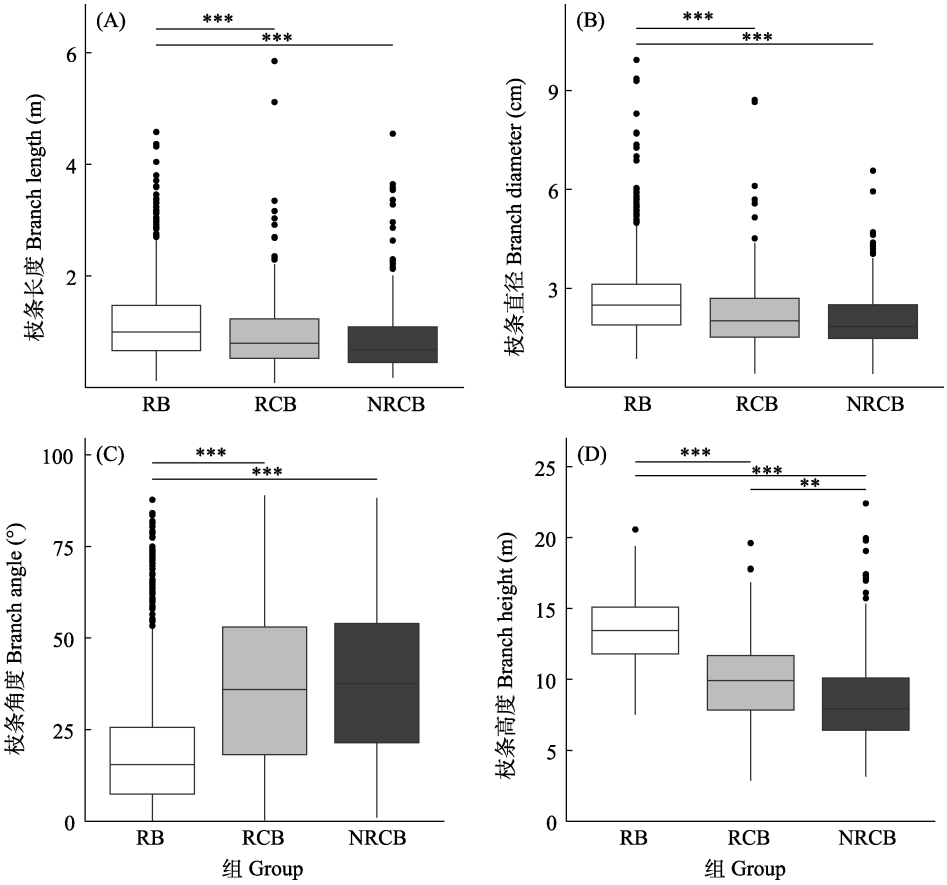


图4　夜栖枝条与不同来源的对照枝条间的比较。RB: 夜栖枝条; **RCB**: 夜栖树上的对照枝条; **NRCB**: 非夜栖树上的对照枝条。** ***P* < 0.01**; *** ***P* < 0.001**。

Fig. 4　Comparison between nocturnal roosting branches and control branches from different sources. RB, Roosting branches; RCB, Control branches from roosting trees; NRCB, Control branches from non-roosting trees. ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

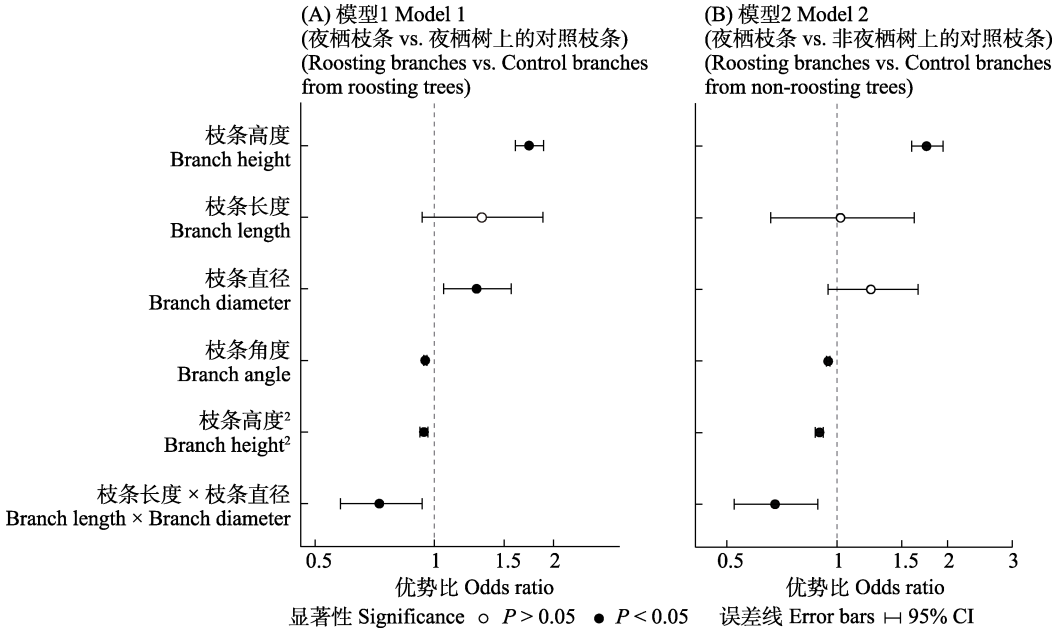


图5　乌鸦夜栖枝条选择影响因子的效应值森林图

Fig. 5　Forest plot of effect sizes for factors influencing crow roosting branch selection

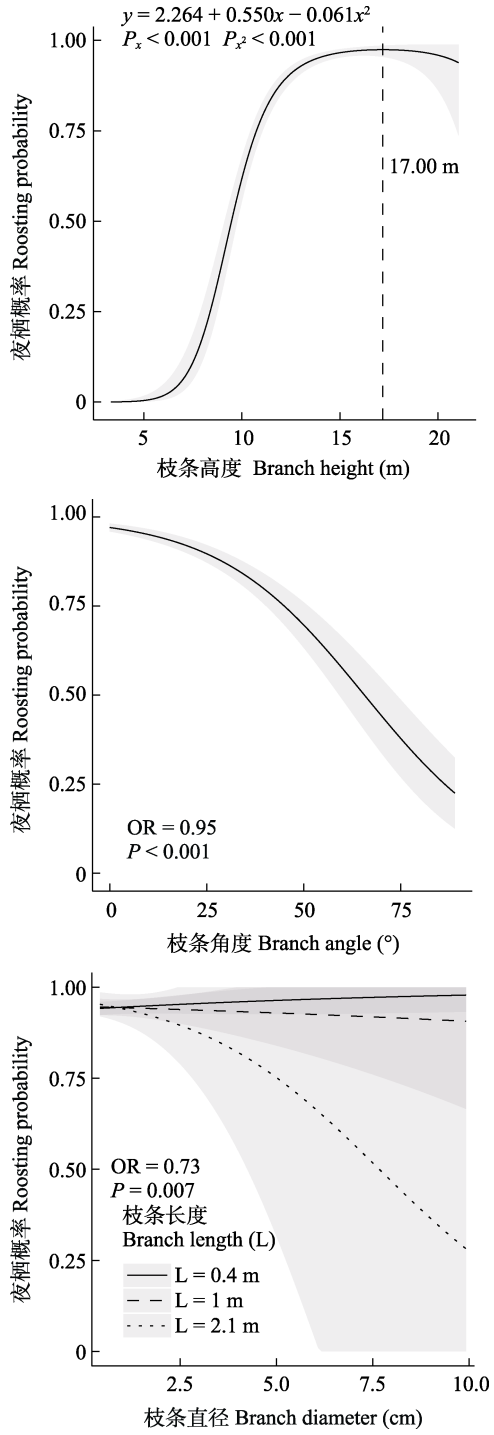


图6　基于模型1 (纳入夜栖枝条和夜栖树上的对照枝条)的枝条变量与夜栖选择概率的响应曲线。灰色部分为95%的置信区间。OR: 优势比。

Fig. 6　Response curves of branch variables on roosting probability based on Model 1 (including roosting branches and control branches on the roosting trees). Gray shading indicates 95% confidence interval. OR, Odds ratio.

2010); 淡胸鸫(*Turdus leucomelas*)偏好高大、树冠茂密的夜栖树(Moraes et al., 2018)。北京城区的乌鸦同样倾向于选择树木高度更高, 郁闭度更高、冠幅更大的乔木作为夜栖树。这与新加坡家鸦(*Corvus splendens*)的夜栖地特征一致, 因为树冠大而密的树木除了提供隐蔽条件外还能显著降低风速, 防止热量流失(Peh & Sodhi, 2002)。此外, 乌鸦的夜栖选择概率与枝条高度之间存在显著的倒U关系, 其最适枝条高度为17 m (图6)。城市中鸟类夜间栖息主要受到来自地面的威胁, 虽然栖息在城市的乌鸦对人类活动有着更大的容忍度, 但仍保持高度警惕(Gorenzel & Salmon, 1995)。乌鸦选择在高大乔木上的较高枝条栖息, 能与行人保持安全距离, 也能有效发现潜在捕食者和威胁(Feng et al., 2025)。但是, 更高的枝条通常需要面临更强风力与更低温度的胁迫, 用于维持自身稳定及抵御低温的能量增加(Zhao et al., 2024)。可见, 乌鸦对栖树和栖枝高度的选择, 本质上是对安全性、能量消耗和栖息空间的权衡。这在其他城市鸟类集群夜栖地研究中得到佐证。例如, 澳大利亚的短嘴黑凤头鹦鹉(*Calyptorhynchus latirostris*)偏好高大、叶密度中等且第一枝枝下高较高的夜栖树(Le Roux, 2017); 中国海口集群夜栖的白鹡鸰(*Motacilla alba*)会选择树高较高、树冠较大的乔木(Jiang et al., 2021); 欧洲的紫翅椋鸟(*Sturnus vulgaris*)则明确偏好小枝可利用量大的树种(Clergeau & Quenot, 2007)。

城市环境对鸟类产生的影响主要源于自然植被的改变、人为干扰的增加(Sol et al., 2013)。一般地, 噪声对鸟类会有负面影响(Ciach & Fröhlich, 2017; Kleist et al., 2017), 但也有研究表明噪声对部分鸟类生境选择的影响小(Martínez-Marivela et al., 2018), 甚至随着鸟类对城市环境的适应, 噪声反而会增加部分对城市耐受性高的鸟类在城市环境中的数量(Proppe et al., 2013)。并且, 有研究表明噪声会降低城市中鸮形目物种的丰富度(Fröhlich & Ciach, 2019), 在能够忍耐高水平噪声干扰的前提下, 乌鸦选择此类环境作为夜栖地能有效避免与城市中其他物种的生态位竞争, 也可以避免城市中可能存在的捕食者的威胁。当然, 乌鸦对噪声的耐受可能存在限度, 因为实地调查中也发现当大型公交车鸣笛噪声超过约85 dB时, 在附近行道树上夜栖的乌鸦会被惊飞。另一方面, 乌鸦的夜栖地通常位于光照相对较大的区域, 如十字路口或商业街道。这

与城市中短嘴鸦(*Corvus brachyrhyncho*)和虹彩吸蜜鹦鹉(*Trichoglossus haematodus*)的夜栖地特征一致。光线充足的区域可能使相关鸟类在自然光线昏暗时能更准确地定位夜栖地，街道上的灯光也能使其更好地观察树下环境和识别威胁，并在必要时便于在夜栖树之间移动(Gorenzel & Salmon, 1995)。

3.2 夜栖枝条特征

树木枝条是多数鸟类栖息、筑巢等行为的直接载体，其角度、直径等参数可能直接影响鸟类的栖息选择(Holland et al., 2024)。北京城区乌鸦对栖枝的选取并非简单偏好某一极端形态，而是多个维度上的综合选择。首先，乌鸦更倾向于选择平缓的枝条栖息，这符合基本的生物力学原理，因为越平缓的枝条越能提供稳定的立足点，鸟类维持栖息姿态的能量消耗更少。灰胸鹦鹉(*Myiopsitta monachus*)在树上栖息或移动时，也偏好水平方向的树枝(Granatosky et al., 2022)。其次，枝条长度和直径对乌鸦夜栖选择的影响存在交互作用，且该交互作用表现为负向。对于较短的枝条，乌鸦的夜栖概率随直径增加而上升；而对于长枝条，乌鸦的栖息概率随直径的增加而下降。枝条直径与长度的交互作用可以从力学稳定性和能量消耗两个方面进行解释。基于欧洲紫翅椋鸟的实验表明，鸟类夜间栖息主要通过足部中央肉垫结构维持平衡(Galton & Shepherd, 2012)，对短嘴鸦的实验也发现鸟类无法单纯依靠体重实现被动抓握，还需要肌肉的主动收缩来调节(Bock, 1965)。较短的枝条晃动幅度小，较粗的直径能提供更稳固的支撑面，有助于减少肌肉调节频率，降低能量支出。但是，过粗的枝条可能超出乌鸦的最佳抓握尺寸范围，反而造成额外能量消耗。乌鸦对于细长枝条的高选择概率可能由于在能够承受乌鸦重量的前提下，细长的枝条柔韧性更好，能够在乌鸦降落时提供一定的缓冲。同时，适度粗细的长枝条能提供更充裕的栖息空间，允许多个个体并排栖息，在冬季夜晚低温环境下能减少热量散失。因此，乌鸦对长枝直径的负选择可能源于对稳定性和低耗能的双重追求。

通过对夜栖枝条、夜栖树上的对照枝条及非夜栖树上的对照枝条的两两比较发现，夜栖枝条与两组对照枝条在全部4个枝条变量上均存在显著差异，而两组对照枝条间仅枝条高度差异显著，且夜栖树的枝条高度显著高于非夜栖树。这进一步凸显了树高在乌鸦夜栖选择中的关键作用。在枝条结构方面，夜栖枝条在长度、直径和角度方面与两组对照枝条均存在显著差异，而两组对照枝条间这3个变量均无显著差异。这表明，枝条结构主要影响乌鸦在夜栖树内的具体栖息位置选择。后续研究应将枝条特征与栖树特征、环境特征综合分析，以明确不同因子对乌鸦夜栖选择的影响与作用。

3.3 激光雷达技术在城市鸟类栖息地研究中的应用

激光雷达技术因其提供了更高的采集效率和数据精度，已经成为生态研究中常见的数据采集手段，在生物多样性相关研究中已有众多尝试(Yang et al., 2025; 白梓彤等, 2026)。Shokirov等(2023)利用地基和无人机激光雷达，探究了植被结构与鸟类物种丰富度的关联。Sasaki等(2016)验证了激光雷达在大型城市公园鸟类物种多样性估测中的可用性。激光雷达技术还广泛应用于森林生态系统中哺乳动物的栖息地选择研究(Davies et al., 2017; Yang et al., 2023; Huang et al., 2025; Russo et al., 2025)。当前研究多聚焦于利用激光雷达技术探究大尺度景观异质性或森林结构对鸟类群落的影响，对树木枝干结构的精细测量则多用于生物量的计算(Disney et al., 2018)。Holland等(2024)首次通过地基激光雷达测量树木枝条信息，量化了大型古树作为鸟类栖息地的重要性。本研究将激光雷达获取的精确枝条参数与乌鸦的夜栖选择相结合，验证了这一技术在城市鸟类栖息地选择精细化分析方面的有效性。后续可基于高精度数据，以鸟类个体为中心计算三维隐蔽度，深入探索其栖息地选择策略。随着树木枝干结构提取算法的优化(陶胜利等, 2025)，未来还可以构建多时期、大规模的枝条形态特征数据库，结合长期的鸟类观测数据，建立多时空尺度的城市鸟类栖息地利用模型，为城市生物多样性保护与绿地精准化管理提供科学支撑。

4 结论

本研究基于微生境调查和激光雷达技术，探究了乌鸦在北京城区冬季的夜栖地选择机制。所得结果为北京城区乌鸦栖息地管理提供了直接、精准的科学依据。在乌鸦聚集区域，可通过对符合上述特

征的树木和枝条进行调整, 降低其分布密度, 进而减少其聚集栖息带来的粪便污染等扰民问题, 促进城市中鸟类与人类的和谐共存。

本研究也通过激光雷达技术量化了乌鸦夜栖的栖枝选择偏好, 验证了该技术在量化鸟类栖息地精细结构上的优势与可行性, 为探究鸟类对复杂空间结构的利用提供了新的思路与技术途径。在未来研究中, 可将激光雷达技术同长期的鸟类监测数据与气候等环境数据相结合, 构建更完整的城市鸟类栖息地利用模型。

ORCID

谢冰 https://orcid.org/0009-0000-6073-4346
杨海涛 https://orcid.org/0000-0002-6053-9505
李建强 https://orcid.org/0000-0002-0029-1747

参考文献

Ackers SH, Davis RJ, Olsen KA, Dugger KM (2015) The evolution of mapping habitat for northern spotted owls (*Strix occidentalis caurina*): A comparison of photo-interpreted, landsat-based, and LiDAR-based habitat maps. Remote Sensing of Environment, 156, 361–373.

Antczak M (2010) Winter nocturnal roost selection by a solitary passerine bird, the great grey shrike *Lanius excubitor*. Ornis Fennica, 87(3), 99–105.

Bai ZT, Wang C, Qi ZY (2026) Biophony responses to different vegetation structure in urban central parks of Beijing. Biodiversity Science, 34, 25218. (in Chinese with English abstract) [白梓彤, 王成, 齐志勇 (2026) 北京中心城区公园中生物声对植被三维结构的响应. 生物多样性, 34, 25218.]

Benmazouz I, Jokimäki J, Lengyel S, Juhász L, Kaisanlahti-Jokimäki ML, Kardos G, Paládi P, Kövér L (2021) Corvids in urban environments: A systematic global literature review. Animals, 11, 3226.

Bock WJ (1965) Experimental analysis of the avian passive perching mechanism. American Zoologist, 5, 681.

Burnham KP, Anderson DR, Huyvaert KP (2011) AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: Some background, observations, and comparisons. Behavioral Ecology and Sociobiology, 65, 23–35.

Chen J, Elsgaard L, Van Groenigen KJ, Olesen JE, Liang Z, Jiang Y, Lærke PE, Zhang YF, Luo YQ, Hungate BA, Sinsabaugh RL, Jørgensen U (2020) Soil carbon loss with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes. Global Change Biology, 26, 1944–1952.

Ciach M, Fröhlich A (2017) Habitat type, food resources, noise and light pollution explain the species composition, abundance and stability of a winter bird assemblage in an urban environment. Urban Ecosystems, 20, 547–559.

Clergeau P, Quenot F (2007) Roost selection flexibility of European starlings aids invasion of urban landscape. Landscape and Urban Planning, 80, 56–62.

Cunningham SJ, Madden CF, Barnard P, Amar A (2016) Electric crows: Powerlines, climate change and the emergence of a native invader. Diversity and Distributions, 22, 17–29.

Davies AB, Ancrenaz M, Oram F, Asner GP (2017) Canopy structure drives orangutan habitat selection in disturbed Bornean forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 114, 8307–8312.

Disney MI, Boni Vicari M, Burt A, Calders K, Lewis SL, Raumonen P, Wilkes P (2018) Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. Interface Focus, 8, 20170048.

Dormann CF, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz JRG, Gruber B, Lafourcade B, Leitão PJ, Münkemüller T, McClean C, Osborne PE, Reineking B, Schröder B, Skidmore AK, Zurell D, Lautenbach S (2013) Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography, 36, 27–46.

Feng JY, Wang MM, Zhang QY, Xia CW (2025) Winter roost preferences of crows in Beijing City. Ecology and Evolution, 15, e70931.

Fröhlich A, Ciach M (2019) Nocturnal noise and habitat homogeneity limit species richness of owls in an urban environment. Environmental Science and Pollution Research, 26, 17284–17291.

Galton PM, Shepherd JD (2012) Experimental analysis of perching in the European starling (*Sturnus vulgaris*: Passeriformes; Passeres), and the automatic perching mechanism of birds. Journal of Experimental Zoology, Part A: Ecological Genetics and Physiology, 317, 205–215.

Gorenzel WP, Salmon TP (1995) Characteristics of American crow urban roosts in California. The Journal of Wildlife Management, 59, 638.

Granatosky MC, Young MW, Herr V, Chai C, Raidah A, Kairo JN, Anaekwe A, Havens A, Zou B, Ding B, Chen C, De Leon D, Shah H, Valentin J, Hildreth L, Castro T, Li T, Yeung A, Dickinson E, Youlatos D (2022) Positional behavior of introduced monk parakeets (*Myiopsitta monachus*) in an urban landscape. Animals, 12, 2372.

Holland A, Gibbons P, Thompson J, Roudavski S (2024) Terrestrial LiDAR reveals new information about habitats provided by large old trees. Biological Conservation, 292, 110507.

Huang ZP, Chen YL, Yang HT, Fang YH, Cheng K, Guan HC, Grueter CC, Xiao W, Guo QH (2025) Associations between forest vertical structure and habitat preferences of black-and-white snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) in high-elevation environments. Ecological Informatics, 90,

103269.

Jiang XY, Zhang CJ, Zhou B, Liang W (2021) Sleeping in a noisy world: Roosting sites of large aggregations of white wagtails *Motacilla alba* in a tropical city, China. Ornithological Science, 20, 109–113.

Kleist NJ, Guralnick RP, Cruz A, Francis CD (2017) Sound settlement: Noise surpasses land cover in explaining breeding habitat selection of secondary cavity-nesting birds. Ecological Applications, 27, 260–273.

Le Roux C (2017) Nocturnal Roost Tree, Roost Site and Landscape Characteristics of Carnaby's Black-Cockatoo (*Calyptorynchus latirostris*) on the Swan Coastal Plain. PhD dissertation, Edith Cowan University, Perth.

Li S, Zou L, Gong YN, Yang HT, Wang TM, Feng LM, Ge JP (2019) Advances in LiDAR technology in the field of animal ecology. Biodiversity Science, 27, 1021–1031. (in Chinese with English abstract) [李顺, 邹亮, 宫一男, 杨海涛, 王天明, 冯利民, 葛剑平 (2019) 激光雷达技术在动物生态学领域的研究进展. 生物多样性, 27, 1021–1031.]

Lu J, Liu XZ, Meng WL, Li HJ (2021) Methodology of individual tree 3D reconstruction based on terrestrial laser scanning point cloud data. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 45(6), 193–199. (in Chinese) [卢军, 刘宪钊, 孟维亮, 李红军 (2021) 基于地面激光点云数据的单木三维重建方法. 南京林业大学学报(自然科学版), 45(6), 193–199.]

MacDonald DW, Bothwell HM, Kaszta Ż, Ash E, Bolongon G, Burnham D, Can ÖE, Campos-Arceiz A, Channa P, Clements GR, Hearn AJ, Hedges L, Htun S, Kamler JF, Kawanishi K, MacDonald EA, Mohamad SW, Moore J, Naing H, Onuma M, Penjor U, Rasphone A, Mark Rayan D, Ross J, Singh P, Tan CKW, Wadey J, Yadav BP, Cushman SA (2019) Multi-scale habitat modelling identifies spatial conservation priorities for mainland clouded leopards (*Neofelis nebulosa*). Diversity and Distributions, 25, 1639–1654.

Martínez-Marivela I, Morales MB, Iglesias-Merchán C, Delgado MP, Tarjuelo R, Traba J (2018) Traffic noise pollution does not influence habitat selection in the endangered little bustard. Ardeola, 65, 261.

Moraes ALB, Da Silveira NSD, Pizo MA (2018) Nocturnal roosting behavior of the pale-breasted thrush (*Turdus leucomelas*) and its relation with daytime area of use. The Wilson Journal of Ornithology, 130, 828–833.

Nyhus PJ (2016) Human–wildlife conflict and coexistence. Annual Review of Environment and Resources, 41, 143–171.

Peh KS, Sodhi NS (2002) Characteristics of nocturnal roosts of house crows in Singapore. The Journal of Wildlife Management, 66, 1128.

Proppe DS, Sturdy CB, St. Clair CC (2013) Anthropogenic noise decreases urban songbird diversity and may contribute to homogenization. Global Change Biology, 19, 1075–1084.

R Core Team (2024) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/. (accessed on 2024-05-08)

Russo NJ, Takuo JM, Tegebong V, LeBreton M, Dean M, Ferraz A, Barbier N, Wikelski M, Ordway EM, Saatchi S, Smith TB (2025) Spaceborne and UAV-LiDAR reveal hammer-headed bat preference for intermediate canopy height and diverse structure in a Central African rainforest. Movement Ecology, 13, 30.

Sasaki T, Imanishi J, Fukui W, Morimoto Y (2016) Fine-scale characterization of bird habitat using airborne LiDAR in an urban park in Japan. Urban Forestry & Urban Greening, 17, 16–22.

Sherry TW, Holmes RT (1996) Winter habitat quality, population limitation, and conservation of Neotropical-Nearctic migrant birds. Ecology, 77, 36–48.

Shokirov S, Jucker T, Levick SR, Manning AD, Bonnet T, Yebra M, Youngentob KN (2023) Habitat highs and lows: Using terrestrial and UAV LiDAR for modelling avian species richness and abundance in a restored woodland. Remote Sensing of Environment, 285, 113326.

Sol D, Lapiedra O, González-Lagos C (2013) Behavioural adjustments for a life in the city. Animal Behaviour, 85, 1101–1112.

Tao SL, Wang D, Xie H, Zhang WM, Zhang ZM, Dong XJ, Chen YP, Qi JB, Cheng K, Yang ZK, Qi ZY, Li WK, Su YJ, Hu TY, Ma Q, Li Y, Cai SS, Wang B, Yang HT, Ren Y, Jin SC, Zhang XT, Bai H, Yang ZY, Hu XM, Asadilla Yusup, Huang HG, Xu Q, Guo QH (2025) Review and prospects of the development of LiDAR in ecology and geosciences. National Remote Sensing Bulletin, 29, 1963–2004. (in Chinese with English abstract) [陶胜利, 王迪, 谢欢, 张吴明, 张志明, 董秀军, 陈一平, 漆建波, 程凯, 杨泽坤, 齐志勇, 李文楷, 苏艳军, 胡天宇, 马勤, 李媛, 蔡尚书, 王彬, 杨海涛, 任淯, 金时超, 张欣彤, 白皓, 杨子炎, 胡晓梅, 艾萨迪拉·玉苏甫, 黄华国, 许强, 郭庆华 (2025) 激光雷达在生态与地学领域的发展回顾与展望. 遥感学报, 29, 1963–2004.]

Thiel D, Unger C, Kéry M, Jenni L (2007) Selection of night roosts in winter by capercaillie *Tetrao urogallus* in Central Europe. Wildlife Biology, 13(Suppl.1), 73–86.

Urbanowicz RJ, Meeker M, La Cava W, Olson RS, Moore JH (2018) Relief-based feature selection: Introduction and review. Journal of Biomedical Informatics, 85, 189–203.

Wang N, Zhang ZW, Zhang Y (2016) Urban crows of Beijing. Forest & Humankind, (2), 66–81. (in Chinese) [王宁, 张正旺, 张瑜 (2016) 京城乌鸦. 森林与人类, (2), 66–81.]

Yang HT, Li S, Hou R, Song WT, Fu YW, Li YB, Wang XW, He G, Chapman CA, Guo QH, Li BG (2023) Three-dimensional assessment of movement patterns of Sichuan snub-nosed monkeys affected by habitat structure in temperate forests. Zoological Research, 44, 361–365.

Yang HT, Su YJ, Li BG, Guo QH (2025) Synchronizing 3D

LiDAR-based reconstruction of animals and environment for *in situ* ecosystem characterization. Information Geography, 1, 100019.

Yang Y, Wen JB, Hu DF (2011) A review on avian habitat research. Scientia Silvae Sinicae, 47(11), 172–180. (in Chinese with English abstract) [杨勇, 温俊宝, 胡德夫 (2011) 鸟类栖息地研究进展. 林业科学, 47(11), 172–180.]

Yuan BD, Jiang AW, Li XD, Lu CH (2012) Roost habitat selection by birds: A review. Chinese Journal of Ecology, 31, 2145–2151. (in Chinese with English abstract) [原宝东, 蒋爱伍, 李晓东, 鲁长虎 (2012) 鸟类夜栖地选择研究进展. 生态学杂志, 31, 2145–2151.]

Yuan BD, Yan YF, Cheng ZY, Lu CH (2017) Roost habitat characteristics and differences of Mrs Hume's pheasant (*Syrmaticus humiae*) in spring and summer night. Scientia Silvae Sinicae, 53(9), 143–150. (in Chinese with English abstract) [原宝东, 闫永峰, 程志营, 鲁长虎 (2017) 黑颈长尾雉春夏夜栖地特征与差异性分析. 林业科学, 53(9), 143–150.]

Zhao YX, Zhang JY, Li ZH, Xie Q, Deng X, Zhang CX, Wang N (2024) Use of evergreen and deciduous plants by nocturnal-roosting birds: A case study in Beijing. Avian Research, 15, 100177.

(责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2026004

附录1　北京城区乌鸦夜栖地生境因子测量方法

Appendix 1　Measurement of habitat factors in the nocturnal habitat of crows in the Beijing urban area

生境因子 Habitat factors	变量 Variables	测量方法 Measurement
夜栖树因子 Roosting tree factors	树高 Tree height (m)	指从地面基部到夜栖树最高点的垂直距离，使用激光测距仪测量 Vertical distance from ground base to roost tree apex, measured via laser rangefinder
	胸径 Diameter at breast height (cm)	夜栖树高1.2 m处树干的直径，使用卷尺测量 Trunk diameter at 1.2 m height of roost tree, measured with a tape measure
	冠幅 Crown width (m)	夜栖树的树冠南北和东西方向的最大宽度 Maximum crown width of roost tree in north-south and east-west directions, measured with a tape measure
	郁闭度 Canopy closure	样方内乔木郁闭度，划分四个等级: ≤25%、25%–50%、50%–75%、>75%，记录为1、2、3、4 Arbor canopy density in quadrat, classified into four grades: ≤ 25%, 25%–50%, 50%–75%, > 75%, recorded as 1, 2, 3, or 4
夜栖环境因子 Roosting environmental factors	噪声 Noise (dB)	乌鸦进入夜栖稳定状态后，使用分贝仪测量30 s内的最大值，测量3次，间隔1 min，记录平均值 Maximum value within 30 s measured by sound level meter after crows entered stable roosting state, measured 3 times at 1-min intervals, with average value recorded
	照度 Illuminance (lx)	使用伸缩杆将照度仪置于乌鸦栖息高度附近测量的照度，测量3次，间隔1 min，记录平均值 Measured by lux meter placed near crow roosting height via telescopic rod, measured 3 times at 1-min intervals, with average value recorded
	温度 Temperature (℃)	使用伸缩杆将环境温度计置于乌鸦栖息高度附近测量的温度，测量3次，间隔1 min，记录平均值 Measured by environmental thermometer placed near crow roosting height via telescopic rod, measured 3 times at 1-min intervals, with average value recorded
	风速 Wind speed (m/s)	使用伸缩杆将风速计置于乌鸦栖息高度附近测量的风速，记录3 min中的最大值 Measured by anemometer placed near crow roosting height via telescopic rod, with the maximum value recorded over 3 min
	到最近水体距离 Distance to the nearest water (m)	在ArcGIS 10.4.1中测量最近水体的距离 Measured in ArcGIS 10.4.1
	人流量 Pedestrian flow (人/min)	乌鸦进入夜栖稳定状态后，统计1 min内周围经过的行人数量，测量3次，间隔1 min，记录平均值 Number of passing pedestrians within 1 min after crows entered stable roosting state, counted 3 times at 1-min intervals, with average value recorded
	车流量 Traffic flow (辆/min)	乌鸦进入夜栖稳定状态后，统计1 min内周围经过的车辆数量，测量3次，间隔1 min，记录平均值 Number of passing vehicles within 1 min after crows entered stable roosting state, counted 3 times at 1-min intervals, with average value recorded
	街道走向 Street orientation	夜栖树所在街道的走向，记录为: 南-北、东-西、西北-东南、东北-西南 Orientation of the street where the roosting tree is located, categorized as: North-South, East-West, Northwest-Southeast, Northeast-Southwest

生境因子 Habitat factors	变量 Variables	测量方法 Measurement
	到最近道路距离 Distance to the nearest road (m)	指从夜栖树树干到最近道路的垂直距离，使用激光测距仪测量 Vertical distance from roost tree trunk to the nearest road, measured via laser rangefinder
	最近道路宽度 Width of the nearest road (m)	最近道路的宽度，使用激光测距仪测量 Measured via laser rangefinder
	建筑密度 Building density	记录夜栖树周围50 m范围内四个方向中几面有建筑，记录为1、2、3、4 Number of sides with buildings within 50 m of the roost tree across four directions, recorded as 1, 2, 3, or 4
	到最近建筑距离 Distance to the nearest building (m)	指从夜栖树树干到最近建筑的垂直距离，使用激光测距仪测量 Vertical distance from roost tree trunk to the nearest building, measured via laser rangefinder
	最近建筑高度 Height of the nearest building (m)	最近建筑的高度，使用激光测距仪测量 Measured via laser rangefinder
	最近建筑是否高于栖树 Whether the nearest building is higher than the roosting tree	目视比较，记录为1(是)或0(否) Visually compared and recorded as 1 (yes) or 0 (no)

附录2　北京城区乌鸦枝条变量测量方法

Appendix 2　Measurement of branch variables used by crows in the Beijing urban area

变量 Variables	测量方法 Measurement
枝条直径 Branch diameter (cm)	在LiDAR360MLS 8.2中利用矢量编辑功能绘制直径矢量线, 导入ArcGIS 10.4.1后通过计算几何中的“3D长度”计算功能计算获得 The branch diameter was obtained by drawing diameter vector lines using the vector editing function in LiDAR360MLS 8.2, and then calculated via the “3D Length” tool under the Geometry Calculation module after importing the data into ArcGIS 10.4.1
枝条长度 Branch length (m)	在LiDAR360MLS 8.2中绘制乌鸦枝条长度矢量线, 导入ArcGIS 10.4.1后通过计算几何中的“3D长度”计算功能获得 The branch length was obtained by drawing vector lines in LiDAR360MLS 8.2, and then calculated via the “3D Length” tool under the Geometry Calculation module in ArcGIS 10.4.1
枝条角度 Branch angle (°)	在LiDAR360MLS 8.2中绘制乌鸦栖息位置或对照枝条的枝条倾斜度矢量线, 导入ArcGIS 10.4.1后提取起点和终点的三维坐标(x_1、y_1、z_1和x_2、y_2、z_2), 通过公式$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\lvert z_2-z_1\rvert}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}\right)\times\frac{180}{\pi}$计算获得 Obtained by drawing a vector line along the branch at crow roosting positions or control branch locations in LiDAR360MLS 8.2, and then extracted the 3D coordinates of the start point (x_1, y_1, z_1) and the end point (x_2, y_2, z_2) in ArcGIS 10.4.1. The angle θ was then calculated by the formula: $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\lvert z_2-z_1\rvert}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}\right)\times\frac{180}{\pi}$
枝条高度 Branch height (m)	在LiDAR360MLS 8.2中绘制乌鸦栖息位置的矢量点, 根据地面点归一化后, 矢量点的z坐标记录为夜栖枝条高度, 对照枝条高度取枝条长度矢量线的中心到地面的垂直高度, 即$\frac{z_2+z_1}{2}$ The height of nocturnal perching branches was recorded as the z-coordinate of the vector point drawn at the crow’s roosting location in LiDAR360MLS 8.2 after ground point normalization. The height of control branches was determined as the vertical distance from the center of the branch length vector line to the ground, calculated as $\frac{z_2+z_1}{2}$

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 25347, pages 1–9
doi: 10.17520/biods.2025347
cstr: 32101.14.biods.2025347

•研究报告•

基于公民科学数据的全国地级以上城市公园鸟类群落特征及环境影响因子

周楠, 黄美玲, 谭筱彩, 刘骏杰, 文可, 蒋爱伍*

广西森林生态与保育重点实验室, 广西大学林学院, 南宁 530005

摘要: 在快速城市化背景下, 城市公园作为生物多样性庇护所的功能日益凸显。但全国尺度下公园鸟类群落组成特征及公园空间特征(面积、水体分布)对物种丰富度的影响仍缺乏量化研究。本研究基于中国观鸟记录中心截至2023年12月31日的审核数据, 整合175个地级以上城市942个公园的标准化记录, 解析城市公园鸟类多样性格局及其驱动机制, 并编制中国城市公园鸟类名录。主要发现如下: 共记录到鸟类751种, 隶属于22目91科, 占中国鸟类物种数的49.8%, 其中国家一级保护野生鸟类26种, 二级46种, IUCN极危(CR) 4种, 濒危(EN) 8种; 公园鸟类以候鸟为主, 南方公园留鸟比例显著高于北方, 北方候鸟比例高于南方; 北方鸟类更倾向于食虫和植食(种食); 南方更倾向于食虫和杂食; 公园面积(估计值 = 0.1899, $P < 0.001$)、内部水体(估计值 = 0.2512, $P < 0.001$)及外部0.5 km缓冲区水体(估计值 = 0.2581, $P = 0.004$)均显著正向影响鸟类物种多样性, 其中水体(尤其外部水体)的影响超过面积效应。鉴于食虫候鸟(40.8%)的主导地位及濒危鸟类对水体的高度依赖, 建议优先构建半自然灌丛生境并优化水体-生态廊道系统。

关键词: 城市公园; 水体; 鸟类物种丰富度; 濒危鸟类; 中国城市公园鸟类名录

周楠, 黄美玲, 谭筱彩, 刘骏杰, 文可, 蒋爱伍 (2026) 基于公民科学数据的全国地级以上城市公园鸟类群落特征及环境影响因子. 生物多样性, 34, 25347. doi: 10.17520/biods.2025347; cstr: 32101.14.biods.2025347.
Zhou N, Huang ML, Tan XC, Liu JJ, Wen K, Jiang AW (2026) Bird community characteristics and their environmental drivers in urban parks across Chinese prefecture-level cities based on citizen science data. Biodiversity Science, 34, 25347. doi: 10.17520/biods.2025347; cstr: 32101.14.biods.2025347.

Bird community characteristics and their environmental drivers in urban parks across Chinese prefecture-level cities based on citizen science data

Nan Zhou, Meiling Huang, Xiaocai Tan, Junjie Liu, Ke Wen, Aiwu Jiang*

Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, School of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China

ABSTRACT

Aim: Against the backdrop of rapid urbanization, urban parks have increasingly served as critical biodiversity refugia. However, quantitative studies on the composition characteristics of park avian communities and the effects of park spatial features (area, waterbody distribution) on avian species richness remain scarce at the national scale.

Methods: This study used standardized observational data from BirdReport (https://www.birdreport.cn/), including records from 942 parks in 175 Chinese prefecture-level cities (as of December 31, 2023). We analyzed national-scale patterns of avian diversity in urban parks, examined environmental driving mechanisms, and compiled the first comprehensive Checklist of Birds in Urban Parks of China.

Results: A total of 751 bird species (22 orders, 91 families) were documented in urban parks, representing 49.8% of China's total avian species. This included 26 nationally Class I protected species, 46 Class II protected species, 4 species listed as Critically Endangered (CR) and 8 as Endangered (EN) on the IUCN Red List. Birds in parks are predominantly migratory. The proportion of resident birds in urban parks in southern China is significantly higher than that in northern China, whereas the proportion of migratory birds is higher in northern China. Bird species in urban

收稿日期 Received: 2025-08-27; 接受日期 Accepted: 2026-03-12
基金项目: 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2025012) Supported by the Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCBZ2025012)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: aiwuu@163.com

parks in northern China are more inclined to insectivory and herbivory (granivory), whereas those in southern China are more inclined to insectivory and omnivory. Park area (Estimate = 0.1899, $P < 0.001$), presence of internal waterbodies (Estimate = 0.2512, $P < 0.001$), and presence of external waterbodies within a 0.5 km buffer (Estimate = 0.2581, $P = 0.004$) all exerted significantly positive effects on avian species richness. Notably, waterbodies (especially external ones) emerged as a more critical driver than park area.

Conclusions: Given the dominance of insectivorous migratory birds (40.8%) and the high dependency of threatened species on waterbody habitats, we recommend prioritizing the creation of semi-natural shrub habitats and optimizing waterbody-ecological corridor networks to enhance the conservation function of urban parks.

Key words: urban park; water bodies; avian species richness; threatened avian species; Checklist of Birds in Urban Parks of China

城市化指人口从农村迁入城市, 城市人口比率和城区面积增加的现象。城市化的实质是自然生态系统或农业生态系统向城市生态系统转变的过程(郭泺等, 2009)。城市化进程带来的生境破碎化与土地利用变化, 通常被视为除物种入侵、环境污染与气候变化之外全球生物多样性下降的主要原因(McKinney, 2006; Pereira et al., 2012)。因此, 采用高效手段保护生物多样性, 对维持生态系统功能及人类福祉至关重要。

城市公园为濒危物种提供生存空间, 是城市中保护生物物种多样性的关键区域。因其相对稳定的生态环境和较少的人为干扰, 已成为珍稀鸟类或小型哺乳动物的避难所(Cornelis & Hermy, 2004), 这些物种在城市其他区域因栖息地破坏而难以生存, 却在公园内得以存活和繁衍。公园内种群维持一定的遗传多样性有助于保存物种遗传信息, 减缓城市发展导致的遗传多样性丧失。

鸟类因其高识别性及对环境变化的高敏感性, 常被作为生境质量的指示物种(McDonnell & Pickett, 1990; Guthula et al., 2022)。鸟类物种丰富度越高, 其他类群的物种丰富度也随之提高(Gregory & van Strien, 2010)。长期以来, 人类需求的持续扩张进一步削弱自然保护区的功能。因此评估城市小面积绿地在生物多样性保护中的价值(Gaston & Blackburn, 1995), 或能为生物多样性保护开辟新路径(Marzluff & Ewing, 2001)。研究表明, 城市边缘的森林、城市公园、住宅花园等绿色空间能为鸟类觅食与迁徙提供重要栖息地(Palomino & Carrascal, 2006; Pagani-Núñez et al., 2022)。根据中华人民共和国住房和城乡建设部《城市公园管理办法》(https://www.gov.cn/zhengce/202503/content_7014398.htm), “城市公园”指城市内具备园林景观和服务设施, 具有改善生态、美化环境、休闲游憩、健身娱乐等功能, 向公众开放的场所。城市公园作为城市绿地重要组成部分, 为城市中各类动植物提供适宜栖息地与食物来源, 能有效缓解城市化对于鸟类多样性的影响(Lepczyk et al., 2017; Hyseni et al., 2021)。因此, 对我国城市公园鸟类多样性的深入研究具有深远意义。

鸟类的生存与环境水源密切相关。鸟类需要水来维持健康、清洁羽毛和进行生理调节, 更重要的是鸟类的生存还依赖于水生生态系统和环境中的其他资源。许多候鸟在其生命周期中依赖河流、湖泊和沼泽等水生生态系统作为栖息地、越冬地和迁徙途中的停歇点。既往研究指出, 包括鸟类在内的许多陆生生物都依赖水体获得水、食物和栖息地(Nummi et al., 2011; Lewis-Phillips et al., 2020)。但目前缺少对于城市中较高人为干扰下的水环境与鸟类物种丰富度的相关研究。城市公园中往往保留着各种形式水生生态系统。因此, 有必要研究这类人工干扰较强的水环境能否成为鸟类重要的觅食地、通勤/迁徙地和饮用水源地, 以开辟保护城市鸟类多样性新路径。

物种保护规划依赖于物种的空间分布信息(郑冰晶和董丽, 2019)。以往多物种分布数据多集中于小区域尺度场景(曾欣怡和宋钰红, 2023), 缺乏全国性视角。大规模鸟类调查需要多地协作, 成本高昂, 公民科学数据因其庞大且准确性相对可靠, 正日益受到研究者的重视与应用, 为全面理解我国城市公园鸟类多样性提供新途径。例如: 以中国省级行政区划为地理统计单元, 采用公民科学数据, 利用空间自相关分析方法探究鸟类物种多样性的空间分布特征, 提出中国鸟类物种多样性总体呈现由东南沿海向西北内陆逐渐减少的空间分布趋势, 并呈现

经度条带分异的空间规律(范佳旭等, 2025); 利用“城市鸟类名录”以及公民科学数据, 应用数据透视表对7个鸟类地理区21个样本城市的鸟类多样性构成进行分析, 并提出构建“地域型-城市-绿地”多尺度多层级保护体系(李旭等, 2024)。将鸟类记录数据与土地利用空间数据相结合, 分析鄂州市土地利用变化对鸟类栖息地的影响(王春晓等, 2022)。然而, 目前缺少针对全国尺度下公园鸟类群落组成特征, 以及公园空间特征(面积、水体分布)对鸟类物种丰富度影响的量化研究。

本研究以鸟类空间分布为出发点, 对公民科学数据进行标准化处理, 并以单个城市公园为统计单元, 尝试以更宏观的尺度分析城市公园鸟类, 为我国鸟类多样性保护提供科学支撑。旨在明确: (1)城市公园鸟类物种组成与生态型; (2)城市公园面积、内部及周围水体对鸟类物种丰富度的影响。

1 方法

1.1 数据来源

仅选择地级以上城市内公园。公园占地面积信息主要来源于政府部门, 并结合卫星遥感影像进行栖息地特征分析。系统检索中国观鸟记录中心(https://www.birdreport.cn/)截至2023年12月31日审核通过的鸟类观测记录, 涵盖港澳台地区在内的全国各城市公园。为确保数据质量, 仅保留满足以下条件的公园记录: 南方城市公园鸟类物种观测记录≥10种; 北方城市公园鸟类物种观测记录 ≥6种。为减少公民科学数据可能产生的偏差, 对原始数据进行了以下处理: (1)删除经系统提示鸟种名称错误的记录; (2)结合南、北方城市鸟类物种丰富度的实际差异, 删除低于筛选标准的公园数据; (3)鸟类名称及分类统一参考《中国鸟类分类与分布名录》(第四版) (郑光美, 2023)和IUCN红色名录(https://iucn.org/resources/conservation-tool/iucn-red-list-threatened-species)。最终获取来自175个城市的942个城市公园, 共计751种鸟类的33,727条记录。根据《城市绿地分类标准》, 将942个城市公园划分为4类: 综合公园(566个)、专类公园(246个)、社区公园(85个)和游园(45个)。

进一步探讨城市公园内部及周围城市水体对城市公园鸟类物种多样性的影响。具体影响因子包括: (1)公园面积; (2)内部具有水体; (3)外部(0.5 km缓冲区)具有水体。“公园内部”定义为公园的边界范围内, “水体”包括湖泊、池塘、河流、溪流、人工湖、水景设施等形式。研究以秦岭–淮河一线作为中国南北分界。为确保名录的准确性和全面性, 参考《中国鸟类分类与分布名录》(第四版) (郑光美, 2023)和IUCN红色名录编制中国城市公园鸟类名录(附录1)。鸟类食性参照王彦平等(2021)划分为5种生态类群: 植食(种食)、食虫、肉食、食果/食蜜、杂食; 鸟类居留型参考郑光美(2023); 物种保护级别参照国家林业和草原局、农业农村部2021年发布的《国家重点保护野生动物名录》(https://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html), 受威胁等级依据IUCN红色名录进行评估。

1.2 分析方法

采用卡方适合度检验(χ^2检验)分析北方与南方城市公园鸟类居留型、食性之间的差异。以数值型变量“公园面积”及分类型变量“内部具有水体”和“外部(0.5 km缓冲区)具有水体”作为自变量, 鸟类物种丰富度指数作为因变量。显著性水平设定为$P = 0.05$。数据分析在R软件中进行。以“公园面积” “内部具有水体” “外部具有水体” (0.5 km缓冲区)作为固定效应, 构建广义线性模型(generalized linear models, GLM)。使用R软件中的lme4包, 考虑不同城市公园之间的随机变异, 构建广义线性混合模型(generalized linear mixed models, GLMM)。通过比较GLM和GLMM两个模型的赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)和似然比检验(likelihood ratio test, LRT), 选取拟合度更优的模型。最终, 分析各变量对鸟类物种丰富度的影响。

2 结果

2.1 物种组成与保护等级

截至2023年12月, 在175个城市的942个公园(图1)中记录到751种鸟类, 隶属于22目91科(附录1), 占中国鸟类物种总数(1,507种; 郑光美, 2023)的49.8%。其中雀形目占据主导地位, 共计434种, 占57.8%。水鸟(包括游禽类、涉禽类)共178种(23.7%)。

在本研究汇总的城市公园鸟类中, 国家一级重点保护野生鸟类共计26种, 包括青头潜鸭(*Aythya baeri*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)及中华秋沙鸭

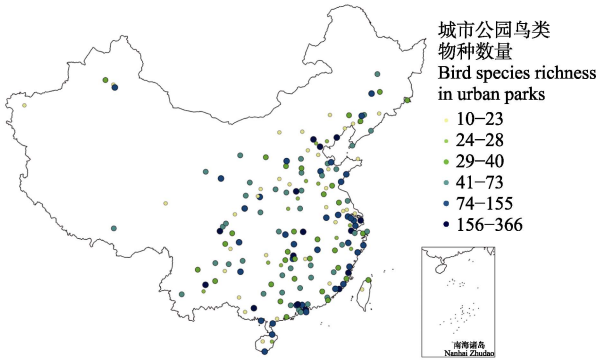


图1　不同城市(n = 175)的城市公园(n = 942)鸟类物种丰富度(数据来源: 中国观鸟记录中心)

Fig. 1　Bird species richness in 942 urban parks across 175 Chinese prefecture-level cities (Data from BirdReporting)

(*Mergus squamatus*)等; 国家二级重点保护野生鸟类46种, 涵盖白胸翡翠(*Halcyon smyrnensis*)、鸳鸯(*Aix galericulata*)及褐翅鸦鹃(*Centropus sinensis*)等。依据IUCN红色名录, 城市公园内包含4种极危(CR)等级的鸟类, 分别为黄胸鹀(*Emberiza aureola*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、中华凤头燕鸥(*Thalasseus bernsteini*)及青头潜鸭(*Aythya baeri*); 以及8种濒危(EN)鸟类, 包括大杓鹬(*Numenius madagascariensis*)和大滨鹬(*Calidris tenuirostris*)等。

在全国城市公园中, 出现频次较高的鸟类主要包括白头鹎(*Pycnonotus sinensis*, 频次 = 810)、珠颈斑鸠(*Spilopelia chinensis*, 频次 = 772)、乌鸫(*Turdus mandarinus*, 频次 = 721)、麻雀(*Passer montanus*, 频次 = 665)及大山雀(*Parus minor*, 频次 = 635)等(附录1)。在北方城市公园中, 麻雀出现频次最高(频次 = 257), 其次为喜鹊(*Pica serica*, 频次 = 249)及灰喜鹊(*Cyanopica cyanus*, 频次 = 229)等。而在南方城市公园中, 白头鹎(频次 = 607)、珠颈斑鸠(频次 = 581)及乌鸫(频次 = 545)等居于前列。

2.2　居留型与食性组成

城市公园中食虫候鸟占比最高(40.8%), 其次是食虫留鸟(14.11%)和肉食候鸟(11.7%) (表1)。卡方检验显示, 留鸟与候鸟的食性分布存在极显著差异($\chi^2 = 50.12$, $P < 0.0001$)。候鸟中食虫类占比(57.0%)显著高于留鸟(49.5%), 且数量约是留鸟的3倍, 表明昆虫资源是候鸟迁徙中的核心能量来源。留鸟中杂食类占比(24.3%)是候鸟(10.2%)的2倍以上; 候鸟中肉食类占比(16.4%)显著高于留鸟(4.2%)。

南方与北方城市公园中鸟类的居留型分布差异显著($\chi^2 = 8.98$, $P < 0.01$)。南方城市公园留鸟的比例(占南方城市公园鸟类物种的26.3%)显著高于北方(18.6%); 北方候鸟比例(81.4%)高于南方(73.7%)。南、北方城市公园中鸟类食性分布存在显著差异($\chi^2 = 15.96$, $P < 0.01$), 北方城市公园的鸟类更倾向于食虫和植食(种食); 南方则更倾向于食虫和杂食; 肉食和杂食鸟类占比南北差异较小(表2)。

2.3　鸟类物种多样性影响因子

模型比较结果显示, 包含随机效应的广义线性混合模型(AIC = 6,648)相对于仅包含固定效应的广义线性模型(AIC = 16,792)具有显著更优的拟合效果(似然比检验: $P < 0.001$), 表明不同城市公园之间的变异对鸟类物种丰富度具有重要调节作用。根据广义线性混合模型的分析结果, 公园面积、内部水体的存在以及外部缓冲区(0.5 km范围内)水体的存在均对鸟类物种多样性产生显著的正向影响(表3)。

表1　中国城市公园不同居留型鸟类食性组成及占比

Table 1　Feeding habit and residence pattern of birds by residency type in Chinese urban parks

居留型 Residence pattern	食性 Feeding habit	数量 Number	占所属居留型的比例 Proportion of resident pattern	占所有鸟类物种的比例 Proportion of all species
留鸟 Resident	食虫类 Insectivorous	106	49.5%	14.1%
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	32	15.0%	4.3%
	肉食类 Carnivorous	9	4.2%	1.2%
	杂食类 Omnivorous	52	24.3%	6.9%
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	15	7.0%	2.0%
候鸟 Migratory	食虫类 Insectivorous	306	57.0%	40.8%
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	76	14.2%	10.1%
	肉食类 Carnivorous	88	16.4%	11.7%
	杂食类 Omnivorous	55	10.2%	7.3%
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	12	2.2%	1.6%

根据效应量大小排序, 外部(0.5 km缓冲区)水体的影响最大(估计值 = 0.2581, $P = 0.004$), 其次是内部水体(估计值 = 0.2512, $P < 0.001$), 公园面积的影响亦具有统计学意义(估计值 = 0.1899, $P < 0.001$)。

3 讨论

3.1 城市公园可作为食虫候鸟重要的迁徙停歇点

已有研究表明, 印度335个大学校园记录到鸟类779种, 超过50%的印度鸟类可以在大学校园内发现(Guthula et al., 2022); 中国38个大学校园中记录到393种鸟类, 占全国的26.1% (Zhang et al., 2018)。本研究在942个城市公园中记录到751种鸟类, 占全国鸟类物种数的49.8%。其中记录到超过150种鸟类的公园有10个, 例如仅在北京市奥林匹克森林公园就发现鸟类235种。尽管校园与公园的管理目标不同, 但同为城市中的人工生境, 其数据共同印证城市绿地的保护潜力, 表明绿色空间可以在快速城市化中以相对较小的土地区域尽可能保护多种物种, 以实现和解生态学(Reconciliation Ecology)寻求在建成环境支持更多生物多样性的核心理念。尽管在大尺度空间上, 城市化进程将导致栖息地物种丧失(Knapp et al., 2008), 但在局部尺度上, 城市公园依然能够维持较高的物种丰富度(Rebele, 1994)。研究指出, 相较于栖息地破碎化, 栖息地丧失对生物多样性的负面影响更为突出(Fahrig, 2003), 得益于法律法规的保护, 城市公园比周围环境更能避免土地利用和栖息地的改变, 因此在维持生物多样性上具有巨大潜力。城市公园中发现的鸟类以候鸟为主, 仅在北京市奥林匹克森林公园就记录到候鸟124种。尽管众多候鸟仅将公园视为迁徙途中的短暂停留地, 但公园仍可在其生命周期的关键阶段发挥着不可或缺的支持作用。

结合鸟类食性分析, 公园中记录到最多的是食虫候鸟, 占所有鸟类的40%。植被是鸟类食物的最根本来源(郑光美, 2012), 无论是留鸟还是候鸟, 栖息地中的食物资源均对其生存与繁殖具有直接影响(王勇等, 2014)。公园作为城市绿色斑块, 具有相对丰富的植被, 其丰富的昆虫资源能为食虫候鸟提供充足的食物保障。有研究指出, 栖息地内的天然林斑块可以为大多数食虫鸟类提供食物资源(Katuwal et al., 2016), 城市绿地内半自然人为管理较少的栖息地支持更高的鸟类物种多样性(Wong et al., 2023)。鉴于食虫候鸟在公园鸟类群落中占据主

表2 中国南、北方城市公园不同居留型鸟类食性组成

Table 2 Feeding habit and residence pattern of birds with different residency types in urban parks in northern and southern China

居留型 Residence pattern	食性 Feeding habit	数量 Number
北方 Northern China		
候鸟 Migratory	食虫类 Insectivorous	191
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	66
	肉食类 Carnivorous	66
	杂食类 Omnivorous	43
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	6
留鸟 Resident	食虫类 Insectivorous	38
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	21
	肉食类 Carnivorous	4
	杂食类 Omnivorous	20
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	2
南方 Southern China		
候鸟 Migratory	食虫类 Insectivorous	281
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	63
	肉食类 Carnivorous	77
	杂食类 Omnivorous	46
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	12
留鸟 Resident	食虫类 Insectivorous	92
	植食(种食)类 Herbivorous (Granivorous)	16
	肉食类 Carnivorous	8
	杂食类 Omnivorous	42
	食果/食蜜类 Frugivorous/Nectarivorous	13

表3 广义线性混合模型(GLMM)不同变量估计值以及95%置信区间

Table 3 Estimated values of different variables in the generalized linear mixed model (GLMM) and their 95% confidence intervals

变量 Variable	估计值 Estimate	置信区间下限 Lower confidence internal	置信区间上限 Upper confidence internal	P
公园面积 Park area	0.1899	0.1498	0.2234	< 0.001
内部具有水体 With water bodies within the park	0.2512	0.1443	0.3725	< 0.001
外部(0.5 km缓冲区)具有水体 Water bodies outside the park (0.5 km buffer zone)	0.2581	0.0990	0.3505	0.004

导地位, 因此需要优先考虑营造更适宜它们生存的栖息地。“基于自然的气候解决方案” (Nature-based Climate Solutions, NbCS)的核心理念在于: 通过保护、修复和可持续管理自然生态系统, 实现低成本、高协同效益的气候变化减缓与适应目标。公园中大面积且人为干扰较少的灌丛对于鸟类筑巢和隐藏至关重要, 食虫鸟类往往喜欢在此类栖息地聚集(Kontsiotis et al., 2019)。然而, 目前更多公园选择清除这类灌丛, 将其改造成步道或增加修剪频次以达到整齐美观, 但这将导致人为干扰增加, 进而降低鸟类繁殖成功率(Marzluff & Ewing, 2001)。因此建议在城市公园中保留部分人为管理较少的半自然灌丛, 使城市公园更好地为食虫候鸟提供支持。这类具有较高自然特征的灌丛能够保持较高的物种丰富度(Sandström et al., 2006; Zhang et al., 2023), 由于能提供丰富的食物资源和筑巢条件, 其对鸟类具有特别的吸引力(Canedoli et al., 2018), 在维持鸟类物种丰富度的同时, 减少人工管理成本。

3.2 水体对于城市公园鸟类物种丰富度的影响

成都市锦城公园(248种)、上海市南汇嘴观海公园(241种)和北京市奥林匹克森林公园(235种)是全国发现鸟类物种最多的城市公园, 这3个公园皆在内部或外部(0.5 km缓冲区)具有水体。此外, 本研究发现黄胸鹀、青头潜鸭、白鹤及中华凤头燕鸥等国家一级重点保护野生鸟类都选择内部和外部具有水体的城市公园作为中途停留地或越冬地点。本研究表明, 虽然公园面积、内部具有水体、外部具有水体均对中国鸟类物种多样性有显著正向作用, 但水体(尤其外部水体)是影响鸟类物种多样性的关键因素, 其影响超过公园面积效应。新加坡一项历时5年基于公民科学数据的研究也指出, 城市绿地内及周围的水体支持较高的鸟类物种丰富度(Wong et al., 2023), 本研究与上述结果一致。

城市公园内部含有各种形式水体, 而这些水体可为不少鸟类提供适宜的饮水、觅食、繁殖场所, 这将直接影响到鸟类物种多样性(Zivanovic & Luck, 2016)。淡水栖息地的河岸植被能为众多鸟类提供优质的觅食场所, 而富含水下植被的浅水体则能吸引更多种类的水鸟(Larson et al., 2020)。此外, 水体周边复杂的植被结构同样能为鸟类提供躲避捕食者及繁殖所需的栖息地。本研究发现, 内部水体与外部水体对鸟类物种丰富度的作用同样存在差异(表3)。多项研究证明, 公园内部水体可作为局部栖息地的“资源热点”, 通过提供直接生存资源影响鸟类群落, 但考虑到内部水体的作用范围受限于公园边界, 而外部水体往往能够强化景观连通性, 连接城市公园与周围自然湿地, 形成连续栖息地网络, 从而缓解城市化导致的栖息地破碎化。值得注意的是, 本研究所记录的内部有水体的城市公园中, 半数以上拥有湖心岛。湖心岛对于维持鸟类物种多样性具有重要意义: 其天然屏障效应可以减少人为干扰, 复杂植被能为众多鸟类在城市中提供相对安全的栖息环境, 同时能够创造水体-岸线-陆地过渡带的垂直生境异质性, 提升小生境多样性。有研究指出, 水体与周边陆地生境的相互作用, 能够对鸟类多样性产生积极作用(Ocampo & Londoño, 2015; Xie et al., 2020)。在间接调节作用上, 公园水体通过增加局部湿度, 能够有效缓解城市热岛效应, 扩大鸟类适应栖息范围。同时其可以形成具有较高生态服务价值的“生态源地” (吴茂全等, 2019), 不断吸引周围鸟类向公园聚集。

研究表明, 城市公园面积与鸟类物种丰富度二者之间存在显著的正相关关系。本研究结果支持种–面积理论, 并与国内众多大型城市如北京(Huang et al., 2015)、上海(季婷和张雁云, 2011)、广州(邓卓迪等, 2023)等地的城市公园鸟类研究结论相一致。主要原因可能涵盖以下方面: 首先, 公园面积扩大可能包含更多复杂生境, 而生境多样性与鸟类多样性密切相关(Yang et al., 2020)。具体而言, 生境多样性高意味着植被结构更复杂, 而乔木结构复杂度与鸟类多样性呈现显著正相关(Fontana et al., 2011), 能为鸟类提供丰富的食物、筑巢及隐藏资源。其次, 城市公园面积增大有助于缓解边缘效应的影响(Fernández-Juricic, 2001), 减少对鸟类物种丰富度的负面作用。城市公园的外部水体是影响鸟类物种多样性的更关键因素, 考虑到本研究中外部水体大多是城市中河流与运河类线性淡水水体, 不排除这些水体具有充当生态走廊、促进鸟类在不同栖息地之间迁徙的作用(Keten et al., 2020), 从而提高这类公园鸟类物种丰富性。

3.3 展望与建议

本研究采用公民科学数据, 虽然经过系统筛选,

但是数据质量参差不齐, 仍可引发多方面结果偏差, 包括观测误差导致物种识别偏差、测量不精准影响定量数据、信息遗漏等问题。此外, 全国尺度下942个公园的数据收集工作面临较大挑战, 未能获取具体地类、植被类型及覆盖度、食物资源分布等数据, 这在一定程度上限制研究的深入开展。在后续研究中, 将选择全国尺度上具有代表性的城市公园, 结合专业鸟类监测人员开展的长期监测, 纳入更丰富的变量, 比较各地城市公园的影响要素差异。

近年来, 多地尝试在城市绿地中营造接近自然状态下的荒野生境。例如, 重视乡土植物的应用, 以撒播形式建立复杂的多年生草本植物群落(Hitchmough et al., 2013), 采用“留白-种植”空间嵌套格局, 利用植物集群定植和种子混播, 构建拟自然荒野野花草甸群落(袁嘉等, 2021)。通过划分生境类型、引入乡土物种、构建生物群落等研究, 实现植物群落自然演替(郭陶然和山冰沁, 2021)。这些做法均在恢复生物多样性、发挥城市绿地生态效益方面取得了不错成效。因此, 建议: (1)在综合公园等有条件的公园中划定“半自然灌丛保护区”, 保留原生灌丛植被或模拟自然群落结构进行人工辅助恢复, 减少修剪频次, 保留落叶层与枯立木, 限制步道扩张与人为活动侵入等; (2)在社区公园和游园等不具备条件的公园同样可以通过增加本土花卉植物种植、设置小型昆虫栖息场所等, 有效营造更适宜公园鸟类群落中占据主导地位的食虫候鸟需求的环境。(3)内部水体优化: 在有条件的公园内部建设浅水区, 保留水下植被, 形成“水体-滩涂-灌丛”复合生境, 满足条件的公园可设计湖心岛, 并提升湖心岛植被结构复杂性, 降低人为干扰; (4)外部水体连接: 对城市公园周围500 m水体进行统筹保护, 通过植被缓冲带连接外部水体, 形成生态网络。

ORCID

谭筱彩 https://orcid.org/0009-0000-9544-5018
刘骏杰 https://orcid.org/0000-0002-6061-8430
蒋爱伍 https://orcid.org/0000-0002-5259-298X

参考文献

Canedoli C, Manenti R, Padoa-Schioppa E (2018) Birds biodiversity in urban and periurban forests: Environmental determinants at local and landscape scales. Urban Ecosystems, 21, 779–793.

Cornelis J, Hermy M (2004) Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. Landscape and Urban Planning, 69, 385–401.

Deng ZD, Ding ZF, Zeng XY, Zhang CL, Li XE, He ZQ, Liang JC, Hu HJ (2023) Landscape characteristics of urban green spaces and their effects on bird diversity: The case of Guangzhou. Sichuan Journal of Zoology, 42, 568–578. (in Chinese with English abstract) [邓卓迪, 丁志锋, 曾小悦, 张春兰, 李孝恩, 何子晴, 梁健超, 胡慧建 (2023) 广州城市绿地景观特征及其对鸟类多样性的影响. 四川动物, 42, 568–578.]

Fan JX, Lian Y, Gao HC, Li HX, He MX, Cui L, Mo XQ (2025) Characteristics of avian species diversity and influencing factors in Chinese mainland. Acta Ecologica Sinica, 45, 596–614. (in Chinese with English abstract) [范佳旭, 连懿, 高晖春, 李海笑, 贺梦璇, 崔磊, 莫训强 (2025) 中国大陆鸟类物种多样性特征及影响因素. 生态学报, 45, 596–614.]

Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 34, 487–515.

Fernández-Juricic E (2001) Avian spatial segregation at edges and interiors of urban parks in Madrid, Spain. Biodiversity & Conservation, 10, 1303–1316.

Fontana S, Sattler T, Bontadina F, Moretti M (2011) How to manage the urban green to improve bird diversity and community structure. Landscape and Urban Planning, 101, 278–285.

Gaston KJ, Blackburn TM (1995) Birds, body size and the threat of extinction. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 347, 205–212.

Gregory RD, van Strien A (2010) Wild bird indicators: Using composite population trends of birds as measures of environmental health. Ornithological Science, 9, 3–22.

Guo L, Du SH, Xue DY, Jiang XD (2009) Spatio-temporal variation of landscape patterns during rapid urbanization in Guangzhou City. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 45, 129–136. (in Chinese with English abstract) [郭泺, 杜世宏, 薛达元, 江学顶 (2009) 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究. 北京大学学报(自然科学版), 45, 129–136.]

Guo TR, Shan BQ (2021) Urban wilderness construction: An example of Shanghai urban biodiversity education base. Landscape Architecture Frontiers, 9, 120–131. (in Chinese with English abstract) [郭陶然, 山冰沁 (2021) 城市荒野景观营造: 以上海乡土生态科普示范基地为例, 景观设计学, 9, 120–131.]

Guthula VB, Shrotriya S, Nigam P, Goyal SP, Mohan D, Habib B (2022) Biodiversity significance of small habitat patches: More than half of Indian bird species are in academic campuses. Landscape and Urban Planning, 228, 104552.

Hitchmough J, Liu B, Hang Y (2013) Applying an ecological approach to extensive, designed herbaceous vegetation in urban green infrastructure. Chinese Landscape Architecture, 29(3), 16–26. (in Chinese with English abstract) [詹姆斯·希契莫夫, 刘波, 杭烨 (2013) 城市绿色基础设施中大规模草本植物群落种植设计与管理的生态途径. 中国园林, 29(3), 16–26.]

Huang Y, Zhao YZ, Li SH, von Gadow K (2015) The effects of habitat area, vegetation structure and insect richness on breeding bird populations in Beijing urban parks. Urban Forestry & Urban Greening, 14, 1027–1039.

Hyseni C, Heino J, Bini LM, Bjelke U, Johansson F (2021) The importance of blue and green landscape connectivity for biodiversity in urban ponds. Basic and Applied Ecology, 57, 129–145.

Ji T, Zhang YY (2011) Impacts of ambient noise on bird song and adaptation strategies of birds. Chinese Journal of Ecology, 30, 831–836. (in Chinese with English abstract) [季婷, 张雁云 (2011) 环境噪音对鸟类鸣声的影响及鸟类的适应对策. 生态学杂志, 30, 831–836.]

Katuwal HB, Basnet K, Khanal B, Devkota S, Rai SK, Gajurel JP, Scheidegger C, Nobis MP (2016) Seasonal changes in bird species and feeding guilds along elevational gradients of the central Himalayas, Nepal. PLoS ONE, 11, e0158362.

Keten A, Eroglu E, Kaya S, Anderson JT (2020) Bird diversity along a riparian corridor in a moderate urban landscape. Ecological Indicators, 118, 106751.

Knapp S, Kühn I, Schweiger O, Klotz S (2008) Challenging urban species diversity: Contrasting phylogenetic patterns across plant functional groups in Germany. Ecology Letters, 11, 1054–1064.

Kontsiotis VJ, Valsamidis E, Liordos V (2019) Organization and differentiation of breeding bird communities across a forested to urban landscape. Urban Forestry & Urban Greening, 38, 242–250.

Larson DM, Cordts SD, Hansel-Welch N (2020) Shallow lake management enhanced habitat and attracted waterbirds during fall migration. Hydrobiologia, 847, 3365–3379.

Lepczyk CA, Aronson MFJ, Evans KL, Goddard MA, Lerman SB, MacIvor JS (2017) Biodiversity in the city: Fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation. BioScience, 67, 799–807.

Lewis-Phillips J, Brooks SJ, Sayer CD, Patmore IR, Hilton GM, Harrison A, Robson H, Axmacher JC (2020) Ponds as insect chimneys: Restoring overgrown farmland ponds benefits birds through elevated productivity of emerging aquatic insects. Biological Conservation, 241, 108253.

Li X, Tian YL, He YW, Sun XF (2024) Characteristics of urban avian diversity in China and the construction of urban green space guided by bird protection. Acta Ecologica Sinica, 44, 10234–10246. (in Chinese with English abstract) [李旭, 田永莲, 贺禹文, 孙秀锋 (2024) 我国城市鸟类多样性特征及鸟类保护导向的城市绿地营建. 生态学报, 44, 10234–10246.]

Marzluff JM, Ewing K (2001) Restoration of fragmented landscapes for the conservation of birds: A general framework and specific recommendations for urbanizing landscapes. Restoration Ecology, 9, 280–292.

McDonnell MJ, Pickett STA (1990) Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: An unexploited opportunity for ecology. Ecology, 71, 1232–1237.

McKinney ML (2006) Urbanization as a major cause of biotic homogenization. Biological Conservation, 127, 247–260.

Nummi P, Kattainen S, Ulander P, Hahtola A (2011) Bats benefit from beavers: A facilitative link between aquatic and terrestrial food webs. Biodiversity and Conservation, 20, 851–859.

Ocampo D, Londoño GA (2015) Tropical montane birds have increased nesting success on small river islands. The Auk, 132, 1–10.

Pagani-Núñez E, Xu Y, Yan MX, He JK, Jiang ZF, Jiang HS (2022) Trade-offs between economic development and biodiversity conservation on a tropical island. Conservation Biology, 36, e139121.

Palomino D, Carrascal LM (2006) Urban influence on birds at a regional scale: A case study with the avifauna of northern Madrid Province. Landscape and Urban Planning, 77, 276–290.

Pereira HM, Navarro LM, Santos Martins I (2012) Global biodiversity change: The bad, the good, and the unknown. Annual Review of Environment and Resources, 37, 25–50.

Rebele F (1994) Urban ecology and special features of urban ecosystems. Global Ecology and Biogeography Letters, 4, 173–187.

Sandström UG, Angelstam P, Mikusiński G (2006) Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. Landscape and Urban Planning, 77, 39–53.

Wang CX, He JH, Liu DF, Yu XB, Shi QQ (2022) Impact of land use change on bird habitat connectivity: A case study in Ezhou City. Acta Ecologica Sinica, 42, 4197–4208. (in Chinese with English abstract) [王春晓, 何建华, 刘殿锋, 于秀波, 石青青 (2022) 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例. 生态学报, 42, 4197–4208.]

Wang Y, Xu J, Yang G, Li HQ, Wu SY, Tang HM, Ma B, Wang ZH (2014) The composition of common woody plant species and their influence on bird communities in urban green areas. Biodiversity Science, 22, 196–207. (in Chinese with English abstract) [王勇, 许洁, 杨刚, 李宏庆, 吴时英, 唐海明, 马波, 王正寰 (2014) 城市公共绿地常见木本植物组成对鸟类群落的影响. 生物多样性, 22, 196–207.]

Wang YP, Song YF, Zhong YX, Chen CW, Zhao YH, Zeng D, Wu YR, Ding P (2021) A dataset on the life-history and ecological traits of Chinese birds. Biodiversity Science, 29, 1149–1153. (in Chinese with English abstract) [王彦平, 宋云枫, 钟雨茜, 陈传武, 赵郁豪, 曾峭, 吴亦如, 丁平

(2021) 中国鸟类的生活史和生态学特征数据集. 生物多样性, 29, 1149–1153.]

Wong JSY, Soh MCK, Low BW, Er KBH (2023) Tropical bird communities benefit from regular-shaped and naturalised urban green spaces with water bodies. Landscape and Urban Planning, 231, 104644.

Wu MQ, Hu MM, Wang T, Fan C, Xia BC (2019) Recognition of urban ecological source area based on ecological security pattern and multi-scale landscape connectivity. Acta Ecologica Sinica, 39, 4720–4731. (in Chinese with English abstract) [吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成 (2019) 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 39, 4720–4731.]

Xie SL, Wang XK, Ren YF, Su ZM, Su YB, Wang SQ, Zhou WQ, Lu F, Qian YG, Gong C, Huang BB, Ouyang ZY (2020) Factors responsible for forest and water bird distributions in rivers and lakes along an urban gradient in Beijing. Science of the Total Environment, 735, 139308.

Yang XR, Tan XW, Chen CW, Wang YP (2020) The influence of urban park characteristics on bird diversity in Nanjing, China. Avian Research, 11, 45.

Yuan J, You FY, Hou CL, Ou HJ, Yin Y (2021) Reconstruction of urban wilderness habitats based on vegetation rewilding: Taking wildflower meadows as an example. Landscape Architecture Frontiers, 9, 26–39. (in Chinese with English abstract) [袁嘉, 游奉溢, 侯春丽, 欧桦杰, 尹渊 (2021) 基于植被再野化的城市荒野生境重建——以野花草甸为例. 景观设计学(中英文), 9, 26–39.]

Zeng XY, Song YH (2023) Study on the biodiversity distribution pattern of the green space in the central city of Kunming based on the key species and habitat quality assessment. Chinese Landscape Architecture, 39(9), 126–132. (in Chinese with English abstract) [曾欣怡, 宋钰红 (2023) 基于关键物种与生境质量评估的昆明市中心城区绿色空间生物多样性分布格局研究. 中国园林, 39(9), 126–132.]

Zhang P, Dong YL, Ren ZB, Wang GD, Guo YJ, Wang CC, Ma ZJ (2023) Rapid urbanization and meteorological changes are reshaping the urban vegetation pattern in urban core area: A national 315-city study in China. Science of the Total Environment, 904, 167269.

Zhang WJ, Liang CX, Liu J, Si XF, Feng G (2018) Species richness, phylogenetic and functional structure of bird communities in Chinese university campuses are associated with divergent variables. Urban Ecosystems, 21, 1213–1225.

Zheng BJ, Dong L (2019) Study on plant landscape of Beijing urban linear parks based on bird diversity improvement. Landscape Architecture, 26(1), 53–57. (in Chinese with English abstract) [郑冰晶, 董丽 (2019) 基于提高鸟类多样性的北京城市线性公园绿地植物景观探析. 风景园林, 26(1), 53–57.]

Zheng GM (2012) Ornithology, 2nd edn. Beijing Normal University Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2012) 鸟类学, 第二版. 北京师范大学出版社, 北京.]

Zheng GM (2023) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 4th edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2023) 中国鸟类分类与分布名录, 第四版. 科学出版社, 北京.]

Zivanovic AJ, Luck GW (2016) Social and environmental factors drive variation in plant and bird communities across urban greenspace in Sydney, Australia. Journal of Environmental Management, 169, 210–222.

(责任编委: 刘阳; 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025347

周楠, 黄美玲, 谭筱彩, 刘骏杰, 文可, 蒋爱伍 (2026) 基于公民科学数据的全国地级以上城市公园鸟类群落特征及环境影响因子. 生物多样性, 34, 25347. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025347

附录1 中国城市公园鸟类名录及物种多样性
Appendix 1 Checklist and species richness of birds in urban parks across China

I. 中国城市公园鸟类名录
I. Bird species checklist of urban parks in China

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red List	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
一、鸡形目 Galliformes					
一)雉科 Phasianidae					
1.鹌鹑 *Coturnix japonica*	S、W、P	植食/种食	NT		15
2.白眉山鹧鸪 *Arborophila gingica*	R	杂食	NT	二级	3
3.白鹇 *Lophura nycthemera*	R	杂食	LC	二级	6
4.斑翅山鹑 *Perdix dauurica*	R	杂食	LC		3
5.大石鸡 *Alectoris magna*	R	植食/种食	LC	二级	2
6.红腹锦鸡 *Chrysolophus pictus*	R	植食/种食	LC	二级	1
7.环颈雉 *Phasianus colchicus*	R	植食/种食	LC		89
8.灰胸竹鸡 *Bambusicola thoracicus*	R	杂食	LC		51
9.蓝马鸡 *Crossoptilon auritum*	R	植食/种食	LC	二级	1
10.石鸡 *Alectoris chukar*	R	植食/种食	LC		1
11.台湾竹鸡 *Bambusicola sonorivox*	R	杂食	LC		3
二、雁形目 Anseriformes					
二)鸭科 Anatidae					
12.白额雁 *Anser albifrons*	W、P	植食/种食	LC	二级	7
13.白眉鸭 *Spatula querquedula*	S、W、P	杂食	LC		30
14.白眼潜鸭 *Aythya nyroca*	S、W、P	植食/种食	NT		51
15.斑背潜鸭 *Aythya marila*	W、P	食虫	LC		13
16.斑脸海番鸭 *Melanitta stejnegeri*	W、P	食虫	LC		2
17.斑头秋沙鸭 *Mergellus albellus*	W、P	食虫	LC	二级	22
18.斑头雁 *Anser indicus*	S、W、P	植食/种食	LC		12
19.斑嘴鸭 *Anas zonorhyncha*	R、S、W、P	植食/种食	LC		208
20.赤膀鸭 *Mareca strepera*	S、W、P	植食/种食	LC		57
21.赤颈鸭 *Mareca penelope*	S、W、P	植食/种食	LC		53
22.赤麻鸭 *Tadorna ferruginea*	R、S、W、P	植食/种食	LC		82
23.赤嘴潜鸭 *Netta rufina*	S、W、P	植食/种食	LC		23
24.丑鸭 *Histrionicus histrionicus*	P	食虫	LC		1
25.大天鹅 *Cygnus cygnus*	S、W、P	植食/种食	LC	二级	14

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
26.豆雁 *Anser fabalis*	W、P	植食/种食	LC		21
27.短嘴豆雁 *Anser serrirostris*	W、P	植食/种食	NR		7
28.凤头潜鸭 *Aythya fuligula*	S、W、P	杂食	LC		54
29.红头潜鸭 *Aythya ferina*	S、W、P	植食/种食	VU		48
30.红胸秋沙鸭 *Mergus serrator*	S、W、P	肉食	LC		12
31.鸿雁 *Anser cygnoides*	S、W、P	植食/种食	VU	二级	27
32.花脸鸭 *Sibirionetta formosa*	W、P	植食/种食	LC	二级	20
33.灰雁 *Anser anser*	S、W、P	植食/种食	LC		20
34.栗树鸭 *Dendrocygna javanica*	R、S、	植食/种食	LC	二级	2
35.罗纹鸭 *Mareca falcata*	S、W、P	植食/种食	NT		61
36.绿翅鸭 *Anas crecca*	S、W、P	植食/种食	LC		96
37.绿眉鸭 *Mareca americana*		植食/种食	LC		3
38.绿头鸭 *Anas platyrhynchos*	R、S、W、P	杂食	LC		231
39.棉凫 *Nettapus coromandelianus*	R、S、P	植食/种食	LC	二级	10
40.琵嘴鸭 *Spatula clypeata*	S、W、P	食虫	LC		29
41.普通秋沙鸭 *Mergus merganser*	R、S、W、P	肉食	LC		57
42.翘鼻麻鸭 *Tadorna tadorna*	S、W、P	食虫	LC		20
43.青头潜鸭 *Aythya baeri*	S、W、P	植食/种食	CR	一级	17
44.鹊鸭 *Bucephala clangula*	S、W、P	食虫	LC		32
45.丝绒海番鸭 *Melanitta fusca*	W	食虫	VU		1
46.小白额雁 *Anser erythropus*	W、P	植食/种食	VU	二级	2
47.小天鹅 *Cygnus columbianus*	W、P	植食/种食	LC	二级	19
48.疣鼻天鹅 *Cygnus olor*	S、P	植食/种食	LC	二级	9
49.鸳鸯 *Aix galericulata*	R、S、W、P	植食/种食	LC	二级	56
50.长尾鸭 *Clangula hyemalis*	W、P	食虫	VU		6
51.针尾鸭 *Anas acuta*	S、W、P	植食/种食	LC		37
52.中华秋沙鸭 *Mergus squamatus*	S、W、P	肉食	EN	一级	4
三、䴙䴘目 Podicipediformes					
三)䴙䴘科 Podicipedidae					
53.赤颈䴙䴘*Podiceps grisegena*	S、W、P	杂食	LC	二级	2
54.凤头䴙䴘*Podiceps cristatus*	S、W、P	肉食	LC		111
55.黑颈䴙䴘*Podiceps nigricollis*	S、W、P	食虫	LC	二级	19

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
56.角䴙䴘*Podiceps auritus*	S、W、P	肉食	VU	二级	8
57.小䴙䴘*Tachybaptus ruficollis*	R	食虫	LC		506
四、鸽形目 Columbiformes					
四)鸠鸽科 Columbidae					
58.斑林鸽 *Columba hodgsonii*	R	食果/食蜜	LC		1
59.斑尾鹃鸠 *Macropygia unchall*	R、S	植食/种食	LC	二级	5
60.斑尾林鸽 *Columba palumbus*	R	植食/种食	LC	二级	1
61.红翅绿鸠 *Treron sieboldii*	R、P	食果/食蜜	LC	二级	5
62.厚嘴绿鸠 *Treron curvirostra*	R、	食果/食蜜	LC	二级	2
63.灰斑鸠 *Streptopelia decaocto*	R、	植食/种食	LC		44
64.火斑鸠 *Streptopelia tranquebarica*	R、S	植食/种食	LC		24
65.绿翅金鸠 *Chalcophaps indica*	R	杂食	LC		9
66.山斑鸠 *Streptopelia orientalis*	R、S	植食/种食	LC		349
67.雪鸽 *Columba leuconota*	R	植食/种食	LC		1
68.岩鸽 *Columba rupestris*	R	植食/种食	LC		13
69.原鸽 *Columba livia*	R	植食/种食	LC		4
70.珠颈斑鸠 *Spilopelia chinensis*	R、S	植食/种食	LC		772
五、佛法僧目 Coraciiformes					
五)翠鸟科 Alcedinidae					
71.白胸翡翠 *Halcyon smyrnensis*	R、S	肉食	LC	二级	70
72.斑鱼狗 *Ceryle rudis*	R、S	肉食	LC		64
73.冠鱼狗 *Megaceryle lugubris*	R	杂食	LC		19
74.蓝翡翠 *Halcyon pileata*	R、S	食虫	VU		6
75.普通翠鸟 *Alcedo atthis*	R、S	肉食	LC		415
六)蜂虎科 Meropidae					
76.蓝喉蜂虎 *Merops viridis*	R、S	食虫	LC	二级	2
77.栗喉蜂虎 *Merops philippinus*	R、S	食虫	LC	二级	5
七)佛法僧科 Coraciidae					
78.三宝鸟 *Eurystomus orientalis*	R、S、W、P	食虫	LC		39
六、鹳形目 Ciconiiformes					
八)鹳科 Ciconiidae					
79.东方白鹳 *Ciconia boyciana*	S、W、P	肉食	EN	一级	19

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
80.黑鹳 *Ciconia nigra*	S、W	肉食	LC	一级	11
81.钳嘴鹳 *Anastomus oscitans*	P	食虫	LC		1
七、鹤形目 Gruiformes					
九)鹤科 Gruidae					
82.白鹤 *Grus leucogeranus*	S、W、P	植食/种食	CR	一级	5
83.白头鹤 *Grus monacha*	S、W、P	植食/种食	VU	一级	1
84.丹顶鹤 *Grus japonensis*	S、W、P	杂食	VU	一级	2
85.灰鹤 *Grus grus*	S、W、P	植食/种食	LC	二级	5
十)秧鸡科 Rallidae					
86.白骨顶 *Fulica atra*	R、S、W	植食/种食	LC		226
87.白喉斑秧鸡 *Rallina eurizonoides*	R、S、	植食/种食	LC		2
88.白胸苦恶鸟 *Amaurornis phoenicurus*	R、S	杂食	LC		143
89.董鸡 *Gallicrex cinerea*	S	植食/种食	LC		1
90.黑水鸡 *Gallinula chloropus*	R、S、P	杂食	LC		417
91.红脚田鸡 *Zapornia akool*	R	杂食	LC		27
92.红胸田鸡 *Zapornia fusca*	R、S、P	植食/种食	LC		3
93.灰胸秧鸡 *Lewinia striata*	R、S、	植食/种食	LC		6
94.普通秧鸡 *Rallus indicus*	R、S、W、P	杂食	LC		20
95.西秧鸡 *Rallus aquaticus*	R、P	杂食	LC		6
96.小田鸡 *Zapornia pusilla*	S、W、P	食虫	LC		2
97.紫水鸡 *Porphyrio poliocephalus*	R	杂食	NR	二级	2
98.棕背田鸡 *Zapornia bicolor*	R	食虫	LC	二级	1
八、夜鹰目 Caprimulgiformes					
十一)夜鹰科 Caprimulgidae					
99.林夜鹰 *Caprimulgus affinis*	R、S	食虫	LC		1
100.普通夜鹰 *Caprimulgus jotaka*	R、S	食虫	LC		21
九、雨燕目 Apodiformes					
十二)雨燕科 Apodidae					
101.白喉针尾雨燕 *Hirundapus caudacutus*	R、S、P	食虫	LC		5
102.白腰雨燕 *Apus pacificus*	S、P	食虫	LC		26
103.短嘴金丝燕 *Aerodramus brevirostris*	R、S、P	食虫	LC		6
104.华西白腰雨燕 *Apus salimalii*	S	食虫	LC		2

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
105.普通雨燕 *Apus apus*	S、P	食虫	LC		41
106.小白腰雨燕 *Apus nipalensis*	R、S、P	食虫	LC		95
107.印支白腰雨燕 *Apus cooki*	S	食虫	LC		1
108.爪哇金丝燕 *Aerodramus fuciphagus*	R、S、	食虫	LC		3
109.棕雨燕 *Cypsiurus balasiensis*	R	食虫	LC		4
十、沙鸡目 Pteroclidiformes					
十三)沙鸡科 Pteroclidae					
110.毛腿沙鸡 *Syrrhaptes paradoxus*	R、S、W、P	植食/种食	LC		3
十一、鹃形目 Cuculiformes					
十四)杜鹃科 Cuculidae					
111.八声杜鹃 *Cacomantis merulinus*	R、S	食虫	LC		47
112.北棕腹鹰鹃 *Hierococcyx hyperythrus*	S、W、P	食虫	LC		6
113.翠金鹃 *Chrysococcyx maculatus*	R、S	食虫	LC		3
114.大杜鹃 *Cuculus canorus*	S、P	食虫	LC		60
115.大鹰鹃 *Hierococcyx sparverioides*	R、S、P	食虫	LC		35
116.东方中杜鹃 *Cuculus optatus*	S、P	食虫	LC		2
117.褐翅鸦鹃 *Centropus sinensis*	R	杂食	LC	二级	71
118.红翅凤头鹃 *Clamator coromandus*	R、S、P	食虫	LC		9
119.绿嘴地鹃 *Phaenicophaeus tristis*	R	食虫	LC		6
120.四声杜鹃 *Cuculus micropterus*	R、S、	食虫	LC		53
121.乌鹃 *Surniculus lugubris*	R、S、P	食虫	LC		4
122.小杜鹃 *Cuculus poliocephalus*	R、S、P	食虫	LC		8
123.小鸦鹃 *Centropus bengalensis*	R、S、P	食虫	LC	二级	11
124.噪鹃 *Eudynamys scolopaceus*	R、S、P	食果/食蜜	LC		89
125.中杜鹃 *Cuculus saturatus*	S	食虫	LC		7
126.棕腹鹰鹃 *Hierococcyx nisicolor*	S	食虫	LC		1
十二、鸻形目 Charadriiformes					
十五)彩鹬科 Rostratulidae					
127.彩鹬 *Rostratula benghalensis*	R、S、W	食虫	LC		7
十六)反嘴鹬科 Recurvirostridae					
128.反嘴鹬 *Recurvirostra avosetta*	S、W、P	食虫	LC		31
129.黑翅长脚鹬 *Himantopus himantopus*	S、W、P	食虫	LC		43

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
十七)鸻科 Charadriidae					
130.白脸鸻 *Charadrius dealbatus*	R、S、W、P	食虫	LC		3
131.东方鸻 *Charadrius veredus*	S、P	食虫	LC		2
132.凤头麦鸡 *Vanellus vanellus*	S、W、P	食虫	NT		15
133.环颈鸻 *Charadrius alexandrinus*	S、W、P	食虫	LC		28
134.灰鸻 *Pluvialis squatarola*	W、P	食虫	LC		10
135.灰头麦鸡 *Vanellus cinereus*	S、W、P	食虫	LC		45
136.剑鸻 *Charadrius hiaticula*	S、W、P	食虫	LC		1
137.金鸻 *Pluvialis fulva*	W、P	食虫	LC		8
138.金眶鸻 *Charadrius dubius*	R、S、W、P	食虫	LC		59
139.蒙古沙鸻 *Charadrius mongolus*	W、P	食虫	LC		8
140.青藏沙鸻 *Charadrius atrifrons*	S、W、P	食虫	NR		3
141.铁嘴沙鸻 *Charadrius leschenaultii*	W、P	食虫	LC		9
142.长嘴剑鸻 *Charadrius placidus*	W、P	食虫	LC		37
十八)鹮嘴鹬科 Ibidorhynchidae					
143.鹮嘴鹬 *Ibidorhyncha struthersii*	R	食虫	LC	二级	1
十九)蚝鹬科 Haematopodidae					
144.蚝鹬 *Haematopus ostralegus*	S、W	食虫	NT		3
二十)鸥科 Laridae					
145.白翅浮鸥 *Chlidonias leucopterus*	S、W、P	食虫	LC		8
146.白顶玄燕鸥 *Anous stolidus*	S、	肉食	LC		1
147.白额燕鸥 *Sternula albifrons*		肉食	LC		12
148.大凤头燕鸥 *Thalasseus bergii*	R、S	肉食	LC	二级	2
149.粉红燕鸥 *Sterna dougallii*	R、S	肉食	LC		1
150.褐翅燕鸥 *Onychoprion anaethetus*	R、S、	肉食	LC		3
151.黑尾鸥 *Larus crassirostris*	S、W、P	肉食	LC		32
152.黑枕燕鸥 *Sterna sumatrana*	R、S、W、P	肉食	LC		1
153.黑嘴鸥 *Chroicocephalus saundersi*	S、W、P	食虫	VU	一级	12
154.红嘴巨燕鸥 *Hydroprogne caspia*	R、S、W、P	肉食	LC		7
155.红嘴鸥 *Chroicocephalus ridibundus*	S、W、P	食虫	LC		117
156.灰背鸥 *Larus schistisagus*	W、P	肉食	LC		4
157.灰翅浮鸥 *Chlidonias hybrida*	S、W、P	肉食	LC		37

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
158.灰翅鸥 *Larus glaucescens*	W、P	肉食	LC		1
159.鸥嘴噪鸥 *Gelochelidon nilotica*	R、S、P	杂食	LC		8
160.普通海鸥 *Larus canus*	W、P	杂食	LC		29
161.普通燕鸥 *Sterna hirundo*	S、W、P	肉食	LC		32
162.三趾鸥 *Rissa tridactyla*	W、P	杂食	VU		4
163.乌燕鸥 *Onychoprion fuscatus*	W、P	肉食	LC		1
164.西伯利亚银鸥 *Larus vegae*	S、W、P	肉食	LC		92
165.小黑背银鸥 *Larus fuscus*	W、P	肉食	LC		15
166.小鸥 *Hydrocoloeus minutus*	S、P	食虫	LC	二级	1
167.遗鸥 *Ichthyaetus relictus*	S、W、P	肉食	VU	一级	5
168.渔鸥 *Ichthyaetus ichthyaetus*	S、W、P	肉食	LC		13
169.中华凤头燕鸥 *Thalasseus bernsteini*	S、W、P	肉食	CR	一级	1
170.棕头鸥 *Chroicocephalus brunnicephalus*	S、W、P	肉食	LC		12
二十一)趾鹑科 Turnicidae					
171.水雉黄脚三趾鹑 *Turnix tanki*	R、S、W、P	植食/种食	LC		2
172.棕三趾鹑 *Turnix suscitator*	R、P	植食/种食	LC		1
二十二)水雉科 Jacanidae					
173.水雉 *Hydrophasianus chirurgus*	R、S、W	食虫	LC	二级	18
二十三)燕鸻科 Glareolidae					
174.普通燕鸻 *Glareola maldivarum*	S、P	食虫	LC		5
二十四)鹬科 Scolopacidae					
175.白腰杓鹬 *Numenius arquata*	S、W、P	杂食	NT	二级	16
176.白腰草鹬 *Tringa ochropus*	S、W、P	食虫	LC		91
177.斑尾塍鹬 *Limosa lapponica*	P	食虫	NT		7
178.半蹼鹬 *Limnodromus semipalmatus*	P	食虫	NT	二级	4
179.大杓鹬 *Numenius madagascariensis*	W、P	食虫	EN	二级	6
180.大滨鹬 *Calidris tenuirostris*	W、P	杂食	EN	二级	6
181.大沙锥 *Gallinago megala*	W、P	食虫	LC		8
182.翻石鹬 *Arenaria interpres*	W、P	食虫	LC	二级	5
183.鹤鹬 *Tringa erythropus*	S、W、P	食虫	LC		11
184.黑腹滨鹬 *Calidris alpina*	W、P	食虫	LC		13
185.黑尾塍鹬 *Limosa limosa*	S、W、P	食虫	NT		9

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
186.红腹滨鹬 *Calidris canutus*	P	食虫	NT		5
187.红脚鹬 *Tringa totanus*	S、W、P	食虫	LC		14
188.红颈瓣蹼鹬 *Phalaropus lobatus*	P	食虫	LC		2
189.红颈滨鹬 *Calidris ruficollis*	W、P	食虫	LC		8
190.灰尾漂鹬 *Tringa brevipes*	P	食虫	NT		5
191.矶鹬 *Actitis hypoleucos*	S、W、P	杂食	LC		99
192.尖尾滨鹬 *Calidris acuminata*	W、P	食虫	VU		3
193.阔嘴鹬 *Calidris falcinellus*	W、P	食虫	LC	二级	4
194.林鹬 *Tringa glareola*	W、P	食虫	LC		28
195.流苏鹬 *Calidris pugnax*	W、P	杂食	LC		3
196.翘嘴鹬 *Xenus cinereus*	W、P	食虫	LC		8
197.青脚滨鹬 *Calidris temminckii*	W、P	食虫	LC		13
198.青脚鹬 *Tringa nebularia*	W、P	食虫	LC		48
199.丘鹬 *Scolopax rusticola*	S、W、P	食虫	LC		21
200.三趾滨鹬 *Calidris alba*	W、P	食虫	LC		4
201.扇尾沙锥 *Gallinago gallinago*	S、W、P	食虫	LC		50
202.弯嘴滨鹬 *Calidris ferruginea*	W、P	食虫	NT		8
203.小杓鹬 *Numenius minutus*	P	食虫	LC	二级	3
204.小滨鹬 *Calidris minuta*	P	食虫	LC		3
205.小青脚鹬 *Tringa guttifer*	P	食虫	EN	一级	4
206.泽鹬 *Tringa stagnatilis*	S、P	食虫	LC		18
207.长趾滨鹬 *Calidris subminuta*	W、P	食虫	LC		2
208.针尾沙锥 *Gallinago stenura*	S、W、P	食虫	LC		8
209.中杓鹬 *Numenius phaeopus*	W、P	食虫	LC		14
十三、潜鸟目 Gaviiformes					
二十五)潜鸟科 Gaviidae					
210.黑喉潜鸟 *Gavia arctica*	W、P	肉食	LC		2
211.红喉潜鸟 *Gavia stellata*	S、W、P	肉食	LC		5
212.太平洋潜鸟 *Gavia pacifica*	W、P	肉食	LC		3
十四、鲣鸟目 Suliformes					
二十六)军舰鸟科 Fregatidae					
213.白斑军舰鸟 *Fregata ariel*	S、P	肉食	LC	二级	1

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
二十七)鸬鹚科 Phalacrocoracidae					
214.黑颈鸬鹚 *Microcarbo niger*	R、S、	肉食	LC	二级	1
215.绿背鸬鹚 *Phalacrocorax capillatus*	W、P	肉食	LC		6
216.普通鸬鹚 *Phalacrocorax carbo*	S、W、P	肉食	LC		144
217.侏鸬鹚 *Microcarbo pygmaeus*	W	肉食	LC		1
十五、鹈形目 Pelecaniformes					
二十八)鹮科 Threskiornithidae					
218.白琵鹭 *Platalea leucorodia*	S、W、P	食虫	LC	二级	26
219.彩鹮 *Plegadis falcinellus*	P	食虫	LC	一级	1
220.黑脸琵鹭 *Platalea minor*	S、W、P	食虫	EN	一级	12
二十九)鹭科 Ardeidae					
221.白鹭 *Egretta garzetta*	R、S、W	食虫	LC		508
222.苍鹭 *Ardea cinerea*	R、S、W、P	肉食	LC		273
223.草鹭 *Ardea purpurea*	R、S、W、P	肉食	LC		20
224.池鹭 *Ardeola bacchus*	R、S、W	食虫	LC		277
225.大白鹭 *Ardea alba*	R、S、W、P	肉食	LC		181
226.大麻鳽 *Botaurus stellaris*	S、W、P	肉食	LC		23
227.黑冠鳽 *Gorsachius melanolophus*	R、S	食虫	LC	二级	4
228.黑苇鳽 *Ixobrychus flavicollis*	R、S、P	肉食	LC		16
229.黄斑苇鳽 *Ixobrychus sinensis*	R、S、W、P	食虫	LC		86
230.黄嘴白鹭 *Egretta eulophotes*	S、W、P	食虫	VU	一级	7
231.栗苇鳽 *Ixobrychus cinnamomeus*	R、S、P	肉食	LC		26
232.绿鹭 *Butorides striata*	R、S、W、P	肉食	LC		44
233.牛背鹭 *Bubulcus coromandus*	R、S、W、P	食虫	NR		60
234.岩鹭 *Egretta sacra*	R、P	杂食	LC	二级	6
235.夜鹭 *Nycticorax nycticorax*	R、S	肉食	LC		399
236.中白鹭 *Ardea intermedia*	R、S、W、P	肉食	LC		83
237.紫背苇鳽 *Ixobrychus eurhythmus*	S、W、P	肉食	LC		11
三十)鹈鹕科 Pelecanidae					
238.卷羽鹈鹕 *Pelecanus crispus*	S、W、P	肉食	NT	一级	3
十六、鹰形目 Accipitriformes					
三十一)鹗科 Pandionidae					

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
239.鹗 *Pandion haliaetus*	R、S、W	肉食	LC	二级	24
三十二)鹰科 Accipitridae					
240.白腹海雕 *Haliaeetus leucogaster*	R、	肉食	LC	一级	1
241.白腹隼雕 *Aquila fasciata*	R、W、P	肉食	LC	二级	1
242.白腹鹞 *Circus spilonotus*	S、W、P	肉食	LC	二级	15
243.白肩雕 *Aquila heliaca*	R、W、P	肉食	VU	一级	1
244.白尾海雕 *Haliaeetus albicilla*	S、W、P	肉食	LC	一级	6
245.白尾鹞 *Circus cyaneus*	S、W、P	肉食	LC	二级	28
246.苍鹰 *Accipiter gentilis*	S、W、P	肉食	LC	二级	19
247.草原雕 *Aquila nipalensis*	S、W、P	肉食	EN	一级	1
248.赤腹鹰 *Accipiter soloensis*	R、S、W、P	肉食	LC	二级	32
249.大鵟 *Buteo hemilasius*	R、S、W、P	肉食	LC	二级	25
250.短趾雕 *Circaetus gallicus*	R、P	肉食	LC	二级	2
251.凤头蜂鹰 *Pernis ptilorhynchus*	R、S、W、P	食虫	LC	二级	26
252.凤头鹰 *Accipiter trivirgatus*	R、P	肉食	LC	二级	117
253.高山兀鹫 *Gyps himalayensis*	R、W	肉食	NT	二级	2
254.褐耳鹰 *Accipiter badius*	R、P	肉食	LC	二级	1
255.褐冠鹃隼 *Aviceda jerdoni*	R	食虫	LC	二级	3
256.黑翅鸢 *Elanus caeruleus*	R、S、P	肉食	LC	二级	30
257.黑冠鹃隼 *Aviceda leuphotes*	R、S、P	食虫	LC	二级	4
258.黑鸢 *Milvus migrans*	R、W	肉食	LC	二级	102
259.胡兀鹫 *Gypaetus barbatus*	R、P	肉食	NT	一级	1
260.灰脸鵟鹰 *Butastur indicus*	S、W、P	肉食	LC	二级	17
261.金雕 *Aquila chrysaetos*	R、S、W	肉食	LC	一级	1
262.林雕 *Ictinaetus malaiensis*	R	肉食	LC	二级	9
263.毛脚鵟 *Buteo lagopus*	W、P	肉食	LC	二级	4
264.欧亚鵟 *Buteo buteo*	W、P	肉食	LC	二级	2
265.普通鵟 *Buteo japonicus*	S、W、P	肉食	LC	二级	133
266.雀鹰 *Accipiter nisus*	R、S、P	肉食	LC	二级	93
267.鹊鹞 *Circus melanoleucos*	S、W、P	肉食	LC	二级	13
268.日本松雀鹰 *Accipiter gularis*	S、W、P	肉食	LC	二级	17
269.蛇雕 *Spilornis cheela*	R、P	肉食	LC	二级	31

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
270.松雀鹰 *Accipiter virgatus*	R	肉食	LC	二级	39
271.秃鹫 *Aegypius monachus*	R、W	肉食	NT	一级	4
272.乌雕 *Clanga clanga*	R、W、P	肉食	VU	一级	3
273.喜山鵟 *Buteo refectus*	R	肉食	LC	二级	1
274.靴隼雕 *Hieraaetus pennatus*	R、P	肉食	LC	二级	4
275.鹰雕 *Nisaetus nipalensis*	R	肉食	NT	二级	5
276.棕尾鵟 *Buteo rufinus*	R、W、P	肉食	LC	二级	1
三十三)鸱鸮科 Strigidae					
277.斑头鸺鹠 *Glaucidium cuculoides*	R	食虫	LC	二级	31
278.北领角鸮 *Otus semitorques*	R、S	食虫	LC	二级	1
279.北鹰鸮 *Ninox japonica*	R、S、W、P	食虫	LC	二级	8
280.雕鸮 *Bubo bubo*	R、W	肉食	LC	二级	4
281.短耳鸮 *Asio flammeus*	S、W	肉食	LC	二级	13
282.鬼鸮 *Aegolius funereus*	R	肉食	LC	二级	1
283.红角鸮 *Otus sunia*	R、S、W	食虫	LC	二级	10
284.灰林鸮 *Strix nivicolum*	R	肉食	LC	二级	6
285.领角鸮 *Otus lettia*	R	食虫	LC	二级	7
286.领鸺鹠 *Glaucidium brodiei*	R	肉食	LC	二级	4
287.西红角鸮 *Otus scops*	R	食虫	LC	二级	1
288.长耳鸮 *Asio otus*	R、S、W	肉食	LC	二级	13
289.纵纹腹小鸮 *Athene noctua*	R	食虫	LC	二级	4
十七、咬鹃目 Trogoniformes					
三十四)咬鹃科 Trogonidae					
290.红头咬鹃 *Harpactes erythrocephalus*	R	食虫	LC	二级	1
十八、犀鸟目 Bucerotiformes					
三十五)戴胜科 Upupidae					
291.戴胜 *Upupa epops*	R、S、W、P	食虫	LC		217
十八、啄木鸟目 Piciformes					
三十六)拟啄木鸟科 Megalaimidae					
292.大拟啄木鸟 *Psilopogon virens*	R	食果/食蜜	LC		20
293.黑眉拟啄木鸟 *Psilopogon faber*	R	食果/食蜜	LC		2
294.蓝喉拟啄木鸟 *Psilopogon asiaticus*	R	杂食	LC		1

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
295.台湾拟啄木鸟 *Psilopogon nuchalis*	R	食果/食蜜	LC		3
十九、鴷形目 Piciformes					
三十七)啄木鸟科 Picidae					
296.白背啄木鸟 *Dendrocopos leucotos*	R	食虫	LC		11
297.白翅啄木鸟 *Dendrocopos leucopterus*	R	食虫	LC	二级	1
298.斑姬啄木鸟 *Picumnus innominatus*	R	食虫	LC		104
299.赤胸啄木鸟 *Dryobates cathpharius*	R	食虫	LC		2
300.大斑啄木鸟 *Dendrocopos major*	R	杂食	LC		209
301.黑啄木鸟 *Dryocopus martius*	R	食虫	LC	二级	2
302.黄嘴栗啄木鸟 *Blythipicus pyrrhotis*	R	食虫	LC		1
303.灰头绿啄木鸟 *Picus canus*	R	食虫	LC		135
304.栗啄木鸟 *Micropternus brachyurus*	R	食虫	LC		2
305.小星头啄木鸟 *Yungipicus kizuki*	R	食虫	LC		15
306.星头啄木鸟 *Yungipicus canicapillus*	R	食虫	LC		201
307.蚁䴕*Jynx torquilla*	S、W、P	食虫	LC		33
308.棕腹啄木鸟 *Dendrocopos hyperythrus*	R、S、W、P	食虫	LC		51
二十、隼形目 Falconiformes					
三十八)隼科 Falconidae					
309.红脚隼 *Falco amurensis*	R、S、W、P	食虫	LC	二级	28
310.红隼 *Falco tinnunculus*	R、W、P	肉食	LC	二级	189
311.黄爪隼 *Falco naumanni*	S、W、P	食虫	LC	二级	2
312.灰背隼 *Falco columbarius*	S、W、P	肉食	LC	二级	6
313.猎隼 *Saker Falcon*	P	肉食	EN	一级	10
314.燕隼 *Falco subbuteo*	S、W、P	食虫	LC	二级	31
315.游隼 *Falco peregrinus*	R、S、W、P	肉食	LC	二级	56
二十一、鹦鹉目 Psittaciformes					
三十九)鹦鹉科 Psittacidae					
316.大紫胸鹦鹉 *Psittacula derbiana*	R	杂食	NT	二级	1
二十二、鸨形目 Otidiformes					
四十)鸨科 Otididae					
317.大鸨 *Otis tarda*	R、S、W、P	杂食	VU	一级	2
二十三、雀形目 Passeriformes					

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
四十一)八色鸫科 Pittidae					
318.仙八色鸫 *Pitta nympha*	S、P	食虫	VU	二级	6
319.蓝翅八色鸫 *Pitta moluccensis*		食虫	LC	二级	1
四十二)百灵科 Alaudidae					
320.短趾百灵 *Calandrella cheleensis*	R、S、P	杂食	LC		1
321.凤头百灵 *Galerida cristata*	R、W、P	植食/种食	LC		1
322.角百灵 *Eremophila alpestris*	R、S、W、P	杂食	LC		1
323.蒙古百灵 *Melanocorypha mongolica*	S	杂食	LC	二级	1
324.小云雀 *Alauda gulgula*	R、S、W	杂食	LC		13
325.云雀 *Alauda arvensis*	S、W、P	植食/种食	LC	二级	18
四十三)鹎科 Pycnonotidae					
326.白喉冠鹎 *Alophoixus pallidus*	R	食果/食蜜	LC		2
327.白喉红臀鹎 *Pycnonotus aurigaster*	R	杂食	LC		144
328.白头鹎 *Pycnonotus sinensis*	R、S、W、P	杂食	LC		810
329.凤头雀嘴鹎 *Spizixos canifrons*	R	杂食	LC		5
330.黑短脚鹎 *Hypsipetes leucocephalus*	R、S、W	食果/食蜜	LC		99
331.红耳鹎 *Pycnonotus jocosus*	R	杂食	LC		198
332.黄臀鹎 *Pycnonotus xanthorrhous*	R	食果/食蜜	LC		57
333.栗背短脚鹎 *Hemixos castanonotus*	R	杂食	LC		79
334.栗耳短脚鹎 *Hypsipetes amaurotis*	R、W、P	食果/食蜜	LC		47
335.领雀嘴鹎 *Spizixos semitorques*	R	杂食	LC		136
336.绿翅短脚鹎 *Ixos mcclellandii*	R	杂食	LC		61
四十四)伯劳科 Laniidae					
337.红尾伯劳 *Lanius cristatus*	S、W、P	食虫	LC		125
338.虎纹伯劳 *Lanius tigrinus*	S、W、P	食虫	LC		31
339.灰背伯劳 *Lanius tephronotus*	R、S、P	食虫	LC		20
340.栗背伯劳 *Lanius collurioides*	R	食虫	LC		4
341.牛头伯劳 *Lanius bucephalus*	R、S、W、P	杂食	LC		23
342.楔尾伯劳 *Lanius sphenocercus*	S、W、P	食虫	LC		16
343.棕背伯劳 *Lanius schach*	R、S	食虫	LC		460
344.棕尾伯劳 *Lanius phoenicuroides*	S	食虫	LC		4
四十五)戴菊科 Regulidae					

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
345.戴菊 *Regulus regulus*	R、S、W、P	食虫	LC		117
四十六)鸫科 Turdidae					
346.白腹鸫 *Turdus pallidus*	S、W、P	食虫	LC		114
347.白颈鸫 *Turdus albocinctus*	R	杂食	LC		1
348.白眉地鸫 *Geokichla sibirica*	S、W、P	食虫	LC		12
349.白眉鸫 *Turdus obscurus*	W、P	食果/食蜜	LC		66
350.白眉歌鸫 *Turdus iliacus*	P	杂食	NT		4
351.斑鸫 *Turdus eunomus*	W、P	食虫	LC		200
352.宝兴歌鸫 *Turdus mupinensis*	R、S、W、P	杂食	LC		25
353.藏乌鸫 *Turdus maximus*	R	杂食	LC		18
354.橙头地鸫 *Geokichla citrina*	R、S、P	杂食	LC		8
355.赤颈鸫 *Turdus ruficollis*	S、W、P	食虫	LC		73
356.赤胸鸫 *Turdus chrysolaus*	S、W、P	食虫	LC		16
357.褐头鸫 *Turdus feae*	S、P	杂食	VU	二级	1
358.黑喉鸫 *Turdus atrogularis*	W、P	食虫	LC		27
359.黑胸鸫 *Turdus dissimilis*	R、P	杂食	LC		18
360.红尾斑鸫 *Turdus naumanni*	W、P	食虫	LC		219
361.槲鸫 *Turdus viscivorus*	R、S	杂食	LC		4
362.虎斑地鸫 *Zoothera aurea*	S、W、P	食虫	LC		70
363.灰背鸫 *Turdus hortulorum*	S、W、P	食虫	LC		214
364.灰翅鸫 *Turdus boulboul*	S	食虫	LC		3
365.灰头鸫 *Turdus rubrocanus*	R	杂食	LC		16
366.欧乌鸫 *Turdus merula*	R	杂食	LC		24
367.四川淡背地鸫 *Zoothera griseiceps*	S	食虫	LC		1
368.田鸫 *Turdus pilaris*	S、W、P	食虫	LC		3
369.乌鸫 *Turdus mandarinus*	R、W	杂食	LC		721
370.乌灰鸫 *Turdus cardis*	S、W、P	杂食	LC		91
371.小虎斑地鸫 *Zoothera dauma*	S、W	食虫	LC		3
372.长尾地鸫 *Zoothera dixoni*	W、P	食虫	LC		1
373.棕背黑头鸫 *Turdus kessleri*	R	杂食	LC		2
四十七)钩嘴鹎科 Vangidae					
374.钩嘴林鹎 *Tephrodornis virgatus*	R	食虫	LC		3

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
375.褐背鹟鹎 *Hemipus picatus*	R	食虫	LC		1
四十八)河乌科 Cinclidae					
376.河乌 *Cinclus cinclus*	R	食虫	LC		1
377.褐河乌 *Cinclus pallasii*	R	食虫	LC		1
四十九)太阳鸟科 Nectariniidae					
378.叉尾太阳鸟 *Aethopyga christinae*	R	杂食	LC		176
379.黄腹花蜜鸟 *Cinnyris jugularis*	R	食果/食蜜	LC		10
380.黄腰太阳鸟 *Aethopyga siparaja*	R	杂食	LC		9
381.蓝喉太阳鸟 *Aethopyga gouldiae*	R	杂食	LC		9
五十)黄鹂科 Oriolidae					
382.黑枕黄鹂 *Oriolus chinensis*	R、S、P	食果/食蜜	LC		63
五十一)蝗莺科 Locustellidae					
383.斑背大尾莺 *Helopsaltes pryeri*	S、W	食虫	NT		1
384.北短翅蝗莺 *Locustella davidi*	S、P	食虫	LC		3
385.苍眉蝗莺 *Helopsaltes fasciolatus*	S、P	食虫	LC		1
386.东亚蝗莺 *Helopsaltes pleskei*	S、W、P	食虫	VU		2
387.高山短翅蝗莺 *Locustella mandelli*	R、P	食虫	LC		1
388.矛斑蝗莺 *Locustella lanceolata*	S、P	食虫	LC		7
389.小蝗莺 *Helopsaltes certhiola*	S、P	食虫	LC		13
390.中华短翅蝗莺 *Locustella tacsanowskia*	S	食虫	LC		1
五十二)鹡鸰科 Motacillidae					
391.白鹡鸰 *Motacilla alba*	R、S、W、P	食虫	LC		622
392.北鹨 *Anthus gustavi*	S、P	食虫	LC		1
393.布氏鹨 *Anthus godlewskii*	S、P	食虫	LC		1
394.粉红胸鹨 *Anthus roseatus*	R、S、W、P	食虫	LC		10
395.红喉鹨 *Anthus cervinus*	W、P	食虫	LC		13
396.黄腹鹨 *Anthus rubescens*	W、P	食虫	LC		31
397.黄鹡鸰 *Motacilla tschutschensis*	S、W、P	食虫	LC		46
398.黄头鹡鸰 *Motacilla citreola*	S、W、P	食虫	LC		17
399.灰鹡鸰 *Motacilla cinerea*	R、S、W、P	食虫	LC		209
400.山鹡鸰 *Dendronanthus indicus*	S、W、P	食虫	LC		17
401.树鹨 *Anthus hodgsoni*	S、W、P	食虫	LC		295

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
402.水鹨 *Anthus spinoletta*	R、W、P	食虫	LC		49
403.田鹨 *Anthus rufulus*	S、W、P	食虫	LC		37
五十三)鹪鹩科 Troglodytidae					
404.鹪鹩 *Troglodytes troglodytes*	R、S、W、P	食虫	LC		50
五十四)卷尾科 Dicruridae					
405.发冠卷尾 *Dicrurus hottentottus*	R、S、W、P	杂食	LC		47
406.古铜色卷尾 *Dicrurus aeneus*	R、	食虫	LC		2
407.黑卷尾 *Dicrurus macrocercus*	R、S	杂食	LC		89
408.灰卷尾 *Dicrurus leucophaeus*	S、W、P	食虫	LC		55
五十五)椋鸟科 Sturnidae					
409.八哥 *Acridotheres cristatellus*	R、P	杂食	LC		427
410.北椋鸟 *Agropsar sturninus*	S、W、P	食虫	LC		15
411.黑领椋鸟 *Gracupica nigricollis*	R	食虫	LC		170
412.灰背椋鸟 *Sturnia sinensis*	R、S、W	食虫	LC		21
413.灰椋鸟 *Spodiopsar cineraceus*	S、W、P	食虫	LC		350
414.灰头椋鸟 *Sturnia malabarica*	R	杂食	LC		1
415.家八哥 *Acridotheres tristis*	R	杂食	LC		14
416.林八哥 *Acridotheres grandis*	R	食虫	LC		1
417.丝光椋鸟 *Spodiopsar sericeus*	R、S、W	食果/食蜜	LC		335
418.亚洲辉椋鸟 *Aplonis panayensis*	R、	食果/食蜜	LC		1
419.紫背椋鸟 *Agropsar philippensis*	W、P	食果/食蜜	LC		1
420.紫翅椋鸟 *Sturnus vulgaris*	S、W、P	杂食	LC		14
五十六)林鹛科 Timaliidae					
421.斑胸钩嘴鹛 *Erythrogenys gravivox*	R	食虫	LC		11
422.红顶鹛 *Timalia pileata*	R	食虫	LC		1
423.红头穗鹛 *Cyanoderma ruficeps*	R、W	食虫	LC		64
424.华南斑胸钩嘴鹛 *Erythrogenys swinhoei*	R	食虫	LC		4
425.台湾棕颈钩嘴鹛 *Pomatorhinus musicus*	R	食虫	LC		2
426.棕颈钩嘴鹛 *Pomatorhinus ruficollis*	R	食虫	LC		57
五十七)鳞胸鹪鹛科 Pnoepygidae					
427.鳞胸鹪鹛 *Pnoepyga albiventer*	R	杂食	LC		1
428.小鳞胸鹪鹛 *Pnoepyga pusilla*	R	食虫	LC		4

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
五十八)柳莺科 Phylloscopidae					
429.暗绿柳莺 *Phylloscopus trochiloides*	S、W	食虫	LC		3
430.白斑尾柳莺 *Phylloscopus ogilviegranti*	R、S	食虫	LC		1
431.白眶鹟莺 *Phylloscopus intermedius*	S、W、	食虫	LC		1
432.比氏鹟莺 *Phylloscopus valentini*	S、P	食虫	LC		5
433.橙斑翅柳莺 *Phylloscopus pulcher*	R	食虫	LC		5
434.淡脚柳莺 *Phylloscopus tenellipes*	S、P	食虫	LC		43
435.淡眉柳莺 *Phylloscopus humei*	S、P	食虫	LC		7
436.淡尾鹟莺 *Phylloscopus soror*	S、P	食虫	LC		1
437.甘肃柳莺 *Phylloscopus kansuensis*	S、W	食虫	LC		4
438.冠纹柳莺 *Phylloscopus claudiae*	S、W、P	食虫	LC		27
439.褐柳莺 *Phylloscopus fuscatus*	S、W、P	食虫	LC		173
440.黑眉柳莺 *Phylloscopus ricketti*	S、W、	食虫	LC		15
441.华南冠纹柳莺 *Phylloscopus goodsoni*	R、S、P	食虫	LC		12
442.华西柳莺 *Phylloscopus occisinensis*	S、W、P	食虫	NR		2
443.黄腹柳莺 *Phylloscopus affinis*	S、	食虫	LC		1
444.黄眉柳莺 *Phylloscopus inornatus*	S、W、P	食虫	LC		305
445.黄腰柳莺 *Phylloscopus proregulus*	S、W、P	食虫	LC		406
446.灰冠鹟莺 *Phylloscopus tephrocephalus*	S	食虫	LC		6
447.灰喉柳莺 *Phylloscopus maculipennis*	S、W	食虫	LC		5
448.极北柳莺 *Phylloscopus borealis*	S、W、P	食虫	LC		88
449.巨嘴柳莺 *Phylloscopus schwarzi*	S、W、P	食虫	LC		40
450.堪察加柳莺 *Phylloscopus examinandus*	P	食虫	LC		1
451.库页岛柳莺 *Phylloscopus borealoides*	W、P	食虫	LC		5
452.栗头鹟莺 *Phylloscopus castaniceps*	S、W、P	食虫	LC		11
453.林柳莺 *Phylloscopus sibilatrix*	S、P	食虫	LC		3
454.冕柳莺 *Phylloscopus coronatus*	S、P	食虫	LC		55
455.日本柳莺 *Phylloscopus xanthodryas*	P	食虫	LC		1
456.双斑绿柳莺 *Phylloscopus plumbeitarsus*	S、W、P	食虫	LC		30
457.四川柳莺 *Phylloscopus forresti*	S	食虫	LC		3
458.乌嘴柳莺 *Phylloscopus magnirostris*	S、P	食虫	LC		1
459.西南冠纹柳莺 *Phylloscopus reguloides*	S	食虫	LC		2

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
460.云南柳莺 *Phylloscopus yunnanensis*	R、S	食虫	LC		7
461.棕腹柳莺 *Phylloscopus subaffinis*	S、W	食虫	LC		8
462.棕眉柳莺 *Phylloscopus armandii*	R、S	食虫	LC		8
五十九)梅花雀科 Estrildidae					
463.白腰文鸟 *Lonchura striata*	R	植食/种食	LC		168
464.斑文鸟 *Lonchura punctulata*	R	植食/种食	LC		143
六十)攀雀科 Remizidae					
465.中华攀雀 *Remiz consobrinus*	S、W、P	食虫	LC		27
六十一)雀科 Passeridae					
466.褐翅雪雀 *Montifringilla adamsi*	R	植食/种食	LC		1
467.家麻雀 *Passer domesticus*	R、	植食/种食	LC		20
468.麻雀 *Passer montanus*	R	植食/种食	LC		665
469.山麻雀 *Passer cinnamomeus*	R	植食/种食	LC		21
六十二)雀鹛科 Alcippeidae					
470.淡眉雀鹛 *Alcippe hueti*	R、W	食虫	NR		15
471.灰眶雀鹛 *Alcippe davidi*	R	食虫	LC		7
472.云南雀鹛 *Alcippe fratercula*	R	食虫	NR		3
六十三)山椒鸟科 Campephagidae					
473.暗灰鹃鵙 *Lalage melaschistos*	R、S、W、P	食虫	LC		46
474.赤红山椒鸟 *Pericrocotus speciosus*	R	食虫	LC		50
475.大鹃鵙 *Coracina macei*	R、S	食虫	LC		1
476.短嘴山椒鸟 *Pericrocotus brevirostris*	S	食虫	LC		1
477.粉红山椒鸟 *Pericrocotus roseus*	S	食虫	LC		4
478.灰喉山椒鸟 *Pericrocotus solaris*	R、P	食虫	LC		44
479.灰山椒鸟 *Pericrocotus divaricatus*	S、W、P	食虫	LC		26
480.琉球山椒鸟 *Pericrocotus tegimae*		食虫	LC		3
481.小灰山椒鸟 *Pericrocotus cantonensis*	S、P	食虫	LC		45
482.长尾山椒鸟 *Pericrocotus ethologus*	S、W、P	食虫	LC		7
六十四)山雀科 Paridae					
483.大山雀 *Parus minor*	R、	杂食	NR		635
484.地山雀 *Pseudopodoces humilis*	R	食虫	LC		1
485.褐冠山雀 *Lophophanes dichrous*	R	食虫	LC		1

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
486.褐头山雀 *Poecile montanus*	R	食虫	LC		30
487.黄腹山雀 *Pardaliparus venustulus*	R、W	食虫	LC		170
488.黄颊山雀 *Machlolophus spilonotus*	R	食虫	LC		4
489.黄眉林雀 *Sylviparus modestus*	R	食虫	LC		2
490.灰蓝山雀 *Cyanistes cyanus*	R、S	食虫	LC		8
491.火冠雀 *Cephalopyrus flammiceps*	R、W、P	食虫	LC		1
492.绿背山雀 *Parus monticolus*	R	杂食	LC		36
493.煤山雀 *Periparus ater*	R	杂食	LC		79
494.欧亚大山雀 *Parus major*	R、W	杂食	LC		12
495.四川褐头山雀 *Poecile weigoldicus*	R、	食虫	LC		1
496.杂色山雀 *Sittiparus varius*	R、W、P	食虫	LC		8
497.沼泽山雀 *Poecile palustris*	R	杂食	LC		93
六十五)扇尾鹟科 Rhipiduridae					
498.白喉扇尾鹟 *Rhipidura albicollis*	R	食虫	LC		13
六十六)扇尾莺科 Cisticolidae					
499.暗冕山鹪莺 *Prinia rufescens*	R	食虫	LC		1
500.白喉山鹪莺 *Prinia superciliaris*	R	食虫	LC		1
501.纯色山鹪莺 *Pycnonotus sinensis*	R、	食虫	LC		190
502.黄腹山鹪莺 *Prinia flaviventris*	R	食虫	LC		107
503.灰胸山鹪莺 *Prinia hodgsonii*	R	食虫	LC		2
504.金头扇尾莺 *Cisticola exilis*	R、P	食虫	LC		3
505.山鹪莺 *Prinia striata*	R	食虫	LC		2
506.长尾缝叶莺 *Orthotomus sutorius*	R	食虫	LC		135
507.棕扇尾莺 *Cisticola juncidis*	R、S、W	食虫	LC		23
六十七)鸸科 Sittidae					
508.滇鸸*Sitta yunnanensis*	R	食虫	NT	二级	1
509.黑头鸸*Sitta villosa*	R	杂食	LC		36
510.红翅旋壁雀 *Tichodroma muraria*	R、S、W	食虫	LC		1
511.栗臀鸸*Sitta nagaensis*	R	食虫	LC		2
512.普通鸸*Sitta europaea*	R	食虫	LC		35
六十八)树莺科 Cettiidae					
513.淡脚树莺 *Hemitesia pallidipes*	R、P	食虫	LC		2

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
514.短翅树莺 *Horornis diphone*	W、P	食虫	LC		1
515.黄腹树莺 *Horornis acanthizoides*	R	食虫	LC		5
516.栗头织叶莺 *Phyllergates cucullatus*	R	食虫	LC		12
517.鳞头树莺 *Urosphena squameiceps*	S、W、P	食虫	LC		22
518.强脚树莺 *Horornis fortipes*	R、P	食虫	LC		108
519.异色树莺 *Horornis flavolivaceus*	R、S	食虫	LC		1
520.远东树莺 *Horornis canturians*	S、W、P	食虫	LC		35
521.棕脸鹟莺 *Abroscopus albogularis*	R、S、	食虫	LC		96
六十九)太平鸟科 Bombycillidae					
522.太平鸟 *Bombycilla garrulus*	W、P	杂食	LC		87
523.小太平鸟 *Bombycilla japonica*	S、W、P	食果/食蜜	NT		99
七十)铁爪鹀科 Calcariidae					
524.铁爪鹀 *Calcarius lapponicus*	W、P	杂食	LC		3
七十一)王鹟科 Monarchidae					
525.黑枕王鹟 *Hypothymis azurea*	R、W、	食虫	LC		17
526.寿带 *Terpsiphone incei*	R、S、P	食虫	LC		45
527.中南寿带 *Terpsiphone affinis*	S	食虫	LC		1
528.紫寿带 *Terpsiphone atrocaudata*	S、P	食虫	NT		15
七十二)苇莺科 Acrocephalidae					
529.东方大苇莺 *Acrocephalus orientalis*	S、W、P	食虫	LC		56
530.黑眉苇莺 *Acrocephalus bistrigiceps*	S、W、P	食虫	LC		43
531.厚嘴苇莺 *Arundinax aedon*	S、P	食虫	LC		26
532.远东苇莺 *Acrocephalus tangorum*	S、W、P	食虫	VU		3
533.噪苇莺 *Acrocephalus stentoreus*	R	食虫	LC		2
七十三)文须雀科 Panuridae					
534.文须雀 *Panurus biarmicus*	S、W、P	食虫	LC		4
七十四)鹟科 Muscicapidae					
535.白顶鹏*Oenanthe pleschanka*	R	食虫	LC		2
536.白顶溪鸲 *Phoenicurus leucocephalus*	R、S、W	食虫	LC		18
537.白额燕尾 *Enicurus leschenaulti*	R	食虫	LC		2
538.白腹暗蓝鹟 *Cyanoptila cumatilis*	S、P	食虫	NT		3
539.白腹短翅鸲 *Luscinia phaenicuroides*	R、S、W、P	食虫	LC		2

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
540.白腹蓝鹟 *Cyanoptila cyanomelana*	S、W、P	食虫	LC		42
541.白喉短翅鸫 *Brachypteryx leucophris*	R	食虫	LC		7
542.白喉红尾鸲 *Phoenicurus schisticeps*	R	食虫	LC		3
543.白喉矶鸫 *Monticola gularis*	S、W、P	食虫	LC		10
544.白喉林鹟 *Cyornis brunneatus*	S、	食虫	VU	二级	4
545.白眉姬鹟 *Ficedula zanthopygia*	S、P	食虫	LC		59
546.白眉蓝姬鹟 *Ficedula superciliaris*	S、W、P	食虫	LC		1
547.白尾蓝地鸲 *Myiomela leucura*	R	食虫	LC		7
548.白腰鹊鸲 *Copsychus malabaricus*	R	食虫	LC		2
549.北红尾鸲 *Phoenicurus auroreus*	R、S、W、P	食虫	LC		478
550.北灰鹟 *Muscicapa dauurica*	S、W、P	食虫	LC		126
551.橙胸姬鹟 *Ficedula strophiata*	S、W、P	食虫	LC		4
552.纯蓝仙鹟 *Cyornis unicolor*	R、S	食虫	LC		2
553.东亚石鹏*Saxicola stejnegeri*	S、W、P	食虫	NR		90
554.海南蓝仙鹟 *Cyornis hainanus*	S、W、P	食虫	LC		16
555.贺兰山红尾鸲 *Phoenicurus alaschanicus*	S、W	食虫	NT	二级	1
556.褐胸鹟 *Muscicapa muttui*	S、P	食虫	LC		6
557.黑喉红尾鸲 *Phoenicurus hodgsoni*	S、W	杂食	LC		12
558.黑喉石鹏*Saxicola maurus*	R、S、P	食虫	LC		16
559.红背红尾鸲 *Phoenicurus erythronotus*	S	食虫	LC		2
560.红腹红尾鸲 *Phoenicurus erythrogastrus*	S、W、P	食虫	LC		1
561.红喉歌鸲 *Calliope calliope*	S、W、P	食虫	LC	二级	38
562.红喉姬鹟 *Ficedula albicilla*	W、P	食虫	LC		98
563.红尾歌鸲 *Larvivora sibilans*	R、S、P	食虫	LC		52
564.红尾水鸲 *Phoenicurus fuliginosus*	R	食虫	LC		77
565.红胁蓝尾鸲 *Tarsiger cyanurus*	S、W、P	食虫	LC		294
566.红胸姬鹟 *Ficedula parva*	W、P	食虫	LC		20
567.黄眉姬鹟 *Ficedula narcissina*	W、P	食虫	LC		22
568.灰背燕尾 *Enicurus schistaceus*	R	食虫	LC		1
569.灰蓝姬鹟 *Ficedula tricolor*	S、P	食虫	LC		1
570.灰林鹏*Saxicola ferreus*	R、S、P	食虫	LC		11

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
571.灰纹鹟 *Muscicapa griseisticta*	S、P	食虫	LC		59
572.金色林鸲 *Tarsiger chrysaeus*	R、S、W	食虫	LC		2
573.蓝额红尾鸲 *Phoenicurus frontalis*	R、	食虫	LC		17
574.蓝歌鸲 *Larvivora cyane*	S、W、P	食虫	LC		20
575.蓝喉歌鸲 *Luscinia svecica*	S、W、P	食虫	LC	二级	18
576.蓝喉仙鹟 *Cyornis rubeculoides*	S	食虫	LC		1
577.蓝矶鸫 *Monticola solitarius*	R、S、W、	杂食	LC		15
578.蓝眉林鸲 *Tarsiger rufilatus*	S、W、P	食虫	LC		3
579.栗腹矶鸫 *Monticola rufiventris*	R、P	食虫	LC		6
580.琉球姬鹟 *Ficedula owstoni*	W	食虫	LC		3
581.绿背姬鹟 *Ficedula elisae*	S、W、P	食虫	LC		5
582.欧亚鸲 *Erithacus rubecula*	R、W	杂食	LC		6
583.祁连山蓝尾鸲 *Tarsiger albocoeruleus*	S	食虫	LC		9
584.鸲姬鹟 *Ficedula mugimaki*	S、W、P	食虫	LC		58
585.鹊鸲 *Copsychus saularis*	R	食虫	LC		521
586.日本歌鸲 *Larvivora akahige*	W、P	杂食	LC		5
587.山蓝仙鹟 *Cyornis whitei*	S	食虫	LC		5
588.台湾紫啸鸫 *Myophonus insularis*	R	食虫	LC		1
589.铜蓝鹟 *Eumyias thalassinus*	S、W、P	食虫	LC		27
590.乌鹟 *Muscicapa sibirica*	S、W、P	食虫	LC		72
591.小斑姬鹟 *Ficedula westermanni*	S	食虫	LC		2
592.小仙鹟 *Niltava macgrigoriae*	R、S、W	食虫	LC		4
593.小燕尾 *Enicurus scouleri*	R	食虫	LC		1
594.新疆歌鸲 *Luscinia megarhynchos*	S	食虫	LC	二级	3
595.锈胸蓝姬鹟 *Ficedula erithacus*	S、	杂食	LC		4
596.赭红尾鸲 *Phoenicurus ochruros*	S、W、P	食虫	LC		7
597.中华仙鹟 *Cyornis glaucicomans*	S	食虫	LC		3
598.紫啸鸫 *Myophonus caeruleus*	R、S、W、P	食虫	LC		70
599.棕腹大仙鹟 *Niltava davidi*	S、W、	杂食	LC	二级	11
600.棕腹仙鹟 *Niltava sundara*	S、	食虫	LC		6
601.棕尾褐鹟 *Muscicapa ferruginea*	S、W、P	食虫	LC		9
602.棕胸蓝姬鹟 *Ficedula hyperythra*	R、S	食虫	LC		5

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
七十五)鹀科 Emberizidae					
603.白眉鹀 *Emberiza tristrami*	S、W、P	植食/种食	LC		69
604.白头鹀 *Emberiza leucocephalos*	S、W、P	植食/种食	LC		7
605.凤头鹀 *Emberiza lathami*	R、	植食/种食	LC		1
606.红颈苇鹀 *Emberiza yessoensis*	S、W、P	植食/种食	NT		10
607.黄喉鹀 *Emberiza elegans*	S、W、P	植食/种食	LC		107
608.黄眉鹀 *Emberiza chrysophrys*	W、P	植食/种食	LC		62
609.黄鹀 *Emberiza citrinella*	S、W、	植食/种食	LC		1
610.黄胸鹀 *Emberiza aureola*	S、W、P	植食/种食	CR	一级	13
611.灰眉岩鹀 *Emberiza godlewskii*	R、S、W	植食/种食	LC		3
612.灰头鹀 *Emberiza spodocephala*	S、W、P	食虫	LC		196
613.蓝鹀 *Emberiza siemsseni*	S、W、P	杂食	LC	二级	3
614.栗耳鹀 *Emberiza fucata*	R、S、W、P	植食/种食	LC		16
615.栗鹀 *Emberiza rutila*	S、W、P	食虫	LC		21
616.硫黄鹀 *Emberiza sulphurata*	W、P	植食/种食	LC		1
617.芦鹀 *Emberiza schoeniclus*	R、S、W	植食/种食	LC		5
618.日本灰头鹀 *Emberiza personata*	W、P	食虫	LC		5
619.三道眉草鹀 *Emberiza cioides*	R、S、W	植食/种食	LC		10
620.田鹀 *Emberiza rustica*	W、P	植食/种食	VU		44
621.苇鹀 *Emberiza pallasi*	S、W、P	植食/种食	LC		25
622.西南灰眉岩鹀 *Emberiza yunnanensis*	R	植食/种食	LC		4
623.小鹀 *Emberiza pusilla*	W、P	植食/种食	LC		127
七十六)绣眼鸟科 Zosteropidae					
624.暗绿绣眼鸟 *Zosterops simplex*	R、S、W、P	杂食	LC		391
625.白领凤鹛 *Parayuhina diademata*	R	食虫	LC		2
626.黑颏凤鹛 *Yuhina nigrimenta*	R	杂食	LC		13
627.红胁绣眼鸟 *Zosterops erythropleurus*	S、W、P	杂食	LC	二级	42
628.黄颈凤鹛 *Yuhina flavicollis*	R	杂食	LC		1
629.灰腹绣眼鸟 *Zosterops palpebrosus*	R、S、W	杂食	LC		22
630.栗颈凤鹛 *Staphida torqueola*	R	食虫	LC		22
631.日本绣眼鸟 *Zosterops japonicus*	W	食果/食蜜	LC		3
632.纹喉凤鹛 *Yuhina gularis*	R	植食/种食	LC		2

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
七十七)旋木雀科 Certhiidae					
633.高山旋木雀 *Certhia himalayana*	R	食虫	LC		3
634.霍氏旋木雀 *Certhia hodgsoni*	R	食虫	LC		2
635.欧亚旋木雀 *Certhia familiaris*	R	食虫	LC		49
636.四川旋木雀 *Certhia tianquanensis*	R	食虫	LC		1
七十八)鸦科 Corvidae					
637.白颈鸦 *Corvus torquatus*	R、	杂食	VU		21
638.达乌里寒鸦 *Coloeus dauuricus*	R、W	食虫	LC		25
639.大嘴乌鸦 *Corvus macrorhynchos*	R	杂食	LC		117
640.渡鸦 *Corvus corax*	R、S、W、P	肉食	LC		3
641.冠小嘴乌鸦 *Corvus cornix*	W	杂食	NR		1
642.红嘴蓝鹊 *Urocissa erythroryncha*	R	杂食	LC		229
643.红嘴山鸦 *Pyrrhocorax pyrrhocorax*	R	杂食	LC		7
644.灰树鹊 *Dendrocitta formosae*	R	杂食	LC		43
645.灰喜鹊 *Cyanopica cyanus*	R	食虫	LC		417
646.家鸦 *Corvus splendens*	R	肉食	LC		1
647.欧亚喜鹊 *Pica pica*	R	肉食	LC		28
648.青藏喜鹊 *Pica bottanensis*	R	食虫	LC		13
649.松鸦 *Garrulus glandarius*	R	杂食	LC		30
650.台湾蓝鹊 *Urocissa caerulea*	R	杂食	LC		1
651.秃鼻乌鸦 *Corvus frugilegus*	R、W、P	杂食	LC		27
652.喜鹊 *Pica serica*	R	食虫	LC		560
653.小嘴乌鸦 *Corvus corone*	R、W、P	肉食	LC		89
654.星鸦 *Nucifraga caryocatactes*	R、W、P	植食/种食	LC		3
七十九)鸦雀科 Paradoxornithidae					
655.白眉雀鹛 *Fulvetta vinipectus*	R	食虫	LC		1
656.短尾鸦雀 *Neosuthora davidiana*	R	杂食	LC	二级	2
657.红嘴鸦雀 *Conostoma aemodium*	R	植食/种食	LC		1
658.灰喉鸦雀 *Sinosuthora alphonsiana*	R	食虫	LC		20
659.灰头鸦雀 *Psittiparus gularis*	R	植食/种食	LC		11
660.金胸雀鹛 *Lioparus chrysotis*	R	杂食	LC	二级	1
661.山鹛 *Rhopophilus pekinensis*	R	食虫	LC		5

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
662.震旦鸦雀 *Calamornis heudei*	R	食虫	NT	二级	14
663.棕头雀鹛 *Fulvetta ruficapilla*	R	食虫	LC		4
664.棕头鸦雀 *Sinosuthora webbiana*	R	植食/种食	LC		307
八十)岩鹨科 Prunellidae					
665.褐岩鹨 *Prunella fulvescens*	R、S、W	食虫	LC		4
666.黑喉岩鹨 *Prunella atrogularis*	R、S	食虫	LC		2
667.栗背岩鹨 *Prunella immaculata*	R	杂食	LC		2
668.领岩鹨 *Prunella collaris*	R	食虫	LC		1
669.鸲岩鹨 *Prunella rubeculoides*	R	杂食	LC		1
670.棕眉山岩鹨 *Prunella montanella*	W、P	食虫	LC		14
671.棕胸岩鹨 *Prunella strophiata*	R	食虫	LC		3
八十一)燕鹀科 Artamidae					
672.灰燕鹀 *Artamus fuscus*	R	食虫	LC		4
八十二)燕科 Hirundinidae					
673.斑腰燕 *Cecropis striolata*	R、S、P	食虫	NR		1
674.淡色崖沙燕 *Riparia diluta*	R、S、W	食虫	LC		18
675.家燕 *Hirundo rustica*	R、S、W、P	食虫	LC		300
676.金腰燕 *Cecropis daurica*	R、S、W、P	食虫	LC		112
677.毛脚燕 *Delichon urbicum*	S、P	食虫	LC		2
678.崖沙燕 *Riparia riparia*	S、P	食虫	LC		18
679.烟腹毛脚燕 *Delichon dasypus*	R、S、W、P	食虫	LC		3
680.岩燕 *Ptyonoprogne rupestris*	R、S、P	食虫	LC		4
681.洋燕 *Hirundo tahitica*	R、S	食虫	LC		2
八十三)燕雀科 Fringillidae					
682.白斑翅拟蜡嘴雀 *Mycerobas carnipes*	R	食果/食蜜	LC		1
683.白翅交嘴雀 *Loxia leucoptera*	S、W、P	植食/种食	LC		5
684.白腰朱顶雀 *Acanthis flammea*	W、	植食/种食	LC		11
685.北朱雀 *Carpodacus roseus*	W	植食/种食	LC	二级	23
686. 苍头燕雀 *Fri* 687. *ngilla coelebs*	S、W、P	食虫	LC		8
687.大朱雀 *Carpodacus rubicilla*	R	植食/种食	LC		1
688.黑头金翅雀 *Chloris ambigua*	R	植食/种食	LC		11

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
689.黑头蜡嘴雀 *Eophona personata*	R	杂食	LC		65
690.黑尾蜡嘴雀 *Eophona migratoria*	S、W、P	杂食	LC		461
691.红腹灰雀 *Pyrrhula pyrrhula*	S、W、P	植食/种食	LC		11
692.红交嘴雀 *Loxia curvirostra*	R、W、P	植食/种食	LC	二级	25
693.红腰朱雀 *Carpodacus rhodochlamys*	R	植食/种食	LC		2
694.黄颈拟蜡嘴雀 *Mycerobas affinis*	R	植食/种食	LC		1
695.黄雀 *Spinus spinus*	R、S、W、P	植食/种食	LC		123
696.黄嘴朱顶雀 *Linaria flavirostris*	R	植食/种食	LC		2
697.灰头灰雀 *Pyrrhula erythaca*	R	植食/种食	LC		1
698.极北朱顶雀 *Acanthis hornemanni*	W、P	植食/种食	NR		1
699.金翅雀 *Chloris sinica*	R、W、P	植食/种食	LC		400
700.金额丝雀 *Serinus pusillus*	R	植食/种食	LC		1
701.酒红朱雀 *Carpodacus vinaceus*	R	植食/种食	LC		1
702.巨嘴沙雀 *Rhodospiza obsoleta*	R	植食/种食	LC		1
703.拟大朱雀 *Carpodacus rubicilloides*	R、W	植食/种食	LC		1
704.欧金翅雀 *Chloris chloris*	R	植食/种食	LC		5
705.普通朱雀 *Carpodacus erythrinus*	S、W、P	植食/种食	LC		31
706.曙红朱雀 *Carpodacus waltoni*	R	植食/种食	LC		1
707.松雀 *Pinicola enucleator*	S、W、P	植食/种食	LC		4
708.锡嘴雀 *Coccothraustes coccothraustes*	R、W、P	植食/种食	LC		133
709.燕雀 *Fringilla montifringilla*	S、W、P	杂食	LC		249
710.长尾雀 *Carpodacus sibiricus*	S、W、P	植食/种食	LC	二级	6
711.中华长尾雀 *Carpodacus lepidus*	R	食虫	NR		1
712.中华朱雀 *Carpodacus davidianus*	R	植食/种食	NR		1
八十四)叶鹎科 Chloropseidae					
713.橙腹叶鹎 *Chloropsis lazulina*	R	食果/食蜜	LC		20
714.金额叶鹎 *Chloropsis aurifrons*	R	食果/食蜜	LC		2
715.西南橙腹叶鹎 *Chloropsis hardwickii*	R	食果/食蜜	LC		1
八十五)莺鹛科 Sylviidae					
716.白喉林莺 *Curruca curruca*	P	食虫	LC		2
717.横斑林莺 *Curruca nisoria*	S	食虫	LC		2
八十六)莺雀科 Vireonidae					

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
718.白腹凤鹛 *Erpornis zantholeuca*	R	食虫	LC		13
719.红翅鹎鹛 *Pteruthius aeralatus*	R	食虫	LC		1
八十七)幽鹛科 Pellorneidae					
720.褐顶雀鹛 *Schoeniparus brunneus*	R	食虫	LC		1
721.褐胁雀鹛 *Schoeniparus dubius*	R	食虫	LC		5
八十八)玉鹟科 Stenostiridae					
722.方尾鹟 *Culicicapa ceylonensis*	R、S、W、P	食虫	LC		28
723.黄腹扇尾鹟 *Chelidorhynx hypoxanthus*	R	食虫	LC		1
八十九)噪鹛科 Leiothrichidae					
724.白喉噪鹛 *Pterorhinus albogularis*	R	食虫	LC		3
725.白颊噪鹛 *Pterorhinus sannio*	R	食虫	LC		222
726.橙翅噪鹛 *Trochalopteron elliotii*	R	食虫	LC	二级	3
727.大草鹛 *Pterorhinus waddelli*	R	杂食	NT	二级	2
728.海南画眉 *Garrulax canorus owstoni*	R	食虫	LC		5
729.黑喉噪鹛 *Pterorhinus chinensis*	R	食虫	LC	二级	18
730.黑脸噪鹛 *Pterorhinus perspicillatus*	R	食虫	LC		233
731.黑领噪鹛 *Pterorhinus pectoralis*	R	食虫	LC		30
732.黑头奇鹛 *Heterophasia desgodinsi*	R	食虫	LC		4
733.红翅噪鹛 *Garrulax formosus*	R	食虫	LC		1
734.红嘴相思鸟 *Leiothrix lutea*	R	食虫	LC	二级	36
735.画眉 *Garrulax canorus*	R	食虫	LC	二级	111
736.灰腹噪鹛 *Trochalopteron henrici*	R	食果/食蜜	LC		2
737.火尾希鹛 *Minla ignotincta*	R	食虫	LC		1
738.蓝翅希鹛 *Actinodura cyanouroptera*	R	杂食	LC		24
739.矛纹草鹛 *Pterorhinus lanceolatus*	R	杂食	LC		1
740.山噪鹛 *Pterorhinus davidi*	R	食虫	LC		22
741.小黑领噪鹛 *Garrulax monileger*	R	杂食	LC		6
742.银耳相思鸟 *Leiothrix argentauris*	R	食虫	LC	二级	4
743.棕噪鹛 *Pterorhinus berthemyi*	R	植食/种食	LC	二级	2
九十)长尾山雀科 Aegithalidae					
744.北长尾山雀 *Aegithalos caudatus*	R、W	食虫	LC		79
745.红头长尾山雀 *Aegithalos concinnus*	R	食虫	LC		331

物种 Species	居留型 Resident type	食性 Feeding habits	IUCN 红色名录 The IUCN Red list	保护等级 Protection level	发现公园数 Number of observations
746.花彩雀莺 *Leptopoecile sophiae*	R、S	食虫	LC		2
747.银喉长尾山雀 *Aegithalos glaucogularis*	R	食虫	LC		251
748.银脸长尾山雀 *Aegithalos fuliginosus*	R	杂食	LC		1
九十一)啄花鸟科 Dicaeidae					
749.纯色啄花鸟 *Dicaeum minullum*	R	食果/食蜜	LC		11
750.红胸啄花鸟 *Dicaeum ignipectus*	R	食果/食蜜	LC		49
751.朱背啄花鸟 *Dicaeum cruentatum*	R	食果/食蜜	LC		24

注：居留型分类：R留鸟、S夏候鸟、W冬候鸟、P旅鸟；在食性中，植食/种食鸟类(食物组成中非生殖植物材料和种子占比大于或等60%)；食虫鸟类(食物组成中昆虫占比大于或等于60%)；肉食鸟类(食物组成中哺乳动物、鸟类、爬行类、两栖类和鱼类等脊椎动物及其尸体总占比大于或等于60%)；食果/食蜜鸟类(食物组成中果实和花蜜占比大于或等于60%)；杂食鸟类(非单一食物组成且各食物类型占比均低于60%)；在IUCN红色名录及保护等级中，LC表示无危；NT表示近危；VU表示易危；EN表示濒危；CR表示极危NR；表示未认可；一级表示国家一级重点保护野生动物；二级表示国家二级重点保护野生动物。

周楠, 黄美玲, 谭筱彩, 刘骏杰, 文可, 蒋爱伍 (2026) 基于公民科学数据的全国地级以上城市公园鸟类群落特征及环境影响因子. 生物多样性, 34, 25347. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025347

II. 中国城市公园鸟类物种多样性

II. Bird Species Richness in Urban Parks of China

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
北京	北京	朝阳体育中心	14	55
北京	北京	玉渊潭公园	139	146
北京	北京	朝阳区兴隆公园	61	9
北京	北京	朝阳公园	79	122
北京	北京	奥林匹克森林公园	235	546
北京	北京	团结湖公园	11	7
北京	北京	环球度假区	54	54
北京	北京	天坛公园	156	568
北京	北京	龙潭西湖公园	45	78
北京	北京	东城区北海公园	59	120
北京	北京	朝阳区望和公园	37	5
北京	北京	高碑店兴隆郊野公园	37	6
北京	北京	昌平区未来科学城滨水公园	49	4
北京	北京	老山城市休闲公园	50	24
北京	北京	定慧公园	20	5
北京	北京	动物园	76	113
北京	北京	元大都城垣遗址公园	44	16
北京	北京	念坛公园	67	27
北京	北京	龙潭公园	38	14
北京	北京	颐和园	144	491
北京	北京	将府公园	53	31
北京	北京	北京莲花池公园	52	28
北京	北京	圆明园遗址公园	194	612
北京	北京	怀柔城市森林公园	22	5
北京	北京	南海子公园	186	287
北京	北京	延庆区香水苑公园	16	3
北京	北京	陶然亭公园	51	39
北京	北京	东城区地坛公园	24	2
北京	北京	柳荫公园	57	42
北京	北京	故宫	28	23
北京	北京	八家郊野公园	36	24
北京	北京	官庄公园	95	123
北京	北京	通明湖公园	96	60
北京	北京	五福堂公园	14	2
北京	北京	清源公园	15	3
北京	北京	东埠头沟公园	22	1
北京	北京	中关村森林公园	43	20
北京	北京	海淀公园	60	72
北京	北京	旺景公园	26	3
北京	北京	国际雕塑公园	18	8
北京	北京	紫竹院公园	37	12
北京	北京	中山公园	27	5

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
北京	北京	宣武艺园	30	36
北京	北京	太阳宫公园	32	8
北京	北京	东单公园	16	1
北京	北京	中关村公园	21	15
北京	北京	四得公园	12	3
北京	北京	大望京公园	30	8
北京	北京	大观园	30	5
北京	北京	回龙观体育文化公园	16	8
北京	北京	教学植物园	24	1
北京	北京	青年湖公园	15	2
北京	北京	通州区减河公园	22	3
北京	北京	顺义区减河公园	18	3
北京	北京	朝阳区红领巾公园	75	66
北京	北京	庆丰公园	29	3
北京	北京	中坞公园	32	4
北京	北京	景藏健康公园	29	3
北京	北京	经仪公园	30	10
北京	北京	五里桥公园	30	5
北京	北京	日坛公园	33	18
北京	北京	万丰公园	63	40
北京	北京	北坞公园	38	8
北京	北京	景山公园	38	24
北京	北京	古塔公园	38	8
上海	上海	大宁公园	95	90
上海	上海	清涧公园	40	124
上海	上海	世纪公园	192	200
上海	上海	金海湿地公园	122	145
上海	上海	鲁迅公园	27	7
上海	上海	后滩公园	75	68
上海	上海	植物园	123	310
上海	上海	杨浦公园	34	17
上海	上海	涟动公园	35	2
上海	上海	世博文化公园	38	6
上海	上海	康健园	32	10
上海	上海	滨江公园	34	12
上海	上海	吴淞炮台湾湿地森林公园	113	65
上海	上海	华翔绿地公园	31	3
上海	上海	共青森林公园	78	76
上海	上海	金枫公园	10	2
上海	上海	长风公园	55	38
上海	上海	柳园公园	44	90
上海	上海	梦清园	69	160
上海	上海	静安雕塑公园	20	10
上海	上海	甘泉公园	9	1

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
上海	上海	闵行体育公园	84	82
上海	上海	汽车博览公园	23	22
上海	上海	闵行文化公园	43	48
上海	上海	动物园	68	38
上海	上海	康桥生态园	41	4
上海	上海	黎安公园	16	1
上海	上海	五龙湖公园	14	2
上海	上海	南汇新城城市公园	76	27
上海	上海	甘泉公园	9	1
上海	上海	黄兴公园	28	5
上海	上海	吴泾公园	13	1
上海	上海	前滩休闲公园	33	6
上海	上海	黄浦区人民公园	20	6
上海	上海	南园滨江绿地	24	8
上海	上海	九科绿洲公园	41	8
上海	上海	丰翔智秀公园	46	5
上海	上海	顾村公园	88	46
上海	上海	第一湾公园	50	15
上海	上海	如心公园	28	4
上海	上海	大宁灵石公园	35	13
上海	上海	莘庄梅园	39	10
上海	上海	天马山公园	37	4
上海	上海	和平公园	26	12
上海	上海	滴翠园	25	2
上海	上海	绥德公园	37	4
上海	上海	上海交通大学-植物园	57	42
上海	上海	锦绣文化公园	47	12
上海	上海	滨江森林公园	143	166
上海	上海	豆香园	18	4
上海	上海	后滩湿地公园	95	98
上海	上海	徐家汇公园	12	2
上海	上海	古华园	19	1
上海	上海	新虹桥中心花园	45	8
上海	上海	汇龙潭公园	10	1
上海	上海	桂林公园	14	2
上海	上海	佘山国家森林公园	68	38
上海	上海	星空之境海绵公园	33	3
上海	上海	滴水湖观海公园	101	7
上海	上海	春花秋色公园	45	12
上海	上海	锦尊公园	13	1
上海	上海	金桥公园	18	2
上海	上海	碧云绿地盈动公园	16	1
上海	上海	南汇嘴观海公园	241	76

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
上海	上海	听翠园	48	16
上海	上海	苏州河梦清园环保主题公园	57	27
上海	上海	白沙公园	26	3
上海	上海	世博公园	46	20
上海	上海	辰山植物园	90	45
上海	上海	亭林公园	23	4
上海	上海	漕溪公园	10	1
上海	上海	静安公园	14	6
上海	上海	半马苏河公园	30	6
上海	上海	鹏海绿地公园	21	3
上海	上海	泗塘公园	10	3
上海	上海	北蔡消防主题公园	35	5
上海	上海	华夏公园	11	1
上海	上海	四川北路公园	13	4
上海	上海	爱普香料植物园	11	3
广东	广州	华南国家植物园	46	28
广东	广州	广州动物园	43	10
广东	广州	长隆野生动物世界	33	5
广东	广州	花都湖公园	37	7
广东	广州	流花湖公园	101	160
广东	广州	盈翠公园	32	2
广东	广州	麓湖公园	110	110
广东	广州	天河公园	45	20
广东	广州	东山湖公园	41	37
广东	广州	海珠湖公园	69	38
广东	广州	广州雕塑公园	48	7
广东	广州	广州黄埔公园	8	1
广东	广州	广州越秀公园	118	136
广东	广州	荔湾湖公园	20	5
广东	广州	晓港公园	46	36
广东	广州	广州东风花园	17	2
广东	广州	广州白云湖公园	18	2
广东	广州	萝岗香雪公园	23	7
广东	广州	广州上涌果树公园	35	3
广东	广州	广州蕉门公园	37	48
广东	广州	广州市儿童公园	21	4
广东	广州	广州创新公园	11	1
广东	广州	黄花岗公园	15	3
广东	广州	珠江公园	42	46
广东	广州	长隆飞鸟乐园	10	2
广东	广州	广州市青年公园	12	4
广东	广州	广州中心湖公园	22	3
广东	广州	新塘公园	14	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
广东	广州	沙面公园	9	2
广东	广州	番禺儿童公园	20	3
广东	广州	广州人民公园	20	16
广东	深圳	深圳湾公园	218	591
广东	深圳	深圳人才公园	146	85
广东	深圳	深圳人民公园	46	12
广东	深圳	深圳洪湖公园	89	149
广东	深圳	香蜜公园	47	28
广东	深圳	笔架山公园	109	114
广东	深圳	深圳荔香公园	11	1
广东	深圳	深圳莲花山公园	100	108
广东	深圳	深圳大沙河公园	54	12
广东	深圳	深圳海滨生态公园	121	116
广东	深圳	黄怀德公园	42	11
广东	深圳	深圳赤湾公园	17	3
广东	深圳	深圳西丽生态公园	33	4
广东	深圳	龙华绿廊公园	13	1
广东	深圳	深圳中山公园	77	56
广东	深圳	爱榕社区公园	16	2
广东	深圳	深圳大运公园	26	3
广东	深圳	深圳立新湖公园	35	6
广东	深圳	深圳皇岗公园	24	7
广东	深圳	深圳东湖公园	71	7
广东	深圳	深圳宝安公园	19	4
广东	深圳	深圳弯月山谷公园	22	1
广东	深圳	深圳中心公园	84	18
广东	深圳	深圳四海公园	41	5
广东	深圳	深圳红花岭公园	12	2
广东	深圳	深圳围岭公园	29	2
广东	深圳	深圳松坪山公园	21	3
广东	深圳	深圳桂湾公园	43	7
广东	深圳	深圳民法公园	15	3
广东	深圳	深圳平峦山公园	15	2
广东	深圳	深圳前海石公园	31	5
广东	深圳	深圳明湖城市公园	35	4
广东	深圳	智园翠谷公园	10	1
广东	深圳	麻岭和弦公园	14	6
广东	韶关	韶关杜鹃公园	13	2
广东	韶关	韶关黄岗山公园	8	1
广东	韶关	韶关沙湖公园	14	1
广东	韶关	韶关雄州公园	33	4
广东	珠海	珠海市白莲洞公园	42	7
广东	珠海	珠海中山公园	8	1

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
广东	珠海	珠海香山公园	32	8
广东	珠海	珠海香山湖公园	21	2
广东	珠海	珠海海天公园	25	5
广东	汕头	汕头南滨公园	9	1
广东	汕头	汕头中山公园	19	2
广东	汕头	汕头东海岸公园	24	4
广东	佛山	佛山植物园	45	5
广东	佛山	佛山君兰河堤公园	13	2
广东	佛山	佛山顺峰山公园	56	14
广东	佛山	德胜河滨公园	9	1
广东	佛山	佛山亚洲艺术公园	26	7
广东	佛山	佛山三字经文化公园	38	7
广东	佛山	佛山文翰湖公园	14	2
广东	佛山	佛山西南公园	8	1
广东	佛山	佛山文华公园	23	3
广东	佛山	佛山青年公园	17	5
广东	佛山	佛山新城公园	22	2
广东	江门	周郡码头纪念公园	13	4
广东	江门	江门市潮头中央公园	43	10
广东	湛江	湛江市渔港公园	16	4
广东	湛江	湛江市寸金桥公园	47	14
广东	湛江	湛江市瑞云湖公园	9	4
广东	茂名	茂名市春苑公园	15	3
广东	肇庆	肇庆市波海公园	38	12
广东	肇庆	肇庆市牌坊公园	39	7
广东	惠州	惠州市滨海公园	8	1
广东	惠州	惠州植物园	25	5
广东	惠州	惠州半岛文化体育公园	32	4
广东	梅州	梅州市剑英公园	34	6
广东	阳江	阳江市漠阳湖公园	15	2
广东	阳江	阳江市江湾公园	23	2
广东	东莞	黄江人民公园	9	2
广东	东莞	东莞月荷湖公园	14	2
广东	东莞	东莞月湖公园	56	64
广东	东莞	东莞长安滨海公园	57	3
广东	东莞	东莞松山湖中心公园	35	2
广东	东莞	东莞铁路公园	11	2
广东	中山	中山人才公园	22	3
广东	中山	东明桥水生植物公园	11	1
广东	中山	中山岐江公园	12	2
广东	中山	中山香樟公园	52	2
广东	中山	中山紫马岭公园	15	2
广东	中山	中山逸仙湖公园	10	1

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
广东	潮州	潮州西湖公园	62	27
广东	潮州	潮州慧如公园	16	2
广西	南宁	南宁南湖公园	71	42
广西	南宁	南宁动物园	22	4
广西	南宁	南宁明月湖公园	33	6
广西	南宁	南宁石门公园	14	3
广西	南宁	青秀山风景区	125	24
广西	南宁	南宁江南公园	28	2
广西	南宁	南宁心圩江公园	29	6
广西	南宁	南宁凤岭儿童公园	45	18
广西	南宁	南宁市人民公园	22	8
广西	南宁	南宁市金花茶公园	10	3
广西	南宁	南宁市五象湖公园	29	4
广西	柳州	柳州雀儿山公园	19	2
广西	柳州	柳州龙潭公园	26	3
广西	柳州	柳州柳侯公园	16	3
广西	柳州	柳州河东公园	10	1
广西	柳州	柳州龙湖公园	34	5
广西	桂林	桂林市七星公园	14	2
广西	桂林	桂林园林植物园	14	4
广西	桂林	桂林訾洲公园	29	3
广西	梧州	梧州市玫瑰湖公园	38	3
广西	北海	海城中山公园	87	34
广西	北海	北海市花公园	18	3
广西	北海	北海市东郡足球公园	10	1
广西	百色	百色市半岛公园	21	2
广西	贺州	贺州市爱莲湖公园	50	10
广西	贺州	贺州市北堤公园	26	1
广西	崇左	崇左市金龙湖公园	16	3
福建	福州	福州市花海公园	118	138
福建	福州	福州市闽江公园	102	89
福建	福州	福山郊野公园	73	16
福建	福州	福州市高盖山公园	75	16
福建	福州	福州市金鸡山公园	112	69
福建	福州	牛岗山公园	17	2
福建	福州	福州西湖公园	59	23
福建	福州	福州温泉公园	26	6
福建	福州	福州东江滨公园	17	1
福建	福州	福州梅峰山地公园	33	3
福建	福州	福州斗顶公园	15	1
福建	福州	福州儿童公园	12	2
福建	福州	福州烟台山公园	29	4
福建	福州	福州左海公园	20	4

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
福建	福州	福州锦江园	48	4
福建	福州	福州江心公园	20	2
福建	福州	福州国光公园	32	3
福建	厦门	厦门植物园	142	42
福建	厦门	上李水库公园	52	26
福建	厦门	厦门忠仑公园	24	4
福建	厦门	厦门莲花公园	9	1
福建	厦门	集美市民公园	10	2
福建	厦门	狐尾山公园	88	38
福建	厦门	敬贤公园	43	41
福建	厦门	厦门中山华侨公园	22	3
福建	厦门	杏林湾绿道公园	16	2
福建	厦门	白鹭洲公园	48	17
福建	厦门	厦门瑞景公园	15	3
福建	厦门	五通灯塔公园	15	3
福建	厦门	马銮湾环湾带状公园	81	18
福建	厦门	厦门中山公园	24	7
福建	厦门	厦门海湾公园	38	6
福建	厦门	厦门金榜公园	20	14
福建	厦门	厦门仙岳公园	44	10
福建	厦门	厦门风景湖公园	38	7
福建	厦门	厦门鸿山公园	13	1
福建	厦门	厦门湖里公园	12	1
福建	莆田	莆田市绶溪公园	39	5
福建	三明	三明市龟山公园	41	6
福建	泉州	泉州市麒麟山公园	35	6
福建	泉州	泉州灵山公园	19	3
福建	泉州	泉州滨海公园	42	8
福建	泉州	泉州东湖公园	22	5
福建	泉州	泉州北江滨公园	35	6
福建	泉州	泉州丰泽桃花山公园	77	7
福建	泉州	泉州锦绣公园	18	3
福建	漳州	漳州市芝山公园	41	8
福建	漳州	漳州紫云植物园	76	24
福建	漳州	漳州西溪亲水公园	18	5
福建	漳州	龙文郊野公园	19	1
福建	漳州	漳州南湖生态公园	45	2
福建	漳州	漳州静湖公园	33	6
福建	漳州	漳州江滨公园	24	2
福建	南平	南平市水之厅公园	17	1
福建	南平	南平市九峰山公园	27	5
福建	龙岩	龙岩龙津湖公园	9	2
福建	龙岩	龙岩莲花山公园	10	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
福建	宁德	宁德市北岸公园	63	15
福建	宁德	宁德市富春公园	33	3
福建	宁德	宁德南岸公园	12	1
福建	宁德	宁德赤鉴湖公园	25	3
福建	宁德	宁德塔山公园	48	15
福建	宁德	宁德东湖大门山公园	14	2
海南	海口	海口市白沙门公园	119	98
海南	海口	海口金牛岭公园	53	20
海南	海口	海口人民公园	11	1
海南	三亚	三亚市白鹭公园	43	16
海南	三亚	鹿回头滨河公园	23	2
海南	三亚	三亚鹿回头风景区	75	62
海南	儋州	儋州市洋浦滨海公园	16	1
海南	琼海	琼海市万泉河公园	26	6
台湾	台北	关渡自然公园	10	1
台湾	台北	台北大安森林公园	20	3
台湾	台北	台北植物园	36	8
台湾	台中	台中都会公园	13	2
贵州	贵阳	贵州省植物园	18	2
贵州	贵阳	贵阳药用植物园	30	4
贵州	贵阳	贵阳花溪公园	40	8
贵州	贵阳	贵阳观山湖公园	69	32
贵州	贵阳	贵阳河滨公园	17	2
贵州	六盘水	六盘水麒麟公园	11	1
贵州	六盘水	六盘水东湖公园	22	1
贵州	遵义	遵义纪念公园	20	6
贵州	遵义	遵义市凤凰山公园	54	6
贵州	毕节	毕节市碧阳湖城市公园	53	8
贵州	南昌	南昌市人民公园	40	19
贵州	南昌	南昌动物园	24	2
贵州	南昌	艾溪湖湖滨公园	20	3
贵州	南昌	抚河公园	14	2
贵州	南昌	寰宇万象公园	35	5
贵州	南昌	鱼尾洲公园	31	6
贵州	南昌	八一公园	19	9
贵州	南昌	龙潭公园	22	6
贵州	南昌	礼步湖公园	14	2
贵州	南昌	南昌舰主题公园	15	2
贵州	南昌	赣江市民公园	20	2
贵州	南昌	南昌法治文化公园	23	6
江西	九江	九江市南山公园	34	1
江西	新余	抱石公园	29	6
江西	新余	新余市北湖公园	18	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
江西	赣州	赣州市八境公园	29	6
江西	赣州	赣州城市中央公园	56	36
江西	赣州	赣州市新世纪公园	25	3
江西	吉安	吉安市滨江内湖景观公园	12	1
江西	吉安	后河·梦回庐陵景区	13	1
江西	吉安	庐陵文化生态园	40	2
江西	宜春	宜春市春台公园	10	1
江西	上饶	上饶市龙潭湖公园	21	3
江西	上饶	上饶市紫阳公园	19	3
江西	上饶	上饶市陆羽公园	17	2
四川	成都	府南河活水公园	12	2
四川	成都	泥巴沱风景区	32	3
四川	成都	成都植物园	129	164
四川	成都	成都动物园	32	6
四川	成都	浣花溪公园	143	176
四川	成都	锦城公园	248	182
四川	成都	成都滨江公园	18	8
四川	成都	百工堰公园	52	17
四川	成都	成都天府艺术公园	41	48
四川	成都	锦城湖公园	42	10
四川	成都	沙河城市公园	16	4
四川	成都	成都凤凰山公园	84	86
四川	成都	成都市人民公园	19	9
四川	成都	百花潭公园	40	21
四川	成都	东安湖公园	36	7
四川	成都	驿马河公园	28	6
四川	成都	桂龙公园	44	2
四川	成都	成都望江楼公园	35	13
四川	成都	龙潭新区公园	11	1
四川	成都	新川之心中央公园	24	1
四川	成都	成都青龙湖公园	67	10
四川	成都	城东足球公园	12	1
四川	成都	金沙遗址博物馆公园	45	11
四川	成都	成都武侯祠公园	35	24
四川	成都	简阳鳌山公园	15	2
四川	成都	成都百花潭公园	40	18
四川	成都	成都交子公园	20	5
四川	成都	成都江滩公园	29	6
四川	成都	成都市东部副中心市政景观公园	14	1
四川	成都	源上湾公园	55	17
四川	成都	四川成都北湖公园	58	12
四川	成都	黄忠公园	17	3
四川	成都	沙河东篱翠湖公园	16	4

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
四川	成都	升仙湖公园	15	2
四川	成都	清水河清波公园	37	10
四川	成都	成都白河公园	40	11
四川	成都	成都南郊公园	14	3
四川	成都	成都诺贝尔公园	58	12
四川	成都	成都塔子山公园	42	15
四川	成都	成都南湖生态公园	41	9
四川	自贡	盐都植物园	25	4
四川	自贡	自贡龙湖公园	21	2
四川	自贡	釜溪公园	17	1
四川	攀枝花	攀枝花公园	37	40
四川	泸州	泸州市忠山公园	15	2
四川	德阳	德阳市东湖山公园	21	3
四川	德阳	德阳北公园	80	8
四川	绵阳	绵阳市富乐山公园	21	3
四川	绵阳	绵阳市西山公园	25	6
四川	绵阳	绵阳市人民公园	12	3
四川	绵阳	代家湾健康公园	17	1
四川	广元	广元市凤凰山公园	12	1
四川	遂宁	遂宁市莲里公园	29	1
云南	昆明	昆明市翠湖公园	80	60
云南	昆明	昆明植物园	147	86
云南	昆明	官渡区官渡森林公园	19	2
云南	昆明	昆明世界园艺博览园	86	16
云南	昆明	昆明大观公园（南园）	43	4
云南	昆明	昆明动物园	94	66
云南	昆明	昆明洛龙公园	18	3
云南	昆明	昆明七彩小游园	9	5
云南	昆明	昆明彩云公园	10	1
云南	昆明	春城公园	15	2
云南	昆明	昆明郑和公园	17	5
云南	昆明	海埂公园	63	25
云南	昆明	草海隧道公园	30	4
云南	昆明	昆明月牙潭公园	23	4
云南	曲靖	曲靖市寥廓公园	44	7
云南	曲靖	曲靖市西河公园	12	1
云南	玉溪	玉溪九龙池公园	13	2
云南	玉溪	聂耳公园	14	2
云南	昭通	昭通市省耕文化公园	47	14
云南	临沧	临沧市玉龙湖公园	43	5
浙江	杭州	杭州植物园	190	865
浙江	杭州	杭州动物园	20	5
浙江	杭州	杭州南湖公园	185	68

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
浙江	杭州	屏基山公园	27	4
浙江	杭州	同心文化公园	10	5
浙江	杭州	杭州孤山公园	71	25
浙江	杭州	杭州北干余暨公园	17	2
浙江	杭州	铜鉴湖公园	92	32
浙江	杭州	新安江江滨公园	10	1
浙江	杭州	五常北部园区公园	24	28
浙江	杭州	钱江世纪公园	12	2
浙江	杭州	余杭白鹭公园	22	5
浙江	杭州	杭州望湖公园	69	8
浙江	杭州	杭州城北体育公园	30	12
浙江	杭州	丁兰体育公园	11	1
浙江	杭州	六和文化公园	35	5
浙江	杭州	杭州茶语公园	36	11
浙江	杭州	美丽洲公园	22	2
浙江	杭州	杭州东湖公园	38	11
浙江	宁波	宁波植物园	31	5
浙江	宁波	宁波中兴樱花公园	11	1
浙江	宁波	宁波教场山公园	13	1
浙江	温州	温州市东运河公园	24	2
浙江	温州	温州市景山公园	51	21
浙江	温州	杨府山公园	34	7
浙江	温州	温州清和公园	41	8
浙江	温州	温州新月公园	16	1
浙江	嘉兴	嘉兴市东山公园	22	10
浙江	嘉兴	嘉兴植物园	62	19
浙江	嘉兴	嘉兴鹃湖公园	41	12
浙江	嘉兴	嘉兴汤山公园	137	62
浙江	嘉兴	凌公塘公园	25	6
浙江	嘉兴	嘉兴市滨海中央公园	29	4
浙江	嘉兴	嘉兴市范蠡湖公园	29	33
浙江	嘉兴	嘉兴市秀湖公园	12	1
浙江	湖州	湖州市江蒋漾公园	15	2
浙江	湖州	湖州市潜山公园	12	2
浙江	绍兴	绍兴市桥坂湖公园	16	3
浙江	绍兴	绍兴市府山公园	64	22
浙江	绍兴	书圣故里蕺山公园	16	1
浙江	金华	金华市燕尾洲公园	90	19
浙江	金华	金华市湖海塘公园	68	12
浙江	金华	金华市赤山公园	58	5
浙江	金华	金华市孝子祠公园	12	1
浙江	义乌	稠江公园	13	1
浙江	金华	金华市儿童公园	19	3

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
浙江	衢州	衢州市鹿鸣公园	74	12
浙江	衢州	衢州市双塔公园	32	2
浙江	衢州	衢州市须江公园	10	1
浙江	舟山	舟山市海滨公园	30	6
浙江	舟山	舟山市翁山公园	28	2
浙江	舟山	莲花洋公园	18	2
浙江	舟山	新城樱花公园	18	1
浙江	台州	台州九峰公园	28	2
浙江	台州	台州和合公园	28	6
浙江	台州	台州永宁公园	55	31
浙江	台州	台州五龙山公园	15	1
浙江	台州	台州湖心公园	15	2
浙江	台州	台州庆澜公园	44	3
浙江	台州	委羽山道文化公园	12	1
浙江	台州	台州东山公园	31	3
浙江	丽水	丽水市两湖公园	17	2
浙江	丽水	丽水市留槎洲公园	17	3
重庆	重庆	重庆市金海湾公园	90	20
重庆	重庆	重庆市同景公园	28	13
重庆	重庆	重庆市中央公园	34	12
重庆	重庆	重庆市鹅岭公园	26	9
重庆	重庆	重庆市南山公园	14	1
重庆	重庆	苦竹溪公园	16	2
重庆	重庆	清水溪健身公园	18	3
重庆	重庆	重庆玉马公园	16	2
重庆	重庆	重庆碧津公园	34	14
重庆	重庆	重庆果塘湖公园	15	2
重庆	重庆	重庆白云湖公园	15	3
重庆	重庆	重庆枇杷山公园	9	1
重庆	重庆	融侨公园	15	2
重庆	重庆	龙洲湾通江公园	27	4
重庆	重庆	跳墩河公园	9	1
重庆	重庆	江北嘴江滩公园	8	2
重庆	重庆	盘溪河滨公园	20	3
重庆	重庆	重庆海湾公园	90	22
重庆	重庆	重庆西山公园	11	2
重庆	重庆	大渡口公园	17	4
重庆	重庆	重庆沙坪公园	13	3
重庆	重庆	重庆北山公园	14	2
重庆	重庆	重庆中华美德公园	12	3
重庆	重庆	重庆市儿童公园	22	1
重庆	重庆	渝北·龙头寺公园	22	4
重庆	重庆	重庆秀湖公园	12	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
重庆	重庆	重庆宝圣湖公园	27	6
重庆	重庆	重庆论语公园	29	8
重庆	重庆	悦来会展公园	29	1
重庆	重庆	重庆动物园	23	8
重庆	重庆	重庆照母山植物园	79	20
新疆	乌鲁木齐	雅玛里克山森林公园	32	10
新疆	乌鲁木齐	乌鲁木齐植物园	30	17
新疆	乌鲁木齐	鲤鱼山公园	32	18
新疆	乌鲁木齐	水磨沟公园	31	14
新疆	乌鲁木齐	乌鲁木齐水上乐园	53	18
新疆	乌鲁木齐	红山公园	18	12
新疆	乌鲁木齐	俊发红光山植物园	20	2
新疆	昌吉	昌吉庭州生态绿谷	11	1
新疆	石河子	石河子西公园	30	22
新疆	喀什	喀什人民公园	21	6
西藏	拉萨	罗布林卡	73	53
西藏	拉萨	禄康公园	38	43
西藏	拉萨	布达拉宫	39	17
天津	天津	梅江公园	59	29
天津	天津	长虹生态园	42	54
天津	天津	水西公园	142	144
天津	天津	紫云公园	15	3
天津	天津	天津泰丰公园	21	3
天津	天津	南开区水上公园	100	164
天津	天津	南翠屏公园	72	149
天津	天津	天津人民公园	12	2
天津	天津	绿道公园 2 期	14	9
天津	天津	津南区海河故道公园东半环	45	33
天津	天津	天津市动物园	20	1
天津	天津	大港湿地公园	116	45
天津	天津	东堤公园	30	4
天津	天津	州河公园	20	3
天津	天津	西沽公园	22	4
陕西	西安	樊川公园	52	7
陕西	西安	灞河西岸滨河公园	60	11
陕西	西安	世博园金沙滩欢动世界	50	4
陕西	西安	昆明池·七夕公园	48	5
陕西	安康	汉江公园	42	6
陕西	咸阳	西北农林科技大学博览园	16	2
陕西	西安	大明宫国家遗址公园	44	11
陕西	西安	西安城市运动公园	45	8
陕西	西安	曲江池遗址公园	40	15
陕西	宝鸡	中华石鼓园景区	38	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
陕西	西安	丰庆公园	29	7
陕西	铜川	城市运动公园	17	3
陕西	西安	西安莲湖公园	12	3
陕西	榆林	河滨公园	38	8
陕西	咸阳	渭滨公园	11	1
陕西	西安	大唐芙蓉园	22	3
陕西	西安	兴庆宫公园	33	14
陕西	西安	西安浐灞桃花潭公园	47	14
陕西	西安	雁南公园	15	3
陕西	西安	兴庆公园	17	4
陕西	宝鸡	渭河公园	36	4
陕西	西安	文景山公园	15	1
陕西	西安	唐城墙遗址公园	11	10
陕西	西安	西安世博园	71	18
陕西	汉中	汉江湿地公园	76	5
陕西	西安	西安新纪元公园	13	2
陕西	汉中	天汉文化公园	62	4
陕西	西安	杜邑遗址公园	18	1
山西	太原	晋阳湖公园	34	2
山西	晋中	晋商公园	34	5
山西	太原	迎泽公园	22	7
山西	太原	晋祠公园	45	14
山西	临汾	侯马市市民公园	17	4
山西	晋中	晋中社火公园	18	3
山西	太原	汾河公园	34	12
山西	运城	禹都公园	48	44
山西	太原	太原植物园	16	2
山西	晋城	西秀园	15	1
山东	潍坊	虞舜公园	17	1
山东	东营	西湖湾公园	29	6
山东	东营	东营植物园	51	22
山东	青岛	青岛中山公园	63	19
山东	青岛	青岛植物园	57	13
山东	青岛	青岛海泊河公园	81	60
山东	青岛	青岛太平角公园	60	31
山东	枣庄	龙潭公园	44	13
山东	潍坊	潍坊市人民公园	48	6
山东	日照	日照植物园	70	36
山东	日照	银河公园	74	31
山东	济南	大明湖公园	53	35
山东	青岛	青岛雕塑园	43	15
山东	青岛	浮山森林公园	39	9
山东	日照	海曲公园	14	2

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
山东	潍坊	潍坊植物园	37	9
山东	青岛	如意湖公园	34	5
山东	威海	海上公园	21	2
山东	临沂	临沂园	29	1
山东	济南	安康槐公园	17	3
山东	日照	万平口海洋公园	56	7
东营	东营	东营植物园	51	22
东营	泰安	清音公园	36	4
东营	泰安	香湖公园	25	6
东营	东营	东营园博园	61	20
东营	济南	泉城公园	59	12
东营	济南	扁鹊文化主题公园	11	2
东营	济宁	邹城市铁山公园	24	4
东营	青岛	墨河公园	16	2
东营	淄博	淄博人民公园	16	1
东营	滨州	中海公园	59	15
东营	济南	舜奥山体公园	12	2
东营	滨州	蒲湖公园	21	3
东营	济南	彩虹湖公园	41	8
东营	青岛	胶州三里河公园	21	4
东营	济南	长清城市中央公园	38	6
东营	东营	东营港消防主题公园	22	1
东营	青岛	海军公园	12	1
东营	日照	香河公园	29	4
青海	西宁	西宁野生动物园	29	19
青海	西宁	西宁美丽园	34	8
青海	西宁	西宁植物园	34	14
青海	西宁	西宁南山公园	29	17
青海	玉树	玉树琼龙公园	24	14
宁夏	银川	金凤区德馨公园	13	2
宁夏	银川	银川凤凰公园	25	5
宁夏	银川	银川海宝公园	50	14
宁夏	银川	银川中山公园	19	4
宁夏	银川	毓秀公园	15	1
内蒙古	呼和浩特	呼和浩特树木园	27	11
内蒙古	赤峰	赤峰市松山区兴安南麓植物园	12	1
辽宁	大连	大连森林动物园	29	7
辽宁	沈阳	沈河区青年公园	14	3
辽宁	沈阳	蒲河国家湿地公园	87	10
辽宁	沈阳	皇姑区将军公园	26	30
辽宁	阜新	人民公园	30	14
辽宁	丹东	志愿军公园	23	3
辽宁	丹东	大连植物园	13	5
辽宁	大连	凌水湾公园	22	4

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
辽宁	沈阳	鲁迅儿童公园	11	2
辽宁	大连	旅顺植物园	19	2
辽宁	抚顺	月牙岛生态公园	34	3
辽宁	鞍山	鞍山孟泰公园	13	2
辽宁	沈阳	沈水湾公园	31	6
辽宁	大连	向应公园	11	2
辽宁	丹东	鸭绿江公园	32	6
辽宁	沈阳	北陵公园	47	14
辽宁	沈阳	东陵公园	75	29
辽宁	沈阳	龙潭荷花湖度假公园	21	3
辽宁	沈阳	万泉公园	30	25
辽宁	盘锦	辽河碑林公园	15	3
辽宁	丹东	丹东锦江山公园	43	25
辽宁	大连	黑石礁公园	18	9
辽宁	抚顺	劳动公园	56	30
辽宁	大连	大连老虎滩海洋公园	37	4
辽宁	葫芦岛	龙湾公园	21	2
辽宁	沈阳	莫子山公园	13	3
辽宁	丹东	鸭绿江文化风情园	16	1
辽宁	沈阳	科普公园	17	5
辽宁	沈阳	沈阳市南湖公园	11	1
辽宁	沈阳	奥林匹克公园	15	1
辽宁	大连	付家庄公园	17	1
辽宁	辽阳	天井公园	38	6
辽宁	沈阳	浑河晚渡公园	13	2
江苏	常州	红梅公园	74	125
江苏	无锡	锡惠公园	63	20
江苏	南京	南京奥林匹克体育中心	28	7
江苏	常州	春秋淹城遗址公园	57	6
江苏	苏州	沙湖生态公园	48	19
江苏	南京	滨河体育公园	59	39
江苏	无锡	金城湾公园	27	4
江苏	南京	清凉山公园	75	42
江苏	无锡	吟苑公园	16	4
江苏	南京	方山国家地质公园	17	2
江苏	南京	麒麟中央公园	33	3
江苏	无锡	太湖花卉园	28	7
江苏	南京	南京情侣园	23	5
江苏	苏州	苏州桐泾公园	30	10
江苏	苏州	恩顾山公园	41	15
江苏	苏州	运河公园	36	15
江苏	苏州	诺贝尔湖公园	13	2
江苏	南京	北极阁公园	41	18
江苏	苏州	留园	12	4

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
江苏	苏州	白塘生态植物园	58	21
江苏	盐城	盐渎公园	49	22
江苏	苏州	独墅湖公园	37	10
江苏	苏州	耦园	37	16
江苏	苏州	桂花公园	13	3
江苏	南京	乌龙潭公园	22	7
江苏	南京	河西城市生态公园	21	4
江苏	南京	羊山公园	60	26
江苏	南京	九华山公园	58	23
江苏	常州	新景运动公园	19	1
江苏	南京	南京绿博园	37	7
江苏	无锡	青枫公园	32	9
江苏	南京	古林公园	34	11
江苏	南京	石头城遗址公园	46	9
江苏	南京	钟山体育运动公园	15	3
江苏	南京	南京月牙湖公园	46	15
江苏	无锡	黄山湖公园	49	9
江苏	无锡	望江公园	30	7
江苏	苏州	拙政园	21	18
江苏	南京	建邺区滨河公园	67	27
江苏	苏州	大湾公园	24	3
江苏	南京	莫愁湖公园	55	24
江苏	徐州	云龙公园	34	10
江苏	南京	午朝门公园	14	3
江苏	徐州	快哉亭公园	15	5
江苏	苏州	亭林公园	36	8
江苏	苏州	白鹭园	54	18
江苏	苏州	白塘公园	50	18
江苏	南通	啬园	14	1
江苏	常州	东坡公园	66	60
江苏	南京	仙林湖公园	35	17
江苏	常州	段玉裁公园	28	5
江苏	南京	花神湖公园	28	7
江苏	南京	燕子矶滨江公园	17	4
江苏	扬州	普哈丁墓园	19	1
江苏	盐城	盐城人民公园	26	7
江苏	盐城	东方公园	26	14
江苏	苏州	张家港市滨江公园	68	10
江苏	淮安	阳光湖公园	25	2
江苏	盐城	世纪公园-平湖秋月	23	1
江苏	南京	下河街游园	16	2
江苏	南京	红山森林动物园	73	70
江苏	泰州	泰州人民公园	21	3

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
江苏	苏州	广济公园	10	2
江苏	南京	八字山公园	22	2
江苏	常州	椿桂园	21	5
江苏	淮安	楚秀园	20	2
吉林	长春	南溪湿地公园	97	11
吉林	吉林	龙潭山遗址公园	44	19
吉林	长春	长春公园	27	19
吉林	通化	玉皇山公园	15	2
吉林	长春	友谊公园	18	3
吉林	长春	西湖公园	34	7
吉林	长春	长春国际汽车公园	21	6
吉林	长春	南湖公园	110	44
吉林	珲春	龙源公园	30	5
吉林	长春	胜利公园	12	3
湖北	武汉	湖滨公园	22	2
湖北	武汉	青山公园	73	29
湖北	武汉	谭鑫培公园	15	1
湖北	武汉	武汉沙湖公园	127	109
湖北	武汉	北太子湖公园	48	6
湖北	武汉	中山公园	37	17
湖北	武汉	龟山公园	47	15
湖北	武汉	墨水湖公园	39	6
湖北	天门	陆羽公园	28	7
湖北	荆州	滨江公园	35	5
湖北	武汉	内沙湖公园	44	6
湖北	天门	天门市植物园	32	3
湖北	荆州	滨江公园	35	5
湖北	武汉	内沙湖公园	44	6
湖北	天门	天门市植物园	32	3
湖北	武汉	江夏中央大公园	25	2
湖北	武汉	汉口解放公园	34	8
湖北	武汉	紫阳公园	39	14
湖北	武汉	杨春湖公园	64	10
湖北	武汉	南岸嘴江滩公园	24	2
湖北	武汉	兰亭公园	71	21
湖北	宜昌	五柳公园	21	2
湖北	武汉	藏龙体育中心	61	11
湖北	荆州	明月公园	47	16
湖北	武汉	汉水公园	17	4
湖北	武汉	张毕湖公园	45	6
湖北	荆州	言程公园	10	1
湖北	荆州	中山公园	42	9
湖北	荆州	郢城文化园	45	7

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
湖北	宜昌	河心公园	10	2
湖北	武汉	武汉园博园	29	8
湖北	宜昌	葛洲坝公园	42	7
湖北	宜昌	东辰体育公园	19	2
湖北	武汉	武汉动物园	38	8
河北	邯郸	南湖湿地公园	33	3
河北	秦皇岛	秦皇植物园	137	65
河北	石家庄	翠屏湿地公园	43	7
河北	秦皇岛	山海关乐岛海洋公园	138	39
河北	廊坊	自然公园	26	7
河北	邢台	达活泉公园	23	3
河北	保定	保定植物园	21	2
河北	石家庄市	世纪公园	13	2
河北	石家庄市	河北省园博园	19	2
河北	邢台	七里河体育公园	25	3
河北	邯郸	南湖公园	21	2
河北	石家庄	希望绿洲公园	17	6
河北	沧州	枫林公园	13	1
河北	唐山	凤凰山公园	22	1
河北	邯郸	龙湖公园	45	3
河北	邯郸	滏阳公园	30	4
河北	张家口	宣化万柳公园	11	3
河北	秦皇岛	红飘带公园	35	6
河北	秦皇岛	鸽子窝公园	95	18
河北	唐山	曹雪芹公园	26	2
河北	秦皇岛	奥林匹克公园	12	1
河南	郑州	碧沙岗公园	54	48
河南	郑州	西流湖公园	154	203
河南	郑州	东风渠滨河公园	63	32
河南	郑州	郑州植物园	38	11
河南	郑州	郑州市人民公园	38	21
河南	郑州	紫荆山公园	35	15
河南	郑州	双河公园	25	2
河南	洛阳	洛阳隋唐遗址植物园	80	25
河南	郑州	苑陵故城遗址公园	15	1
河南	许昌	许昌中央公园	27	2
河南	驻马店	驻马店市人民公园	51	10
河南	洛阳	从政坊游园	18	3
河南	南阳	月季公园	23	5
河南	郑州	郑州之林-林秀园	20	2
河南	开封	铁塔公园	23	3
河南	濮阳	戚城公园	14	1
河南	南阳	梅城公园	14	1

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
河南	郑州	郑州龙湖公园	82	20
河南	开封	禹王台公园	28	5
河南	郑州	郑州雕塑公园	30	5
河南	郑州	蝶湖公园	21	2
河南	濮阳	新蕾公园	21	3
河南	郑州	莲花公园	12	2
河南	驻马店	南海公园	28	5
河南	郑州	高铁公园	17	1
河南	郑州	红白花公园	54	6
河南	开封	龙亭公园	56	28
河南	洛阳	伊水游园	38	2
安徽	黄山	戴震公园	25	5
安徽	合肥	南艳湖公园	68	44
安徽	合肥	合肥西扩公园	82	21
安徽	蚌埠	小黄山公园	13	1
安徽	合肥	蜀峰湾体育公园	51	15
安徽	合肥	望湖公园	26	4
安徽	合肥	匡河公园	19	6
安徽	芜湖	汀棠公园	12	2
安徽	合肥	逍遥津公园	14	2
甘肃	兰州	水车博览园	31	9
甘肃	兰州	小西湖	23	4
甘肃	兰州	金城公园	26	6
甘肃	兰州	五泉山公园	22	5
甘肃	兰州	兰山公园	41	7
甘肃	兰州	白塔山公园	33	10
甘肃	庆阳	西峰南湖公园	56	18
黑龙江	哈尔滨	群力丁香公园	30	26
黑龙江	哈尔滨	哈尔滨音乐公园	18	8
黑龙江	哈尔滨	斯大林公园	15	4
黑龙江	哈尔滨	道里区体育公园	51	9
黑龙江	哈尔滨	兆麟公园	14	4
湖南	长沙	湖南烈士公园	131	159
湖南	岳阳	岳阳楼区南湖公园	61	4
湖南	湘西	大坡气象科普公园	15	1
湖南	长沙	桃花岭公园	60	12
湖南	湘潭	碧泉湖公园	27	4
湖南	益阳	秀峰公园	40	12
湖南	湘潭	湖湘公园	38	6
湖南	长沙	湘江江滩公园	83	48
湖南	湘潭	仰天湖公园	40	3
湖南	岳阳	金鹗公园	43	7
湖南	长沙	橘子洲公园	40	10

省份 Province	城市 City	公园名称 Name of the park	物种数 Number of species	记录次数 Number of recordings
湖南	邵阳	城南公园	23	3
湖南	长沙	施家港水上公园	12	2
湖南	长沙	湖南省森林植物园	106	97
湖南	永州	朝阳岩公园	26	2
湖南	衡阳	酃湖公园	23	5
湖南	衡阳	平湖公园	67	18
湖南	长沙	九道湾社区公园	17	3
湖南	长沙	斑马湖公园	11	1
湖南	长沙	南郊公园	59	24
湖南	娄底	孙水公园	40	8
湖南	永州	永州白石山公园	13	2
湖南	长沙	沙湾公园	63	46
湖南	永州	潇湘公园	37	7
湖南	长沙	圭塘河生态公园	39	4
湖南	长沙	火车头文化公园	26	6
湖南	郴州	石榴湾生态公园	29	4
湖南	怀化	迎丰公园	31	6
湖南	衡阳	虎形山人防公园	19	6
湖南	长沙	月岛河畔社区公园	55	14
湖南	长沙	月湖公园	105	80
湖南	湘潭	木鱼湖公园	30	4
湖南	衡阳	南湖公园	46	7
湖南	长沙	西湖公园	81	65
湖南	湘潭	和平公园	23	2
湖南	株洲	石峰公园	37	7
湖南	长沙	海棠公园	27	4
湖南	长沙	尖山湖公园	29	3
湖南	长沙	长沙狮子山公园	28	3
湖南	郴州	王仙湖公园	20	2
香港	香港	维多利亚公园	15	4
香港	香港	屯门蝴蝶湾公园	15	1
香港	香港	香港九龙公园	33	12
香港	香港	沙田公园	18	3
香港	香港	石硖尾公园	10	1
香港	香港	香港公园	32	19
香港	香港	屯门公园	22	1
香港	香港	西贡海滨公园	30	8
香港	香港	香港动植物公园	15	4
香港	香港	柴湾公园	24	3
澳门	澳门	氹仔人工湿地公园	12	2

备注：省份包括自治区、直辖市、特别行政区

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 25394, pages 1–15
doi: 10.17520/biods.2025394
cstr: 32101.14.biods.2025394

•研究报告•

澜沧江下游干流鱼类群落结构特征及外来鱼类入侵风险评估

何天琪[1], 翟东东[1,2*], 蔡方陶[1], 王东[1], 陈元元[1,2], 刘红艳[1,2], 熊飞[1,2], 刘明典[3*], 段辛斌[3]

1. 江汉大学生命科学学院, 湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心, 武汉 430056; 2. 江汉大学, 持久性有毒污染物环境与健康危害湖北重点实验室, 武汉 430056; 3. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 武汉 430223

摘要: 澜沧江下游生境独特, 鱼类资源丰富, 受水电开发等人类活动影响, 干流鱼类群落结构正在发生显著变化, 特别是外来鱼类的侵入, 导致河流生态风险增加。本研究于2023–2024年对澜沧江下游干流不同江段(库区江段、坝下江段、自然江段)鱼类进行了季节性(枯水期、丰水期)调查采样, 分析了鱼类群落结构时空变化特征及外来鱼类种类、分布和入侵风险。结果表明, 在澜沧江下游干流共采集鱼类56种, 隶属于8目22科47属, 鲤形目占据主导地位。采集到澜沧江流域特有鱼类4种, 主要分布在坝下和自然江段; 外来鱼类25种, 主要分布在库区和坝下江段。相对重要性指数分析结果表明, 库区、坝下江段的鱼类优势种为鲿(*Hemiculter leucisculus*)、花身副丽鱼(*Parachromis managuensis*)、齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)及尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)等外来鱼类, 自然江段为长臀鮠(*Mystacoleucus marginatus*)、短吻鱼(*Sikukia gudgeri*)、云南吻孔鮈(*Poropuntius huangchuchieni*)等土著鱼类。非度量多维尺度分析结果表明, 澜沧江下游干流鱼类群落结构空间上差异显著, 主要是因为库区江段外来鱼类较多, 自然江段土著鱼类较多, 而季节上丰水期与枯水期差异较小。单独针对外来鱼类进行分析, 从渔获物数量来看, 鲿、花身副丽鱼、罗非鱼等为主要外来鱼类; 在空间分布上, 外来鱼类在澜沧江下游干流库区江段分布多, 自然江段分布少, 其种类与数量在渔获物中的占比沿河流纵向梯度递减。外来鱼类入侵风险评估结果表明, 齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、花身副丽鱼、下口鲇(*Hypostomus plecostomus*)、莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)、鲿等物种为该区域高入侵风险外来鱼类。综上, 水电开发在改变澜沧江下游干流鱼类群落结构的同时, 也为外来鱼类入侵创造了有利条件。建议采取差异化对策对该区域鱼类资源进行保护: 库区江段优先防控外来鱼类, 重点关注数量优势种及高入侵风险种; 自然江段则建立土著鱼类保护区, 维护土著鱼类生存与繁衍环境。

关键词: 澜沧江下游; 鱼类群落; 外来鱼类; 入侵风险评估

何天琪, 翟东东, 蔡方陶, 王东, 陈元元, 刘红艳, 熊飞, 刘明典, 段辛斌 (2026) 澜沧江下游干流鱼类群落结构特征及外来鱼类入侵风险评估. 生物多样性, 34, 25394. doi: 10.17520/biods.2025394; cstr: 32101.14.biods.2025394.
He TQ, Zhai DD, Cai FT, Wang D, Chen YY, Liu HY, Xiong F, Liu MD, Duan XB (2026) Characteristics of fish community structure in the lower mainstream of the Lancang River and risk assessment of alien fish invasion. Biodiversity Science, 34, 25394. doi: 10.17520/biods.2025394; cstr: 32101.14.biods.2025394.

Characteristics of fish community structure in the lower mainstream of the Lancang River and risk assessment of alien fish invasion

Tianqi He[1], Dongdong Zhai[1,2*], Fangtao Cai[1], Dong Wang[1], Yuanyuan Chen[1,2], Hongyan Liu[1,2], Fei Xiong[1,2], Mingdian Liu[3*], Xinbin Duan[3]

1 *Hubei Engineering Research Center for Protection and Utilization of Special Biological Resources in the Hanjiang River Basin, School of Life Sciences, Jianghan University, Wuhan 430056, China*
2 *Hubei Key Laboratory of Environmental and Health Effects of Persistent Toxic Substances, Jianghan University, Wuhan 430056, China*

收稿日期 Received: 2025-10-09; 接受日期 Accepted: 2026-01-12
基金项目: 农业农村部“西南地区重点水域渔业资源与环境调查专项”、中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09)和湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020034) Supported by the “Special Survey on Fishery Resources and Environment in Key Water Areas of Southwest China” of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09), and the Innovative Research Team Foundation of the Department of Education of Hubei Province, China (T2020034)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhaidongdong@jhun.edu.cn; liumd@yfi.ac.cn

3 *National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China*

ABSTRACT

Aims: The lower reaches of the Lancang River boast a unique habitat and abundant fish resources, making the conservation of its freshwater fish diversity a subject of great concern. Affected by human activities such as hydropower development, the fish community structure in the lower mainstream of Lancang River has been undergoing significant changes. In particular, the invasion of alien fish species has increased the ecological risks of the river.

Methods: From 2023 to 2024, seasonal (high-flow period and low-flow period) fish surveys and sampling were conducted in different reaches of the lower mainstream of Lancang River, including reservoir reaches, downstream reaches of dams, and natural reaches. The spatiotemporal variation characteristics of the fish community structure, as well as the species, distribution, and invasion risks of alien fish, were analyzed.

Results: A total of 56 fish species were collected in the lower mainstream of Lancang River, belonging to 8 orders, 22 families, and 47 genera, with Cypriniformes being the dominant order. Among the collected species, 4 are endemic to the Lancang River, mainly distributed in the downstream reaches of dams and natural reaches; 25 are alien species, predominantly found in reservoir reaches and downstream reaches of dams. Index of relative importance (IRI) analysis revealed that the dominant fish species in reservoir reaches and downstream reaches of dams are alien species such as *Hemiculter leucisculus*, *Parachromis managuensis*, *Coptodon zillii*, and *Oreochromis niloticus*, while the dominant species in natural reaches are native fishes including *Mystacoleucus marginatus*, *Sikukia gudgeri*, and *Poropuntius huangchuchieni*. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis revealed significant spatial differences in the fish community structure of the lower mainstream of Lancang River. This is mainly attributed to the higher abundance of alien fish in reservoir reaches and the dominance of native fish in natural reaches, while the seasonal differences between the high-flow period and low-flow period were relatively small. A separate analysis focusing on alien fishes indicated that in terms of catch quantity, *Hemiculter leucisculus*, *Parachromis managuensis*, *Coptodon zillii*, and *Oreochromis niloticus* were the main alien fish species. In terms of spatial distribution, alien fish in the lower mainstream of Lancang River were more abundant in reservoir reaches and less abundant in natural reaches. The proportion of their species and quantity in the catch showed a decreasing trend along the longitudinal gradient of the river. The risk assessment of alien fish demonstrated that species such as *Coptodon zillii*, *Oreochromis niloticus*, *Parachromis managuensis*, *Hypostomus plecostomus*, *Oreochromis mossambicus*, and *Hemiculter leucisculus* are high-risk invasive fish species in this region.

Conclusion: In conclusion, while hydropower development has altered the fish community structure in the lower mainstream of Lancang River, it has also created favorable conditions for the invasion of alien fish. To protect the fish resources in this region, differentiated strategies are proposed: priority should be given to the prevention and control of alien fish in reservoir reaches, with a focus on dominant species in terms of quantity and high-risk invasive species; in natural reaches, protected areas for native fish should be established to maintain the living and breeding environments of native fish species.

Key words: lower reaches of the Lancang River; fish community; alien fish; invasion risk assessment

澜沧江发源于青藏高原, 自北向南纵贯寒温带至北热带7个气候区, 流经中国青海、西藏、云南三省(区)后, 穿越缅甸、老挝、泰国等东南亚国家, 是连接中国与东南亚的国际性关键河流(何大明和汤奇成, 2000; 易佳伶等, 2024)。作为典型的跨境河流, 澜沧江不仅是东南亚各国间的重要纽带, 更因复杂水系与多样生境, 成为生物多样性高度丰富的关键生态功能区, 尤其下游区域孕育了极高的物种多样性与丰富的生物资源(付贵权等, 2021; 全东丽等, 2021; 朱挺兵等, 2022)。然而, 近几十年来, 澜沧江流域水电梯级开发叠加外来鱼类入侵现象加剧, 流域渔业资源出现显著衰退, 生物多样性保护面临的压力急剧攀升(付贵权等, 2021; Sun et al., 2023; 薛飞, 2025)。

大量实证研究表明水电开发会改变库区的鱼类群落结构(Habit et al., 2007; Macnaughton et al., 2017; Eloranta et al., 2018)。库区形成后, 一方面流速减缓可能会导致适应急流生境的土著鱼类种群衰退甚至局域灭绝, 另一方面也为静水或广布型外来物种的定殖与扩散提供了有利条件(Šmejkal et al., 2023)。方艳红等(2025)通过研究金沙江中游梯级水电站运行后鱼类多样性分布及资源变化, 发现与历史资料相比, 金沙江中游喜急流土著鱼类减少, 外来物种增加。吴凡等(2025)对三峡库区的调查亦揭

示类似规律: 蓄水后土著流水性鱼类占比减少, 外来鱼类在群落中的多度与生物量比例显著递增。上述研究均证实, 水电开发在改变鱼类群落结构的同时, 也通过生境改造一定程度上为外来鱼类入侵创造了有利条件, 形成“群落结构改变-入侵机会增加”的叠加效应。

澜沧江下游干流水电开发引发的鱼类群落结构变化及外来鱼类入侵问题备受关注。已有研究表明, 澜沧江下游水电开发显著改变了库区及干流的鱼类群落结构(雷春云, 2012[①]; Fan et al., 2015; 洪迎新等, 2021)。具体表现为两方面: 一是土著鱼类物种数量及喜急流鱼类的丰富度出现不同程度的大幅下降; 二是鱼类群落呈现由喜急流向喜静水演替的趋势。关于外来鱼类入侵状况也有相关研究。刘明典等(2021)于2019年在澜沧江下游干流普洱市思茅区调查到7种外来鱼类, 分别为鲤(*Cyprinus carpio*)、鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)、鲢(*H. molitrix*)、棒花鱼(*Abbottina rivularis*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、鲦(*Hemiculter leucisculus*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)等。付贵权等(2021)的研究发现, 澜沧江下游西双版纳段的外来鱼类种类数占比正在逐年增大。尽管上述研究已完成澜沧江下游干流鱼类群落结构与外来鱼类入侵的基础调查, 但对外来鱼类的系统性研究仍比较缺乏。已有研究多聚焦于外来鱼类的物种名录厘清与种类占比统计, 而针对外来鱼类的数量动态、时空分布格局及入侵风险量化评估等方面的研究仍较为薄弱, 难以支撑流域尺度外来鱼类防控策略的精准制定。

本研究于2023–2024年针对澜沧江下游干流不同江段(库区江段、坝下江段、自然江段), 开展了4次季节性(枯水期、丰水期)鱼类资源调查。基于调查获取的基础数据, 首先分析该区域鱼类群落结构的时空动态变化特征; 在此基础上, 重点围绕外来鱼类展开系统研究, 包括厘清外来鱼类的物种组成、了解其资源现状、解析其时空分布规律, 并量化其入侵风险; 最终结合水电开发对流域生境的改造效应, 探讨水电开发对鱼类群落结构的影响及其与外来鱼类入侵的关联性, 以期为澜沧江下游干流鱼类资源保护及外来鱼类入侵防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点设置

根据澜沧江流域水文与地貌特征, 一般将澜沧江划分为河源、上游、中游、下游四段: 河源段为青海源头至西藏昌都, 全长556 km; 上游段为西藏昌都至云南功果桥, 全长821 km; 中游段为功果桥以下至景云桥, 全长213 km; 下游段为景云桥至云南省勐腊县南腊河口, 全长495 km (何大明和汤奇成, 2000)。

澜沧江下游海拔自北向南从2,000 m骤降至500 m以下, 穿行于横断山纵谷区, 地形陡峭, 河谷深切(顾纯等, 2019)。气候属热带季风气候, 年均温18–22℃, 年降水量1,200–2,500 mm, 干湿季分明, 水源以季风降雨为主, 季节性水文节律为适应流水的土著鱼类提供了适配的繁殖、索饵与越冬条件(Tang et al., 2015; 黎清霞等, 2018)。该河段水能资源高度集中, 干流已建成糯扎渡、景洪两座大型水电站。糯扎渡水电站于2011年11月开始蓄水, 坝高261.5 m, 库容为237.03亿立方米, 是澜沧江流域最大的水电站。景洪水电站于2008年4月开始蓄水, 坝高108.0 m, 库容为11.40亿立方米。

本文在库区江段、坝下江段、自然江段设置采样点。(1)糯扎渡库区全长约216 km, 设3个采样点。库尾马台乡(MTX), 水流较库区主体快, 沙砾混合底质, 保留了一定的河流型生境; 库中澜沧江大桥G323 (DQ), 虽地理坐标偏向库尾, 但因临公路交通便利, 且江面开阔、水位较深、水流平缓, 为库区缓流生境, 可代表库中过渡区群落; 库首糯扎渡(NZD), 江面宽、水深、水流极缓、淤泥底质, 是静水鱼类主要栖息地。景洪库区全长约108 km, 在思茅港(SMG)设了1个采样点。该点位于库区中上游, 沙泥混合底质, 生境介于河流型与库区型之间, 可兼顾库区中上游群落调查。(2)坝下江段采样点设置在景洪市(JH), 该采样点受下泄流量影响, 水流波动大, 砾石岩石底质, 生境异质性较高。(3)自然江段采样点设置在南腊河口(NLH), 该采样点在两河交汇处, 水流极快、岩石底质, 为典型急流区, 人类活动少、原始状态好, 适合调查喜流水生活的土著鱼类(图1)。

① 雷春云 (2012) 澜沧江干流水电站建设对鱼类的影响及保护——以景洪水电站、小湾水电站、功果桥水电站为例. 硕士学位论文, 云南大学, 昆明.

1.2 鱼类采集

本研究分别于2023年丰水期(2023年7月3–23日)、2023年枯水期(2023年10月13–28日)、2024年丰水期(2024年5月18日至6月5日)、2024年枯水期(2024年10月31日至11月16日)进行了4次季节性采样。采样网具为2套复合刺网(1套沉网、1套浮网)和2个底置地笼。复合刺网由2 cm、6 cm、10 cm、14 cm网目的刺网拼接而成, 每个网目刺网长50 m, 高2 m, 每套复合刺网总长200 m。底置地笼网目为0.8 cm, 长宽高分别为18 m、0.45 m、0.33 m。采样期间每天下午6点下网, 次日早晨6点收网。每个样点每次采样均确保每种网具的放置位置覆盖到沿岸带以及敞水区。依据《云南鱼类志》(褚新洛和陈银瑞, 1989, 1990)、《云南鱼类名录》(陈小勇, 2013)对渔获物进行种类鉴定, 依据《中国淡水鱼类图鉴》(李帆, 2024)确定每种鱼类的分类地位, 并测量每一尾鱼的全长(精确到1.0 mm)、体长(精确到1.0 mm)、体重(精确到0.1 g)等参数。对于不确定的物种, 取其肌肉样品浸泡于95%酒精中, 带回实验室后, 通过对线粒体细胞色素*b* (*cytb*)基因进行测序, 并将测序结果与NCBI数据库中的序列进行比对, 以此完成物种鉴定。

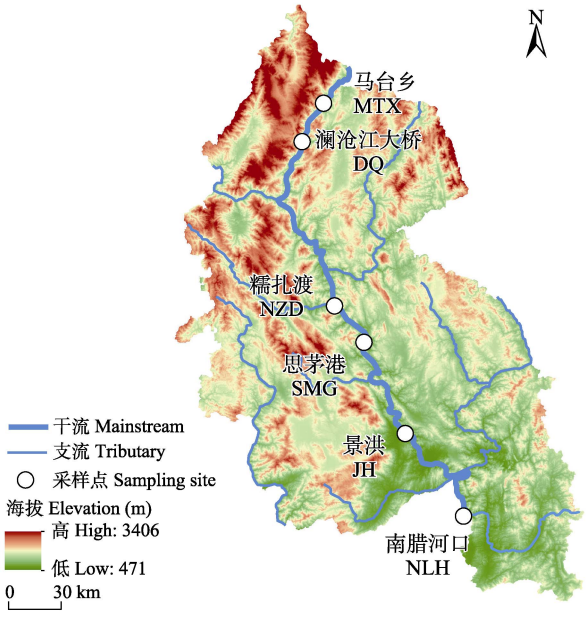


图1 澜沧江下游干流鱼类采样点分布图

Fig. 1 Map of fish sampling sites in the lower mainstream of the Lancang River. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary.

1.3 群落结构分析

采用相对重要性指数(index of relative importance, IRI)表示鱼类物种的优势度, 定义IRI > 1,000的物种为优势种(Pinkas et al., 1971)。计算公式如下:

$$IRI = 10000 \times (N + W) \times F \quad (1)$$

式中, N为某个物种的丰度占比, W为某个物种的重量占比, F为某个物种的出现率。当分析某一个样点的优势种时, F为某个物种在4次采样中的出现率。当分析枯水期或丰水期的优势种时, F为某个物种在6个样点中的出现率。

通过非度量多维尺度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析构建NMDS排序图, 了解群落结构的时空差异程度, 当胁迫系数(stress) < 0.2时, 说明排序合理(Kenkel & Orlóci, 1986)。使用成对置换多元方差分析(permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)判断各采样点群落结构是否存在显著性差异。基于各采样点鱼类种类和相对丰度, 计算各样点间的Bray-Curtis相异性指数。为探究鱼类群落空间分布与河道距离的关联性, 采用Mantel检验分析样点间鱼类群落的Bray-Curtis相异性指数与样点间河道距离之间的相关性。为深入探讨水电开发对澜沧江下游鱼类群落结构的影响, 需解析不同河段鱼类的生态适应特征。为此, 结合研究目标按以下维度划分鱼类生态类型, 并分析各江段不同类型鱼类的占比: 根据鱼卵物理特性, 分为漂流性卵、浮性卵、沉粘性卵; 根据鱼类生活水层, 分为中上层鱼类、中下层鱼类、底层鱼类; 根据鱼类对水体流动状态的适应偏好, 分为流水性鱼类、静水性鱼类、广适性鱼类(殷名称, 1995)。

1.4 外来鱼类入侵风险评估

依据相关研究及行业规范, 本研究的外来鱼类指在澜沧江下游原本无天然分布, 经自然或人为途径传入的鱼类物种。为确保物种“天然分布与否”判断的客观性与统一性, 本研究以《云南鱼类志》(褚新洛和陈银瑞, 1989, 1990)、《云南鱼类名录》(陈小勇, 2013)作为核心依据。若《云南鱼类志》《云南鱼类名录》中明确记载该物种在澜沧江下游存在历史分布记录, 则判定为土著鱼类, 否则为外来鱼类。

采用外来水生生物风险筛选工具(aquatic species invasiveness screening kit, AS-ISK)对澜沧江

下游外来鱼类开展入侵风险评估(Copp et al., 2016)。该工具基于结构化问卷构建, 共包含55个问题: 前49个问题构成基础风险评估模块(basic risk assessment, BRA), 系统评估物种的生物学、生态学与生物地理学特征; 后6个问题为气候变化评估模块(climate change assessment, CCA), 核心围绕评估区域未来的气候变动, 预判其对被评估生物入侵风险所具有的潜在影响。AS-ISK入侵风险评估结果包括基础风险得分(BRA)和综合得分(BRA + CCA)。按照AS-ISK的要求, 每个问题的回答结果还需进行置信级别(confidence level, CL)评估, 该评估共分为4个置信级别, 各级别与数值的对应关系为低 = 1、中 = 2、高 = 3、非常高 = 4。根据每个问题回答的置信级别计算置信因子(confidence factor, CF), 公式如下:

$$CF = \sum_{i=1}^{n} \frac{CL_{Qi}}{4n} \quad (2)$$

式中, CL_{Qi}代表第i个问题的置信级别, n为问题总数, 即为55或49。

根据FishBase数据库对外来鱼类的入侵先验性进行界定, 即划分为入侵种与非入侵种两大类别。以先验“入侵性/非入侵性”标签为因变量, BRA或BRA + CCA得分为自变量, 使用R软件计算并绘制受试者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC曲线), 并计算曲线下面积(area under curve, AUC), AUC值通常介于0.5–1.0之间, 越接近1.0表示模型判别力越强(Lora et al., 2016)。根据ROC曲线, 使用Youden (1950)的J统计确定风险阈值以区分中入侵风险物种与高入侵风险物种。最后依据以下标准将物种划分为3级风险: BRA或BRA + CCA得分 > 阈值为高入侵风险外来鱼类; 1 < BRA或BRA + CCA得分 ≤ 阈值为中入侵风险外来鱼类; BRA或BRA + CCA得分 ≤ 1为低入侵风险外来鱼类(Ruykys et al., 2021)。

1.5 数据和统计分析

鱼类丰度、优势度、生态类型占比、外来鱼类种类占比、外来鱼类数量占比等数据的统计以及显著性差异检验采用Excel 2019软件完成。NMDS、PERMANOVA通过Primer 6.0软件完成。Bray-Curtis相异性指数通过R软件计算, Mantel检验通过R软件完成。

2 结果

2.1 物种组成

本研究共采集了8,186尾鱼类, 分属8目22科47属56种。其中, 鲤形目包含6科27属31种, 种类数占比为55.36%, 丰度占比为65.14%, 均占据主导地位; 鲇形目包含7科9属11种, 种类数占比为19.64%, 丰度占比为3.30%; 丽鱼目包含1科2属4种, 种类数占比为7.14%, 丰度占比为25.36%。从科级水平而言, 鲤科鱼类种类数占比最高(32.14%), 其次为鲷科(12.50%)。丰度方面, 鲷科鱼类占比最高(42.10%), 其次为丽鱼科鱼类(25.36%)、鳞科鱼类(9.15%)和鲤科鱼类(8.45%) (图2)。其中, 采集到澜沧江流域特有鱼类4种, 主要分布在坝下和自然江段, 分别为中国结鱼(*Tor sinensis*)、宽头高鲮(*Altigena laticeps*)、尾斑安彦鳅(*Yasuhikotakia caudipunctata*)、斑尾角墨头鱼(*Ceratogarra fasciacauda*); 同时采集到外来鱼类25种, 主要分布在库区和坝下江段(附录1, 附录2)。

2.2 优势种

IRI指数结果显示, 澜沧江下游干流的优势种为鱎、花身副丽鱼(*Parachromis managuensis*)、齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)以及尼罗罗非鱼, 均为外来鱼类。从水文周期而言, 丰水期优势种为鱎、花身副丽鱼、齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼; 枯水期优势种为鱎、花身副丽鱼、尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、高体鳑鲏(*Rhodeus ocellatus*), 也均为外来鱼类。从空间上而言, 马台乡江段优势种为鱎、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、鲤; 澜沧江大桥江段优势种为鱎、花身副丽鱼、齐氏罗非鱼、鳙、红鳍原鲌(*Cultrichthys erythropterus*); 糯扎渡江段优势种为鱎、花身副丽鱼; 思茅港江段优势种为鱎、花身副丽鱼、齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、罗碧鱼(*Paralaubuca barroni*); 景洪江段优势种为高体鳑鲏、马口鱼(*Opsariichthys bidens*)、真吻虾虎鱼(*Rhinogobius similis*)、棒花鱼; 南腊河口江段优势种为长臀鮠(*Mystacoleucus marginatus*)、短吻鱼(*Sikukia gudgeri*)、云南吻孔鮠(*Poropuntius huangchuchieni*)、中华鲱鲇(*Clupisoma sinense*)。除了南腊河口江段的优势种是土著鱼类, 其他江段的优势种基本都为外来鱼类(表1)。

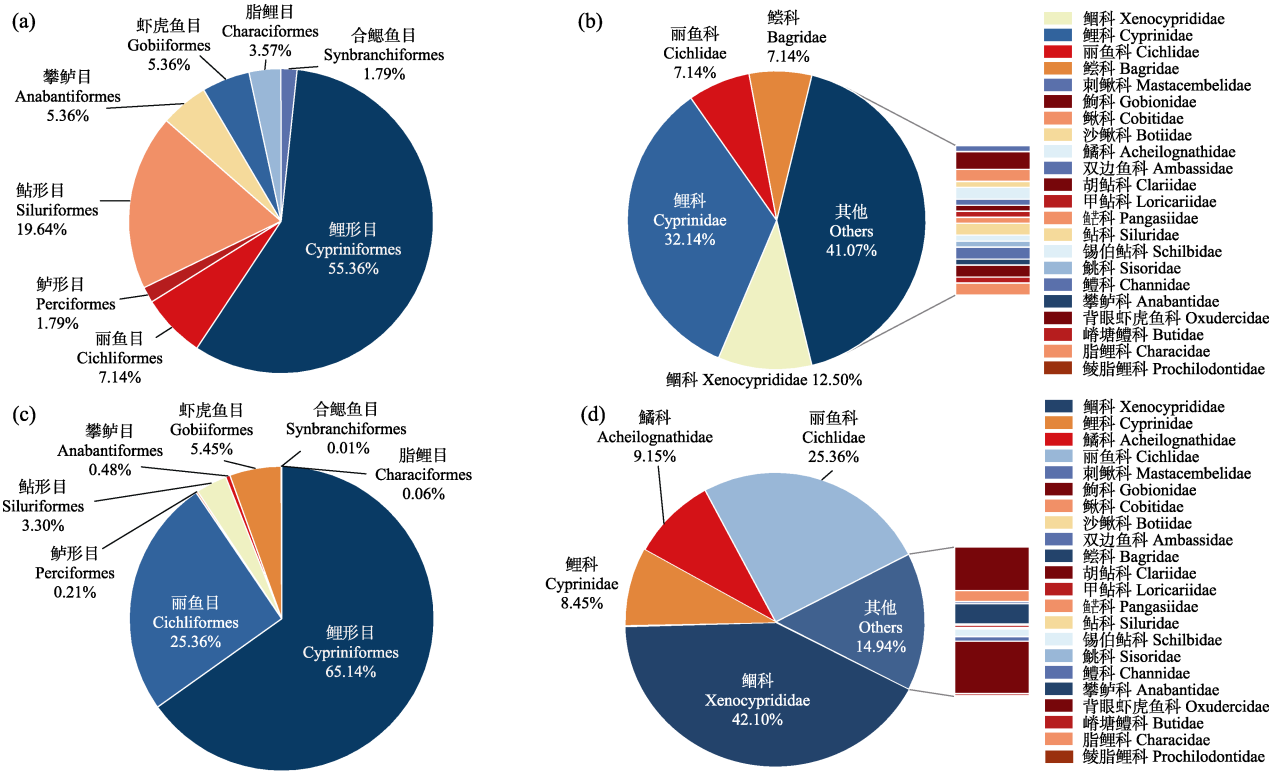


图2　澜沧江下游干流鱼类物种组成。 (a)澜沧江下游干流各目鱼类物种数占比; (b)澜沧江下游干流各科鱼类物种数占比; (c)澜沧江下游干流各目鱼类丰度占比; (d)澜沧江下游干流各科鱼类丰度占比。

Fig. 2　Fish species composition in the lower mainstream of the Lancang River. (a) Proportion of fish species number by order in the lower mainstream of the Lancang River; (b) Proportion of fish species number by family in the lower mainstream of the Lancang River; (c) Proportion of fish abundance by order in the lower mainstream of the Lancang River; (d) Proportion of fish abundance by family in the lower mainstream of the Lancang River.

表1　澜沧江下游干流鱼类优势种

Table 1　Dominant fish species in the lower mainstream of the Lancang River

名称 Name	优势种 Dominant species	丰水期优势种 Dominant species in the high-flow period	枯水期优势种 Dominant species in the low-flow period	不同采样点优势种 Dominant species in different sampling sites					
				马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH
鲬 *Hemiculter leucisculus**	+	+	+	+	+	+	+		
花身副丽鱼 *Parachromis managuensis**	+	+	+		+	+	+		
齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii**	+	+	+		+		+		
尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus**	+	+	+				+		
鳙 *Hypophthalmichthys nobilis**					+				
高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus**			+					+	
马口鱼 *Opsariichthys bidens*								+	
罗碧鱼 *Paralaubuca barroni*							+		
真吻虾虎鱼 *Rhinogobius similis**								+	
棒花鱼 *Abbottina rivularis**								+	
黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco**				+					
长臀鮠 *Mystacoleucus marginatus*									+
红鳍原鲌 *Cultrichthys erythropterus**					+				
短吻鱼 *Sikukia gudgeri*									+
鲤 *Cyprinus carpio**				+					
云南吻孔鮠 *Poropuntius huangchuchieni*									+
中华鲱鲇 *Clupisoma sinense*									+

* 外来鱼类 Alien fish species.

MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary.

2.3 群落结构时空差异

空间尺度NMDS分析结果表明, 不同采样点的鱼类群落结构有明显差异, 其中南腊河口采样点的鱼类群落与其他采样点的鱼类群落差别较大, 反映空间上鱼类群落结构存在异质性(图3a); 时间尺度NMDS分析结果表明, 丰水期和枯水期的鱼类群落结构没有明显差异, 基本重叠在一起(图3b)。

通过PERMANOVA进行两两比较, 结果表明同属糯扎渡库区的3个采样点(马台乡、澜沧江大桥、糯扎渡)的鱼类群落结构不存在显著差异; 而其余采样点之间均存在显著差异(表2)。此外, 各样点之间的Bray-Curtis相异性指数与河道距离如表3, Mantel

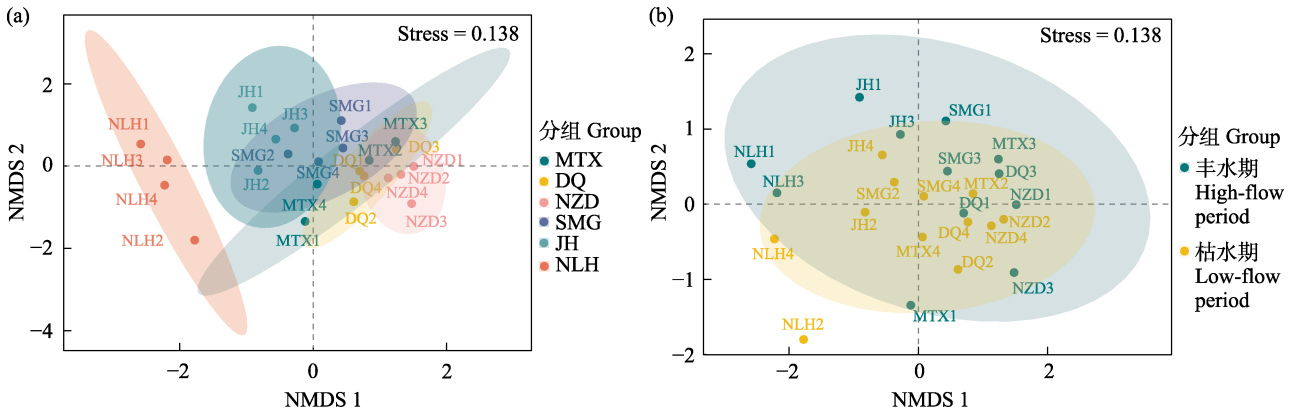


图3 澜沧江下游干流鱼类群落结构非度量多维尺度(NMDS)分析排序图。MTX: 马台乡; DQ: 澜沧江大桥; NZD: 糯扎渡; SMG: 思茅港; JH: 景洪; NLH: 南腊河口; MTX1: 马台乡2023年丰水期; MTX2: 马台乡2023年枯水期; MTX3: 马台乡2024年丰水期; MTX4: 马台乡2024年枯水期, 其他以此类推。

Fig. 3 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination diagram of fish community structure in the lower mainstream of the Lancang River. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary. MTX1 represents the high-flow period of 2023 in MTX, MTX2 represents the low-flow period of 2023 in MTX, MTX3 represents the high-flow period of 2024 in MTX, and MTX4 represents the low-flow period of 2024 in MTX, the rest can be deduced by analogy.

表2 澜沧江下游各样点鱼类群落成对置换多元方差(PERMANOVA)分析结果。下三角为*F*值, 上三角为*P*值。

Table 2 Results of pairwise permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA) on fish community structure among sampling sites in the lower mainstream of the Lancang River. The lower triangle represents *F*-values, the upper triangle represents *P*-values.

	马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH
马台乡 MTX		0.127	0.151	0.031*	0.002*	0.029*
澜沧江大桥 DQ	2.372		0.428	0.028*	0.026*	0.024*
糯扎渡 NZD	1.731	0.816		0.030*	0.032*	0.033*
思茅港 SMG	3.859	5.606	4.922		0.030*	0.027*
景洪 JH	5.311	9.603	8.222	3.670		0.028*
南腊河口 NLH	6.462	8.411	6.553	5.628	6.634	

MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary.
*F*值越大, 说明两个样点的鱼类群落结构差异越明显。A larger *F*-value indicates a more significant difference in fish community structure between two sampling sites.
表示有显著性差异。 denotes a significant difference.

表3 各样点之间的Bray-Curtis相异性指数(对角线下方)与河道距离(对角线上方, km)

Table 3 Pairwise Bray-Curtis dissimilarity (below the diagonal) and waterway distance (above the diagonal, km) among sampling sites

	马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH
马台乡 MTX		30.5	156.3	184.4	266.9	363.2
澜沧江大桥 DQ	0.29		125.8	153.9	236.4	332.7
糯扎渡 NZD	0.46	0.33		28.1	110.6	206.9
思茅港 SMG	0.73	0.73	0.79		82.5	178.8
景洪 JH	0.80	0.82	0.92	0.73		96.3
南腊河口 NLH	0.97	0.96	0.98	0.95	0.91	

MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary.

检验结果表明两者之间存在显著相关性(r = 0.50, P = 0.03), 表明河道距离也是影响鱼类群落结构差异的原因之一。

2.4 生态类型

通过对鱼类的生态类型进行划分, 发现澜沧江下游干流鱼类的产卵习性以产沉粘性卵为主, 南腊河口产漂流性卵鱼类的占比显著高于其他样点; 在生活水层方面, 以中下层鱼类为主, 中上层鱼类种数占比从库区到自然河段先逐渐升高再逐渐降低, 底层鱼类种数占比则从库区到自然河段先逐渐降低再逐渐升高; 在水流偏好上, 以广适性鱼类为主, 南腊河口流水性鱼类的占比显著高于其他样点, 静水性鱼类种数占比从库区到自然河段先逐渐升高再逐渐降低(图4)。

2.5 外来鱼类渔获量

野外调查结果表明, 澜沧江下游干流有25种外来鱼类。4次调查共计采集到鲝2,286尾、花身副丽鱼1,167尾、高体鳑鲏749尾、齐氏罗非鱼548尾、真吻虾虎鱼419尾、尼罗罗非鱼360尾、棒花鱼314尾, 这些外来鱼类数量较多, 为主要外来鱼类(图5)。

2.6 外来鱼类时空分布格局

从空间尺度来看, 4次调查结果均表明, 马台乡、澜沧江大桥、糯扎渡、思茅港、景洪这些样点的外来鱼类种类占渔获物种类的比例较高, 同时外来鱼类数量占渔获物数量比例也较高; 而南腊河口的外来鱼类种类和数量占比则相对较低。利用4次调查数据绘制箱型图, 结果显示, 马台乡外来鱼类种类占比为74.48% ± 5.98%, 澜沧江大桥为62.50% ± 15.00%, 糯扎渡为76.61% ± 14.60%, 思茅港为64.04% ± 7.11%, 景洪为56.94% ± 11.68%, 南腊河口为20.43% ± 9.10%。马台乡外来鱼类数量占比为84.19% ± 11.18%, 澜沧江大桥为90.77% ± 7.81%, 糯扎渡为99.45% ± 0.44%, 思茅港为69.06% ± 27.27%, 景洪为73.31% ± 11.72%, 南腊河口为4.41% ± 1.93%。通过上述结果可以发现, 在空间尺度上澜沧江下游外来鱼类的种类占比、数量占比呈现出从库区到自然河段递减的趋势, 南腊河口样点与其他样点之间存在显著差异(图6)。

时间尺度上, 马台乡4次调查的外来鱼类种类占渔获物种类的比例呈现上升趋势, 外来鱼类数量占渔获物数量的比例呈现波动状态。澜沧江大桥的外来鱼类种类占比呈现波动状态, 数量占比呈现上升趋势。糯扎渡的外来鱼类种类占比呈现波动状态, 数量占比一直维持在极高水平。思茅港的外来鱼类种类占比呈现波动状态, 数量占比呈现上升趋势。景洪的外来鱼类种类占比及数量占比均呈现波动状态。南腊河口外来鱼类的种类占比及数量占比都呈现轻微的上升趋势。整体而言, 各采样点外来鱼类的种类占比及数量占比, 或呈现波动状态, 或呈上升趋势(图7)。

2.7 外来鱼类入侵风险评估

基于BRA得分的ROC曲线的AUC值为0.857, 说明根据BRA得分能够较好地判断澜沧江下游干流外来鱼类的入侵风险(图8)。根据Youden的J统计

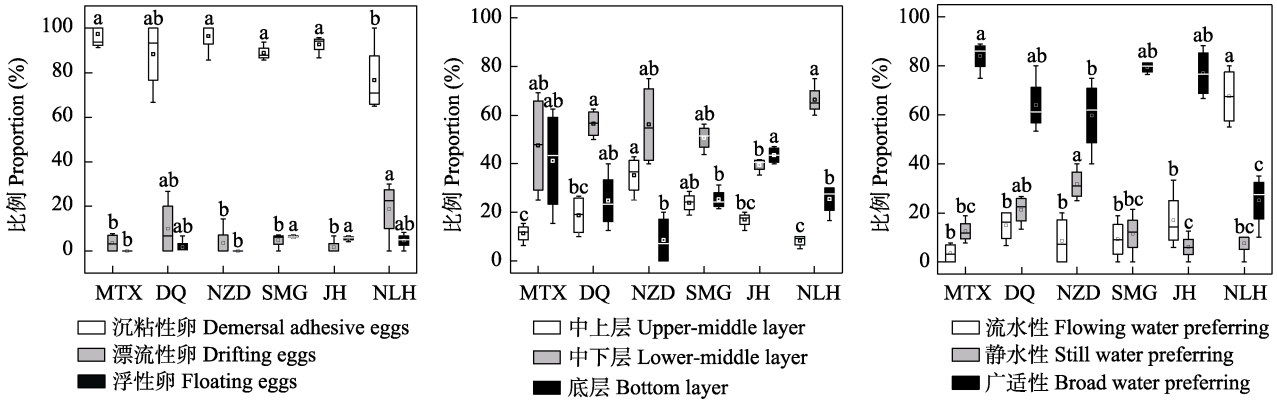


图4 澜沧江下游干流各采样点不同生态类型鱼类种数占比箱型图。MTX: 马台乡; **DQ**: 澜沧江大桥; **NZD**: 糯扎渡; **SMG**: 思茅港; **JH**: 景洪; **NLH**: 南腊河口。不同字母(**a**, **b**, **c**)表示$P < 0.05$水平上差异显著。

Fig. 4 Box plots of the proportion of fish species in different ecological types at each sampling site in the lower mainstream of the Lancang River. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary. Different letters (a, b, c) indicate significant differences among groups at $P < 0.05$.

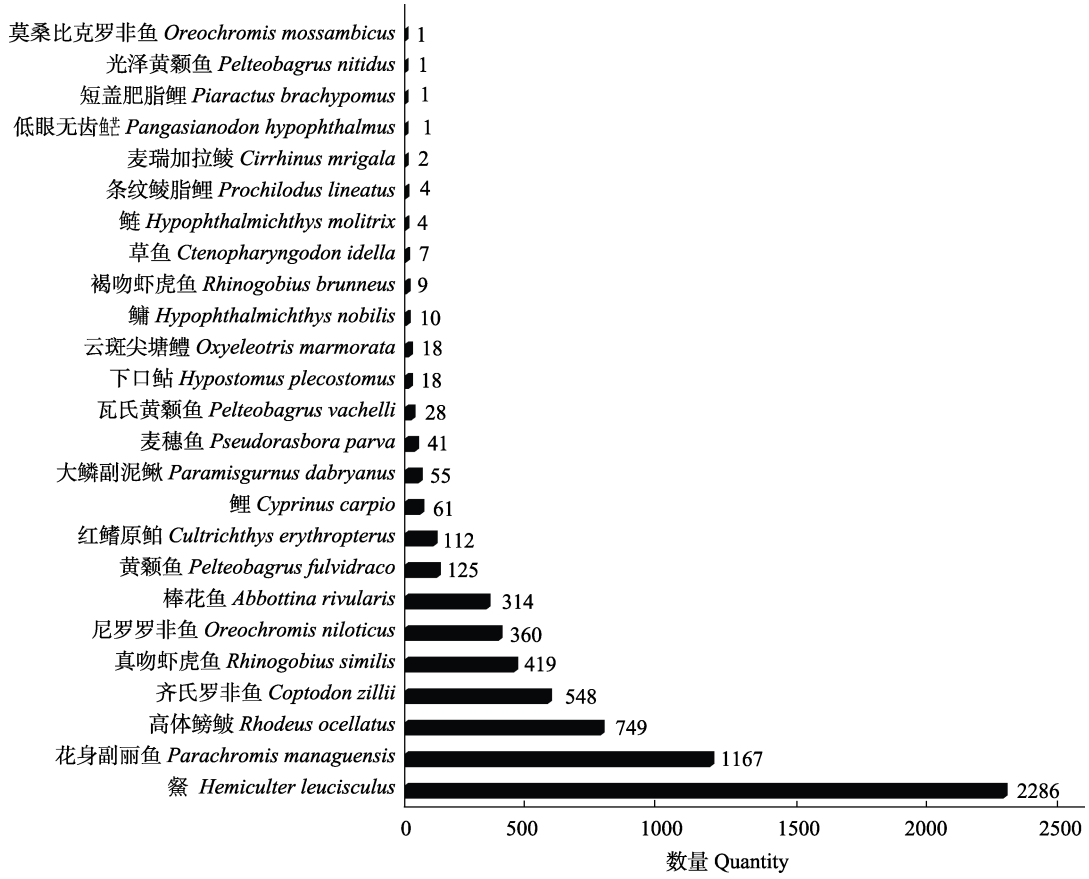


图5　澜沧江下游干流外来鱼类渔获量

Fig. 5　Catch of alien fish species in the lower mainstream of the Lancang River

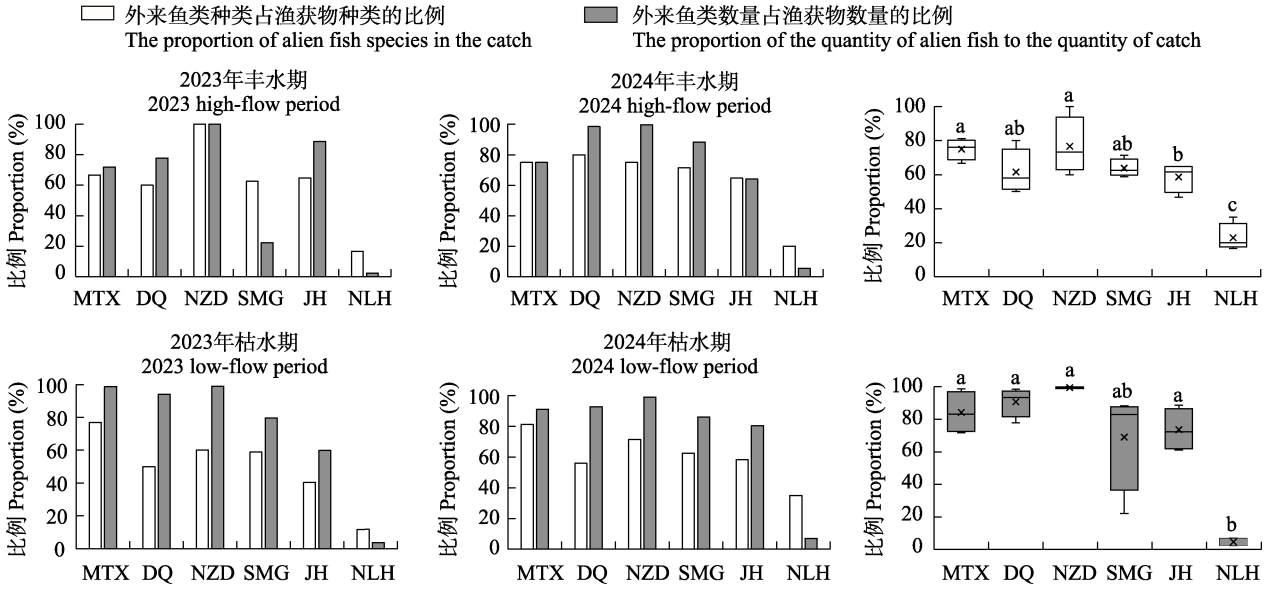


图6　澜沧江下游干流外来鱼类种类及数量占渔获物种类及数量比例的空间分布图。MTX: 马台乡; **DQ**: 澜沧江大桥; **NZD**: 糯扎渡; **SMG**: 思茅港; **JH**: 景洪; **NLH**: 南腊河口。不同字母(**a**, **b**, **c**)表示$P < 0.05$水平上差异显著。

Fig. 6　Spatial distribution map of the proportion of alien fish species and quantity to the species and quantity of catches in the lower mainstream of the Lancang River. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary. Different letters (a, b, c) indicate significant differences among groups at $P < 0.05$.

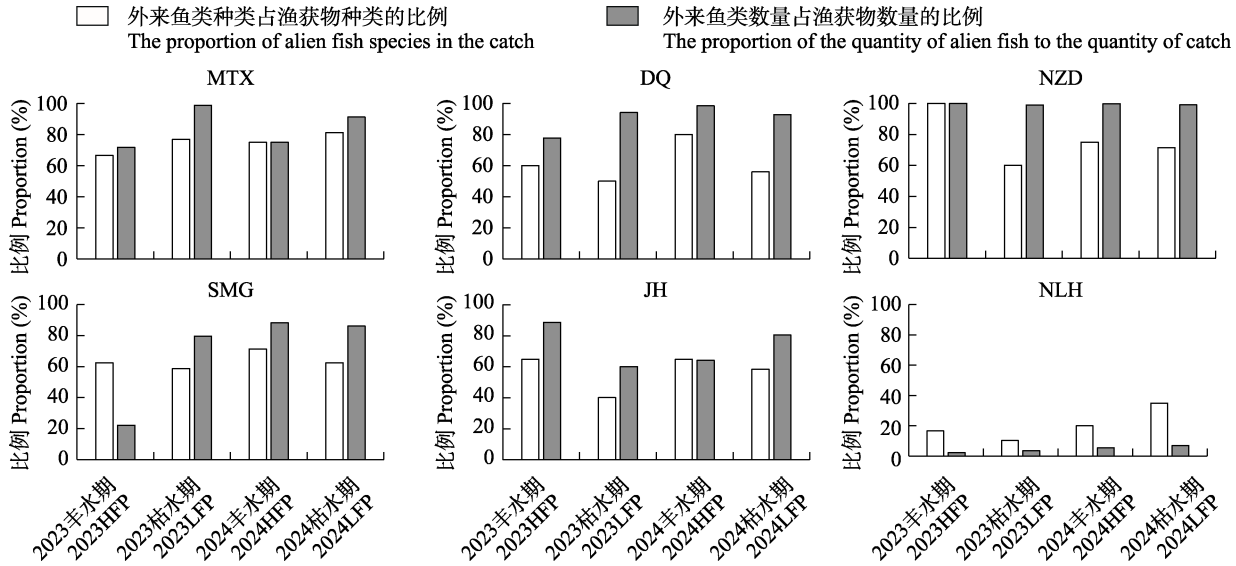


图7　澜沧江下游干流不同采样点外来鱼类种类及数量占渔获物种类及数量比例的时序变化图。MTX: 马台乡; **DQ**: 澜沧江大桥; **NZD**: 糯扎渡; **SMG**: 思茅港; **JH**: 景洪; **NLH**: 南腊河口; **HFP**: 丰水期; **LFP**: 枯水期。

Fig. 7　Temporal variation diagram of the proportions of alien fish species and their quantities in the total catch (by species and quantity) at different sampling sites in the lower mainstream of the Lancang River. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary; HFP, High-flow period; LFP, Low-flow period.

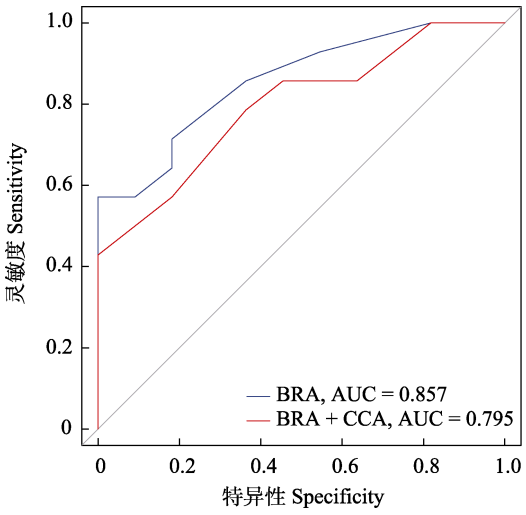


图8　澜沧江下游干流外来鱼类入侵风险评估受试者工作特征(ROC)曲线图。BRA为AS-ISK基础风险评估模块(basic risk assessment, BRA)得分, CCA为AS-ISK气候变化评估模块(climate change assessment, CCA)得分, AUC为ROC曲线下面积。

Fig. 8　Receiver operating characteristic (ROC) curve for invasive fish risk assessment in the lower mainstream of the Lancang River. BRA is basic risk assessment (BRA) score of AS-ISK; CCA is climate change assessment (CCA) score of AS-ISK; AUC is area under the ROC curve.

得到中高风险的最优阈值为22.5, 即BRA得分超过22.5被认为存在高入侵风险。从表4可知, 澜沧江下游干流外来鱼类BRA得分范围为14–39, 其中齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、花身副丽鱼、下口鲇(*Hypostomus plecostomus*)、莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)、鲿、麦穗鱼、麦瑞加拉鲮(*Cirrhinus mrigala*)的得分大于22.5, 表明它们是澜沧江下游干流的高入侵风险外来鱼类(表4)。

基于BRA + CCA得分的ROC曲线的AUC值为0.795, 说明根据BRA + CCA得分也能够较好地判断澜沧江下游干流外来鱼类的入侵风险(图8)。根据Youden的*J*统计得到中高风险的最优阈值为23, 即BRA + CCA得分超过23被认为存在高入侵风险。澜沧江下游干流外来鱼类BRA + CCA得分范围为12–40.5, 其中齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、花身副丽鱼、下口鲇、莫桑比克罗非鱼、鲿的得分大于23, 表明在考虑未来气候变化的情形下, 它们是澜沧江下游干流的高入侵风险外来鱼类(表4)。

3　讨论

3.1　物种组成的时间变化

本研究于2023–2024年在澜沧江下游干流共采集鱼类56种, 土著鱼类占比55.36%; 洪迎新等(2021)于2018–2019年针对澜沧江全干流开展调查,

表4　澜沧江下游干流外来鱼类入侵风险评估结果

Table 4　Results of the risk assessment for alien fish invasion in the lower mainstream of the Lancang River

物种 Species	评估结果 Assessment results				置信因子 Confidence factor		
	BRA得分 BRA score	入侵风险 Invasion risk	BRA + CCA得分 BRA + CCA score	入侵风险 Invasion risk	BRA	CCA	BRA + CCA
齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii**	39	高风险 High risk	40.5	高风险 High risk	0.83	0.64	0.76
尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus**	37.5	高风险 High risk	38	高风险 High risk	0.85	0.63	0.77
花身副丽鱼 *Parachromis managuensis**	37	高风险 High risk	35	高风险 High risk	0.78	0.62	0.74
下口鲇 *Hypostomus plecostomus**	35	高风险 High risk	37	高风险 High risk	0.86	0.68	0.8
莫桑比克罗非鱼 *Oreochromis mossambicus**	32	高风险 High risk	30	高风险 High risk	0.81	0.62	0.75
鬻 *Hemiculter leucisculus**	25	高风险 High risk	24	高风险 High risk	0.88	0.61	0.74
麦穗鱼 *Pseudorasbora parva**	25	高风险 High risk	22	中风险 Medium risk	0.75	0.57	0.68
麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala**	23	高风险 High risk	19	中风险 Medium risk	0.77	0.68	0.71
真吻虾虎鱼 *Rhinogobius similis*	22	中风险 Medium risk	22	中风险 Medium risk	0.76	0.64	0.72
条纹鲮脂鲤 *Prochilodus lineatus**	21	中风险 Medium risk	20	中风险 Medium risk	0.79	0.68	0.72
云斑尖塘鳢 *Oxyeleotris marmorata*	21	中风险 Medium risk	19	中风险 Medium risk	0.69	0.62	0.63
短盖肥脂鲤 *Piaractus brachypomus**	19	中风险 Medium risk	19	中风险 Medium risk	0.73	0.64	0.68
鲤 *Cyprinus carpio**	18	中风险 Medium risk	19	中风险 Medium risk	0.82	0.64	0.75
草鱼 *Ctenopharyngodon idella**	18	中风险 Medium risk	16	中风险 Medium risk	0.79	0.61	0.65
黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco*	18	中风险 Medium risk	17	中风险 Medium risk	0.81	0.64	0.73
大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryanus*	18	中风险 Medium risk	16	中风险 Medium risk	0.78	0.64	0.76
棒花鱼 *Abbottina rivularis*	17	中风险 Medium risk	20	中风险 Medium risk	0.73	0.64	0.65
鲢 *Hypophthalmichthys molitrix**	17	中风险 Medium risk	18	中风险 Medium risk	0.84	0.67	0.78
褐吻虾虎鱼 *Rhinogobius brunneus*	17	中风险 Medium risk	18	中风险 Medium risk	0.72	0.59	0.64
鳙 *Hypophthalmichthys nobilis**	16	中风险 Medium risk	16	中风险 Medium risk	0.83	0.68	0.76
瓦氏黄颡鱼 *Pelteobagrus vachelli*	16	中风险 Medium risk	17	中风险 Medium risk	0.73	0.62	0.66
红鳍原鲌 *Cultrichthys erythropterus*	16	中风险 Medium risk	14	中风险 Medium risk	0.71	0.62	0.64
高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus*	16	中风险 Medium risk	19	中风险 Medium risk	0.76	0.67	0.72
低眼无齿鲿 *Pangasianodon hypophthalmus*	15	中风险 Medium risk	16	中风险 Medium risk	0.71	0.62	0.66
光泽黄颡鱼 *Pelteobagrus nitidus*	14	中风险 Medium risk	12	中风险 Medium risk	0.72	0.6	0.65

标注“*”的鱼类, 代表其依据FishBase数据库被归类为入侵性外来鱼类。BRA为AS-ISK基础风险评估模块得分, CCA为AS-ISK气候变化评估模块得分。

Fish species marked with an asterisk (*) are classified as invasive alien fish species based on the FishBase database. BRA is basic risk assessment score of AS-ISK; CCA is climate change assessment score of AS-ISK.

共采集鱼类121种, 土著鱼类占比69.42%; 付贵权等(2021)于2018–2020年对澜沧江下游西双版纳段(含干支流)开展了调查, 共采集鱼类119种, 土著鱼类占比77.31%; 综合2018–2024年的系列调查数据可见, 澜沧江流域土著鱼类占比均值约70%, 与更早的历史研究相比有明显下降的趋势(康斌和何大明, 2007)。本土洄游性和喜流水性土著鱼类(如鲃属*Bagarius*、结鱼属*Tor*、纹胸鮡属*Glyptothorax*)的生活史高度依赖清澈流水、稳定连通的栖息地及完整的洄游通道, 而流域内高强度人为干扰已严重破坏其生存基础, 尤以梯级水电开发的影响最为关键——大坝导致河流生境破碎化、流速减缓, 直接阻断鱼类洄游通道并缩减喜流水性鱼类栖息地, 进而形成生境破坏、通道阻断到群落重构的连锁反应(Yi et al., 2014; Haworth & Bestgen, 2024); 过度捕捞与水质污染则进一步加剧种群衰退。该结果与Zhang等(2018)关于澜沧江水电开发对土著鱼类影响的结论一致, 且与长江三峡库区的鱼类群落变化规律相似(魏念等, 2021), 证实大坝对河流鱼类群落的负面影响具有生态普遍性。

与土著鱼类衰退形成鲜明对比的是, 澜沧江下游外来鱼类呈加速扩张态势: 付贵权等(2021)研究

表明, 截至1990年澜沧江下游西双版纳段干支流记录有6种外来鱼类, 2013年增至17种, 2020年增至32种。外来鱼类生物量方面, 本研究IRI分析结果显示, 澜沧江下游干流鱼类群落优势种已转变为外来鱼类(如鰲、尼罗罗非鱼、花身副丽鱼、齐氏罗非鱼), 并且高丰度区集中于水电站库区及坝下调控河段, 而远离干扰的自然江段(如南腊河口)仍以本土鱼类(如长臀鮠、短吻鱼、云南吻孔鮠、中华鲱鲇)为优势。因此推测水电开发改变河流生境(河流生境破碎化、流速减缓、生境均质化)使土著鱼类衰退并形成生态位空缺, 外来鱼类凭借无天敌制约、高适应能力等优势占据资源空间(Ding et al., 2016); 同时, 人为引种(养殖逃逸、放流)为初始入侵提供途径, 而水库环境则为后续定殖暴发奠定关键基础, 二者共同构成入侵驱动体系。

3.2 群落结构的时空差异

本研究中, 澜沧江下游干流鱼类群落在空间尺度上呈现出显著差异, 库区江段(马台乡、澜沧江大桥、糯扎渡、思茅港)、坝下江段(景洪)及自然江段(南腊河口)的鱼类群落结构存在明显分异。这种空间异质性的形成, 是地理隔离与水电开发共同作用的结果, 这一结论与Zhang等(2019)针对澜沧江下游鱼类群落结构开展的研究所得出的结论相一致。从地理隔离来看, 澜沧江下游河道落差大、形态复杂, 采样点之间可能存在自然地理屏障, 限制了鱼类的扩散(顾纯等, 2019), 使不同区域鱼类群落逐渐适应本地生境, 形成独特结构, 符合河流生态系统“距离衰减效应”, Bray-Curtis相异性指数与河道距离的Mantel检验结果也证实了这一点。而水电开发进一步加剧了空间差异, 糯扎渡、景洪等水电站的建设, 将连续河流生境分割为库区、坝下及自然江段等不同类型。库区内部水流平缓、生境相对均一, 促使偏好静水性、广适性鱼类(如部分鲤科、丽鱼科鱼类)聚集, 群落趋于同质化(Li et al., 2013); 库区与坝下、自然江段间, 因大坝阻隔了洄游性鱼类(如鲃属)的迁徙, 且生境(急流/缓流、饵料基础等)差异显著, 群落分化加剧(Fráguas & Pompeu, 2021), 南腊河口作为远离水电开发干扰的自然江段, 保留的急流生境更适合喜流水产漂流性卵鱼类, 与库区群落形成鲜明对比。

与空间差异形成鲜明对比的是, 澜沧江下游干流鱼类群落季节差异不显著, 这一特征与水电开发调控及群落自身适应性密切相关。一方面, 梯级水库通过调度削弱了水文环境的季节性波动——丰水期蓄水削减下游洪峰, 枯水期泄水保障基本生态流量, 使多数河段生境全年维持稳定, 鱼类无需通过群落结构调整或迁移应对季节变化(Xu et al., 2022); 另一方面, 群落中占比不低的外来鱼类(如鰲、花身副丽鱼、齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼)具有广谱生态适应性, 对水温、流量等季节变化耐受范围广, 能在不同季节维持稳定丰度, 直接降低了群落的季节波动性(Resende et al., 2020; Hlungwani et al., 2023)。即使是南腊河口等自然江段, 也因流域整体水文调控导致季节性变化幅度减小, 且土著鱼类对本地季节节律已形成稳定适应策略, 未引发显著的群落季节分异。

3.3 外来鱼类的入侵现状

通过数量分析, 发现澜沧江下游干流外来鱼类数量较多的是鰲、花身副丽鱼、罗非鱼等。通过查阅文献资料分析, 澜沧江下游鰲、花身副丽鱼、罗非鱼的入侵来源与人类活动及水文连通性密切相关(刘明典等, 2011): 鰲多随跨流域灌溉渠道、水库泄洪道等人工水道扩散, 或作为养殖塘“野杂鱼”逃逸; 花身副丽鱼与罗非鱼则因经济养殖需求被引种, 经雨季塘埂溃决、尾水排放逃逸。三者数量较多, 核心在于适配性生物学特性与生态位优势: 鰲杂食且繁殖快, 能快速利用浅滩食物资源并补充种群(Huang et al., 2022); 花身副丽鱼、罗非鱼耐温耐低氧, 可适应流域季节性环境波动, 且罗非鱼、花身副丽鱼护幼的繁殖策略提升了后代存活率, 加之土著鱼生境萎缩提供生态位空缺, 共同促成其数量优势(Kishida & Specker, 2000; Piesiewicz et al., 2024)。

从空间分布来看, 澜沧江下游干流外来鱼类呈现出明显的差异。从库区江段(马台乡、澜沧江大桥、糯扎渡、思茅港)、坝下江段(景洪)到自然江段(南腊河口), 外来鱼类的种类和数量占比沿河流纵向梯度呈现下降的趋势。这种空间分布的差异可能与多种因素有关。首先, 不同区域的水文条件, 如水流速度、水深、水温等存在差异。例如, 自然江段的南腊河口, 水流相对湍急, 更适宜某些土著流水性鱼类生存, 对外来鱼类的入侵形成一定阻碍(Starrs et al., 2017); 而库区由于水流变缓, 水体相对稳定,

可能更有利于一些适应静水环境的外来鱼类定居(Šmejkal et al., 2023)。其次, 人类活动强度在各区域也不一致。库区周边可能因渔业养殖、航运等人类活动更为频繁, 增加了外来鱼类引入和扩散的机会①。从时间尺度上分析, 随着时间推移, 外来鱼类的种类和数量占比呈现出轻微增加的趋势。这可能归因于不断发展的水产养殖业, 一些经济鱼类被引入养殖, 部分个体逃逸进入自然水体; 同时, 外来鱼类在资源竞争中相对于土著鱼类展现出显著优势, 这使得外来鱼类种群能更稳定地繁殖扩张, 进而推动其数量占比逐步上升。

通过两种评估得分, 我们发现齐氏罗非鱼、尼罗罗非鱼、花身副丽鱼、下口鲇、莫桑比克罗非鱼、鳌在当下或未来都是澜沧江下游干流高入侵风险鱼类。为进一步验证该评估结果的代表性, 对比我国南方其他流域的入侵鱼类研究发现, 在万朝阳等(2025)的研究中尼罗罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、下口鲇被评估为长江流域高入侵风险鱼类, 在何佳洋等(2023)的研究中尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、下口鲇、短盖肥脂鲤被列为广西内陆水域的高入侵风险鱼类。因此, 上述研究结果表明澜沧江下游干流的高入侵风险鱼类与长江流域、广西内陆水域存在显著重叠, 尤其是尼罗罗非鱼、莫桑比克罗非鱼、下口鲇这三种鱼类, 已成为我国多个南方流域共同面临的高入侵风险物种, 凸显出其跨区域扩散的广泛危害性与防控的紧迫性。这些高入侵风险鱼类普遍具备极强的环境适应性, 不仅对水温、水质等生存条件的耐受性广, 还拥有食性杂的特点, 能充分利用各类食物资源(Resende et al., 2020; Hlungwani et al., 2023; Xiao et al., 2023)。同时, 它们大多繁殖能力强, 无论是繁殖周期还是后代存活率都表现突出, 这让它们在与本土鱼类的生态位竞争中占据了极大优势(邢盈等, 2025)。这些高入侵风险鱼类的存在, 对澜沧江下游水生生态系统的稳定构成了严重威胁, 亟需采取有效的防控措施加以应对。

4 总结

综合本研究结果表明, 澜沧江下游干流库区江段与自然江段的鱼类群落结构存在显著差异: 库区江段呈现出土著鱼类种群数量衰退、外来鱼类占比显著提升的特征, 而南腊河口作为远离水电开发干扰的自然江段, 因保留了完整的原始生境, 外来鱼类入侵强度较低, 鱼类群落仍以土著鱼类为优势类群。上述结果充分证实, 水电开发在改变鱼类群落结构的同时, 也为外来鱼类入侵创造了有利条件, 二者存在明确的关联性。针对澜沧江下游干流鱼类资源保护, 建议采取差异化对策: 库区江段优先防控外来鱼类, 重点关注数量优势种及高入侵风险种; 自然江段则建立土著鱼类保护区, 维护土著鱼类生存与繁衍环境。

① 牛奔 (2019) 澜沧江糯扎渡水电站库区网箱养殖容量调查研究. 硕士学位论文, 云南大学, 昆明.

ORCID

刘红艳 https://orcid.org/0000-0001-5566-3491
熊飞 https://orcid.org/0000-0002-0692-6862

参考文献

Chen XY (2013) Checklist of fishes of Yunnan. Zoological Research, 34, 281–343. (in Chinese with English abstract) [陈小勇 (2013) 云南鱼类名录. 动物学研究, 34, 281–343.]

Chu XL, Chen YR (1989) Fauna of Fishes of Yunnan (Volume I). Science Press, Beijing. (in Chinese) [褚新洛, 陈银瑞 (1989) 云南鱼类志(上册). 科学出版社, 北京.]

Chu XL, Chen YR (1990) Fauna of Fishes of Yunnan (Volume II). Science Press, Beijing. (in Chinese) [褚新洛, 陈银瑞 (1990) 云南鱼类志(下册). 科学出版社, 北京.]

Copp G, Vilizzi L, Tidbury H, Stebbing P, Tarkan AS, Miossec L, Goulletquer P (2016) Development of a generic decision-support tool for identifying potentially invasive aquatic taxa: AS-ISK. Management of Biological Invasions, 7, 343–350.

Ding CZ, Jiang XM, Xie ZC, Brosse S (2016) Seventy-five years of biodiversity decline of fish assemblages in Chinese isolated plateau lakes: Widespread introductions and extirpations of narrow endemics lead to regional loss of dissimilarity. Diversity and Distributions, 23, 171–184.

Eloranta AP, Finstad AG, Helland IP, Ugedal O, Power M (2018) Hydropower impacts on reservoir fish populations are modified by environmental variation. Science of the Total Environment, 618, 313–322.

Fan H, He DM, Wang HL (2015) Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River: A review. Earth-Science Reviews, 146, 77–91.

Fang YH, Cui L, Xiong MT, Li SY, Yuan T, Chen F (2025) Changes in fish resources and conservation recommendations in middle reaches of Jinsha River. Yangtze River, 56, 48–57. (in Chinese with English abstract) [方艳红, 崔磊, 熊满堂, 李世元, 袁婷, 陈锋 (2025) 金沙江中游鱼类资源变化及保护建议. 人民长江, 56, 48–57.]

Fráguas PS, Pompeu PS (2021) Hydropower affects fish

trophic structure both downstream of the dam and upstream of the reservoir. Neotropical Ichthyology, 19, e200071.

Fu GQ, Qin T, Chen XY, Lei CY, Li GH (2021) Composition and species diversity of fishes in Xishuangbanna reach of Lancang River. Acta Ecologica Sinica, 41, 9557–9573. (in Chinese with English abstract) [付贵权, 秦涛, 陈小勇, 雷春云, 李光华 (2021) 澜沧江西双版纳段鱼类组成和物种多样性. 生态学报, 41, 9557–9573.]

Gu C, Li XL, Zhang SB, Tang Y (2019) Charm of Lancang River, a south-flowing river. Forest & Humankind, (8), 24–29. (in Chinese) [顾纯, 李小龙, 张胜邦, 唐云 (2019) 澜沧江 一条南流大江的魅力. 森林与人类, (8), 24–29.]

Habit E, Belk MC, Parra O (2007) Response of the riverine fish community to the construction and operation of a diversion hydropower plant in central Chile. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 17, 37–49.

Haworth MR, Bestgen KR (2024) Low-head dam fragmentation, habitat alteration, and invasive predators degrade a Western United States stream fish assemblage. Ecology of Freshwater Fish, 33, e12773.

He DM, Tang QC (2000) China's International Rivers. Science Press, Beijing. (in Chinese) [何大明, 汤奇成 (2000) 中国国际河流. 科学出版社, 北京.]

He JY, Wu ZQ, Huang LL, Chen ZB, Wang DJ, Sun YY, Wen H, Song QL (2023) Risk analysis of alien fishes invasion in inland waters of Guangxi. Journal of Biosafety, 32, 168–177. (in Chinese with English abstract) [何佳洋, 吴志强, 黄亮亮, 陈中兵, 王冬杰, 孙扬言, 文浩, 宋琦亮 (2023) 广西内陆水域外来鱼类入侵风险分析. 生物安全学报(中英文), 32, 168–177.]

Hlungwani HA, Marr SM, Weyl O, Sara JR (2023) Biological and life-history parameters for *Labeo rosae* Steindachner, 1894 and *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) from Flag Boshielo Dam, Olifants River, South Africa. African Journal of Aquatic Science, 48, 199–212.

Hong YX, Shi WQ, Chen YC, Liu DS, Ma HH, Zhu HY, Chen QW (2021) Succession of fish community in the mainstream of Lancang River during cascade hydropower development. Acta Ecologica Sinica, 41, 235–253. (in Chinese with English abstract) [洪迎新, 施文卿, 陈宇琛, 刘东升, 马宏海, 朱昊彧, 陈求稳 (2021) 水电梯级开发进程中澜沧江干流鱼类群落演变特征. 生态学报, 41, 235–253.]

Huang YF, Liu LG, Yang CY, Yang WJ, Zhou Y, Wu MQ (2022) Life history traits of the sharpbelly *Hemiculter leucisculus* in a dammed tributary of the middle Yangtze River, China. Fisheries Science, 88, 751–765.

Kang B, He DM (2007) Research progress of biodiversity of fish species in the Lancangjiang River. Resources Science, 29(5), 195–200. (in Chinese with English abstract) [康斌, 何大明 (2007) 澜沧江鱼类生物多样性研究进展. 资源科学, 29(5), 195–200.]

Kenkel NC, Orlóci L (1986) Applying metric and nonmetric multidimensional scaling to ecological studies: Some new results. Ecology, 67, 919–928.

Kishida M, Specker JL (2000) Paternal mouthbrooding in the black-chinned tilapia, *Sarotherodon melanotheron* (Pisces: Cichlidae): Changes in gonadal steroids and potential for vitellogenin transfer to larvae. Hormones and Behavior, 37, 40–48.

Li F (2024) Fresh Water Fishes of China. Strait Publishing House, Fuzhou. (in Chinese) [李帆 (2024) 中国淡水鱼类图鉴. 海峡书局, 福州.]

Li JP, Dong SK, Peng MC, Yang ZF, Liu SL, Li XY, Zhao C (2013) Effects of damming on the biological integrity of fish assemblages in the middle Lancang-Mekong River basin. Ecological Indicators, 34, 94–102.

Li QX, Li PY, He YH, Chen DW (2018) Correlative analysis of major hydro-meteorological factors in the downstream of the Lancang River. Journal of Irrigation and Drainage, 37(9), 100–107. (in Chinese with English abstract) [黎清霞, 李佩怡, 何艳虎, 陈栋为 (2018) 澜沧江流域中下游主要水文气象要素变化相关性分析. 灌溉排水学报, 37(9), 100–107.]

Liu MD, Chen DQ, Duan XB, Wang K, Liu SP (2011) Ichthyofauna composition and distribution of fishes in Yunnan section of Lancang River. Journal of Fishery Sciences of China, 18, 156–170. (in Chinese with English abstract) [刘明典, 陈大庆, 段辛斌, 王珂, 刘绍平 (2011) 澜沧江云南段鱼类区系组成与分布. 中国水产科学, 18, 156–170.]

Liu MD, Wang X, Zhu FY, Duan XB, Liu SP, Chen DQ, Dai R (2021) The status and distribution characteristics of fishery resources in Simao District, Pu'er City, Yunnan Province, China. Freshwater Fisheries, 51(3), 82–90. (in Chinese with English abstract) [刘明典, 汪曦, 朱峰跃, 段辛斌, 刘绍平, 陈大庆, 戴蓉 (2021) 云南普洱思茅区鱼类组成及资源分布特征. 淡水渔业, 51(3), 82–90.]

Lora D, Contador I, Pérez-Regadera JF, de la Cámara AG (2016) Features of the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve. A good practice. Stata Journal, 16, 185–196.

Macnaughton CJ, McLaughlin F, Bourque G, Senay C, Lanthier G, Harvey-Lavoie S, Legendre P, Lapointe M, Boisclair D (2017) The effects of regional hydrologic alteration on fish community structure in regulated rivers. River Research and Applications, 33, 249–257.

Piesiewicz R, Krzystolik J, Korzelecka-Orkisz A, Tański A, Formicki K (2024) Early ontogeny of cichlids using selected species as examples. Animals, 14, 1238.

Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK (1971) Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. Fish Bulletin, 152, 1–105.

Quan DL, Yang B, Ma WZ, Song L, Shen T (2021) Bryophyte diversity and its threat status in Xishuangbanna. Biodiversity Science, 29, 545–553. (in Chinese with English abstract) [全东丽, 杨斌, 马文章, 宋亮, 沈婷 (2021) 西双版纳苔藓植物多样性及其濒危状况. 生物多样性, 29, 545–553.]

Resende AGA, de França EJ, de Oliveira CDL, Santana FM (2020) Maturity, growth and natural mortality rate of the introduced fish *Parachromis managuensis* (Perciformes: Cichlidae) in the semiarid region of Brazil. Acta

Limnologica Brasiliensia, 32, e29.

Ruykys L, Ta KAT, Bui TD, Vilizzi L, Copp GH (2021) Risk screening of the potential invasiveness of non-native aquatic species in Vietnam. Biological Invasions, 23, 2047–2060.

Šmejkal M, Bartoň D, Duras J, Horký P, Muška ML, Kubečka J, Pfauserová N, Tesfaye M, Slavík O (2023) Living on the edge: Reservoirs facilitate enhanced interactions among generalist and rheophilic fish species in tributaries. Frontiers in Environmental Science, 11, 1099030.

Starrs T, Starrs D, Lintermans M, Fulton CJ (2017) Assessing upstream invasion risk in alien freshwater fishes based on intrinsic variations in swimming speed performance. Ecology of Freshwater Fish, 26, 75–86.

Sun JR, Galib SM, Ding LY, Tao J, Ding CZ, He DM (2023) Research status of the Lancang-Mekong River Basin: Fish and environmental stressors. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 33, 89–109.

Tang J, Yin XA, Yang P, Yang ZF (2015) Climate-induced flow regime alterations and their implications for the Lancang River, China. River Research and Applications, 31, 422–432.

Wan CY, Fang K, Dong F, Zhang YY, Wu JM, Mu XD, Zhang H (2025) Status and ecological risk assessment of alien fish in the Yangtze River basin. Journal of Fisheries of China, 49(8), 59–71. (in Chinese with English abstract) [万朝阳, 方康, 董芳, 张鎏钰, 吴金明, 牟希东, 张辉 (2025) 长江流域外来鱼类现状与生态风险评估. 水产学报, 49(8), 59–71.]

Wei N, Zhang Y, Wu F, Shen ZW, Ru HJ, Ni ZH (2021) Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 30, 1858–1869. (in Chinese with English abstract) [魏念, 张燕, 吴凡, 沈子伟, 茹辉军, 倪朝辉 (2021) 三峡库区鱼类群落结构现状及变化. 长江流域资源与环境, 30, 1858–1869.]

Wu F, Li YF, Ma BS, Zhang Y, Ru HJ, Shen ZW, Wei N (2025) Fish community structure and environmental impact factors in Three Gorges Reservoir during summer and autumn. South China Fisheries Science, 21(2), 81–89. (in Chinese with English abstract) [吴凡, 李云峰, 马宝珊, 张燕, 茹辉军, 沈子伟, 魏念 (2025) 三峡库区夏季和秋季鱼类群落结构及环境影响因子研究. 南方水产科学, 21(2), 81–89.]

Xiao YS, Liu J, Wei JH, Xiao ZZ, Li J, Aguilar-Perera A, Herrera-Ulloa A (2023) Future climate change accelerates the invasive rhythm of alien marine species: New insights into the invasive potential of the world's aquaculture species red drum *Sciaenops ocellatus*. Ecological Indicators, 155, 111069.

Xing Y, Tang SJ, Geletu TT, Zhao JL (2025) Invasion and management implications of *Coptodon zillii* in China. Chinese Journal of Ecology, 44, 645–653. (in Chinese with English abstract) [邢盈, 唐首杰, Temesgen Tola Geletu, 赵金良 (2025) 中国齐氏罗非鱼入侵现状与防控建议. 生态学杂志, 44, 645–653.]

Xu B, Sun Y, Huang X, Zhong PA, Zhu FL, Zhang JY, Wang XJ, Wang GQ, Ma YF, Lu QW, Wang H, Guo L (2022) Scenario-based multiobjective robust optimization and decision-making framework for optimal operation of a cascade hydropower system under multiple uncertainties. Water Resources Research, 58, e2021WR030965.

Xue F (2025) Discussion on the protection and utilization of aquatic biological resources in Lancang River with reference to the experience of fishing ban in Yangtze River. China Fisheries, (4), 49–52. (in Chinese) [薛飞 (2025) 借鉴长江禁渔经验 探讨澜沧江水生生物资源保护与利用. 中国水产, (4), 49–52.]

Yi JL, Wang CY, Liu JW (2024) Study on landscape ecological risk assessment and influencing factors of Lancang River Basin in Yunnan Province. Agriculture and Technology, 44(2), 99–106. (in Chinese) [易佳伶, 王晨阳, 刘嘉纬 (2024) 云南省澜沧江流域景观生态风险评估及影响因素研究. 农业与技术, 44(2), 99–106.]

Yi YJ, Tang CH, Yang ZF, Chen X (2014) Influence of Manwan Reservoir on fish habitat in the middle reach of the Lancang River. Ecological Engineering, 69, 106–117.

Yin MC (1995) Fish Ecology. China Agricultural Press, Beijing. (in Chinese) [殷名称 (1995) 鱼类生态学. 中国农业出版社, 北京.]

Youden WJ (1950) Index for rating diagnostic tests. Cancer, 3, 32–35.

Zhang C, Ding CZ, Ding LY, Chen LQ, Hu JM, Tao J, Jiang XM (2019) Large-scale cascaded dam constructions drive taxonomic and phylogenetic differentiation of fish fauna in the Lancang River, China. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 29, 895–916.

Zhang C, Ding LY, Ding CZ, Chen LQ, Sun J, Jiang XM (2018) Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to hydropower development and exotic invasions. Ecological Indicators, 90, 261–279.

Zhu TB, Hu FF, Gong JL, Wang XG, Chen K, Du HC, Yang DG, Wu XB (2022) Community structure and species diversity of fishes in the Tibet reach of the Lancang River, China. Journal of Fishery Sciences of China, 29, 304–313. (in Chinese with English abstract) [朱挺兵, 胡飞飞, 龚进玲, 王旭歌, 陈康, 杜红春, 杨德国, 吴兴兵 (2022) 澜沧江西藏段鱼类群落结构及多样性. 中国水产科学, 29, 304–313.]

(责任编委: 陈小勇　责任编辑: 闫文杰)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025394

附录1　澜沧江下游干流鱼类名录
Appendix 1　Fish species list of the lower mainstream of the Lancang River

目 Order	科 Family	物种 Species
鲤形目 Cypriniformes	鳅科 Cobitidae	泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*
鲤形目 Cypriniformes	鳅科 Cobitidae	大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryanus*
鲤形目 Cypriniformes	沙鳅科 Botiidae	尾斑安彦鳅 *Yasuhikotakia caudipunctata**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	宽头高鲮 *Altigena laticeps**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	鲫 *Carassius auratus*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	斑尾角墨头鱼 *Ceratogarra fasciacauda**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	鲮 *Cirrhinus molitorella**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	短须圆唇鱼 *Cyclocheilichthys repasson**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	鲤 *Cyprinus carpio*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	裂峡鲃 *Hampala macrolepidota*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	单吻鱼 *Henicorhynchus lineatus**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	大鳞高须鱼 *Hypsibarbus vernayi**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	舌唇鱼 *Lobocheilus melanotaenia*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	长臀鲃 *Mystacoleucus marginatus*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	南方白甲鱼 *Onychostoma gerlachi*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	云南吻孔鲃 *Poropuntius huangchuchieni**
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	少鳞舟齿鱼 *Scaphiodonichthys acanthopterus*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	短吻鱼 *Sikukia gudgeri*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	中国结鱼 *Tor sinensis*
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	野结鱼 *Tor tambra*
鲤形目 Cypriniformes	鮈科 Gobionidae	棒花鱼 *Abbotina rivularis*
鲤形目 Cypriniformes	鮈科 Gobionidae	麦穗鱼 *Pseudorasbora parva*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	草鱼 *Ctenopharyngodon idella*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	红鳍原鲌 *Cultrichthys erythropterus*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	鳌 *Hemiculter leucisculus*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	鳙 *Hypophthalmichthys nobilis*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	马口鱼 *Opsariichthys bidens*
鲤形目 Cypriniformes	鲴科 Xenocyprididae	罗碧鱼 *Paralaubuca barroni*
鲤形目 Cypriniformes	鱊科 Acheilognathidae	高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus*
脂鲤目 Characiformes	鲮脂鲤科 Prochilodontidae	条纹鲮脂鲤 *Prochilodus lineatus*
脂鲤目 Characiformes	脂鲤科 Characidae	短盖肥脂鲤 *Piaractus brachypomus*

鲇形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	丝尾鱵 *Hemibagrus wyckioides*
鲇形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco*
鲇形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	光泽黄颡鱼 *Pelteobagrus nitidus*
鲇形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	瓦氏黄颡鱼 *Pelteobagrus vachelli*
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Siluridae	湄南细丝鲇 *Micronema moorei*
鲇形目 Siluriformes	鲇科 Siluridae	叉尾鲇 *Wallago attu*
鲇形目 Siluriformes	鮡科 Sisoridae	小鮡 *Bagarius vegrandis*
鲇形目 Siluriformes	胡鲇科 Clariidae	胡子鲇 *Clarias fuscus*
鲇形目 Siluriformes	甲鲇科 Loricariidae	下口鲇 *Hypostomus plecostomus*
鲇形目 Siluriformes	鲿科 Pangasiidae	低眼无齿鲿 *Pangasianodon hypophthalmus**
鲇形目 Siluriformes	锡伯鲇科 Schilbeidae	中华鲱鲇 *Clupisoma sinense*
虾虎鱼目 Gobiiformes	塘鳢科 Eleotridae	云斑尖塘鳢 *Oxyeleotris marmorata*
虾虎鱼目 Gobiiformes	背眼虾虎鱼科 Oxudercidae	褐吻虾虎鱼 *Rhinogobius brunneus*
虾虎鱼目 Gobiiformes	背眼虾虎鱼科 Oxudercidae	真吻虾虎鱼 *Rhinogobius similis*
攀鲈目 Anabantiformes	攀鲈科 Anabantidae	攀鲈 *Anabas testudineus*
攀鲈目 Anabantiformes	鳢科 Channidae	宽额鳢 *Channa gachua*
攀鲈目 Anabantiformes	鳢科 Channidae	线鳢 *Channa striata*
合鳃鱼目 Synbranchiformes	刺鳅科 Mastacembelidae	大刺鳅 *Mastacembelus armatus*
丽鱼目 Cichliformes	丽鱼科 Cichlidae	齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii*
丽鱼目 Cichliformes	丽鱼科 Cichlidae	莫桑比克罗非鱼 *Oreochromis mossambica*
丽鱼目 Cichliformes	丽鱼科 Cichlidae	尼罗罗非鱼 *Oreochromis nilotica*
丽鱼目 Cichliformes	丽鱼科 Cichlidae	花身副丽鱼 *Parachromis managuensis*
鲈形目 Perciformes	双边鱼科 Ambassidae	暹罗副双边鱼 *Parambassis siamensis**

标注“*”的鱼类, 代表其物种身份是依据形态和分子鉴定两种方法共同认定的。

Species marked with an asterisk (*) indicate that their identity has been confirmed by both morphological and molecular identification methods.

附录2　澜沧江下游干流渔获物统计

Appendix 2　Statistics of fish catches from the lower mainstream of the Lancang River

物种 Species	马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH	总计 Total
泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*	3	1		1	29		34
大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryanus**					55		55
尾斑安彦鳅 *Yasuhikotakia caudipunctata*						1	1
宽头高鲮 *Altigena laticeps*		7					7
鲫 *Carassius auratus*	12	2	2	37	44		97
斑尾角墨头鱼 *Ceratogarra fasciacauda*					1	1	2
鲮 *Cirrhinus molitorella*		2					2
麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala**						2	2
短须圆唇鱼 *Cyclocheilichthys repasson*						1	1
鲤 *Cyprinus carpio**	10			4	47		61
裂峡鲃 *Hampala macrolepidota*						2	2
单吻鱼 *Henicorhynchus lineatus*						1	1
大鳞高须鱼 *Hypsibarbus vernayi*				1			1
舌唇鱼 *Lobocheilus melanotaenia*						21	21
长臀鲃 *Mystacoleucus marginatus*				7	51	181	239
南方白甲鱼 *Onychostoma gerlachi*						3	3
云南吻孔鲃 *Poropuntius huangchuchieni*		14		4		92	110
少鳞舟齿鱼 *Scaphiodonichthys acanthopterus*					3	9	12

物种 Species	马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH	总计 Total
短吻鱼 *Sikukia gudgeri*	9	1		4	8	49	71
中国结鱼 *Tor sinensis*				1	2	40	43
野结鱼 *Tor tambra*						17	17
棒花鱼 *Abbotina rivularis**	43	1		59	211		314
麦穗鱼 *Pseudorasbora parva**	3	1		32	5		41
草鱼 *Ctenopharyngodon idella**	4	2				1	7
红鳍原鲌 *Cultrichthys erythropterus**	1	92	15	4			112
鱎 *Hemiculter leucisculus**	694	739	594	199	57	3	2,286
鲢 *Hypophthalmichthys molitrix**		2		2			4
鳙 *Hypophthalmichthys nobilis**		5	3	2			10
马口鱼 *Opsariichthys bidens*	1	59	2	35	238	3	338
罗碧鱼 *Paralaubuca barroni*				645	21	23	689
高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus**	34	7		139	569		749
条纹鲮脂鲤 *Prochilodus lineatus**						4	4
短盖肥脂鲤 *Piaractus brachypomus**						1	1
丝尾鳠 *Hemibagrus wyckioides*			2		2	8	12
黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco**	40	38		7	40		125
光泽黄颡鱼 *Pelteobagrus nitidus**	1						1
瓦氏黄颡鱼 *Pelteobagrus vachelli**	23	1			4		28
湄南细丝鮡 *Micronema moorei*						8	8

物种 Species	马台乡 MTX	澜沧江大桥 DQ	糯扎渡 NZD	思茅港 SMG	景洪 JH	南腊河口 NLH	总计 Total
叉尾鮡 *Wallago attu*				1	1		2
小鮅 *Bagarius vegrandis*						2	2
胡子鮡 *Clarias fuscus*		2			6	4	12
下口鮡 *Hypostomus plecostomus**					15	3	18
低眼无齿鲿 *Pangasianodon hypophthalmus**				1			1
中华鲱鮡 *Clupisoma sinense*		1			6	54	61
云斑尖塘鳢 *Oxyeleotris marmorata**					17	1	18
褐吻虾虎鱼 *Rhinogobius brunneus**					9		9
真吻虾虎鱼 *Rhinogobius similis**	12	44		12	351		419
攀鲈 *Anabas testudineus*		2					2
宽额鳢 *Channa gachua*	3	8		5	19		35
线鳢 *Channa striata*				1		1	2
大刺鳅 *Mastacembelus armatus*						1	1
齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii**	47	64	57	296	77	7	548
莫桑比克罗非鱼 *Oreochromis mossambica**				1			1
尼罗罗非鱼 *Oreochromis nilotica**	6	10	8	291	42	3	360
花身副丽鱼 *Parachromis managuensis**	5	266	806	84	6		1,167
暹罗副双边鱼 *Parambassis siamensis*						17	17
合计 Total	951	1,371	1,489	1,875	1,936	564	8,186

标注“*”的鱼类, 代表其为外来物种。MTX: 马台乡; DQ: 澜沧江大桥; NZD: 糯扎渡; SMG: 思茅港; JH: 景洪; NLH: 南腊河口
Species marked with an asterisk (*) indicate that they are exotic/introduced species. MTX, Matai Town; DQ, Lancang River Bridge; NZD, Nuozhadu Town; SMG, Simaogang Town; JH, Jinghong City; NLH, Nanla River Estuary.

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25422, pages 1–12
doi: 10.17520/biods.2025422
cstr: 32101.14.biods.2025422

•研究报告•

广州市陆生野生脊椎动物资源：多样性、分布与保护空缺

梁健超[1#], 陈淑甜[1,2#], 何文祥[3], 熊春妮[3], 许镇洲[4], 黄源欣[1], 刘源志弘[1], 张浪[5*], 胡慧建[1*]

1. 广东省科学院动物研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物调查监测与生态修复工程技术研究中心, 广州 510260; 2. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 3. 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510030; 4. 华南农业大学林业与风景园林学院, 广州 510642; 5. 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232

摘要: 伴随着人类世背景下快速的城市化进程, 城市区域已成为许多物种的重要栖息地。然而, 目前大型城市的野生动物组成、分布等基础信息普遍存在缺失、零散、滞后等问题。广州市作为国家重要中心城市和粤港澳大湾区核心引擎, 其野生动物多样性及栖息地分布尚缺乏系统研究。本研究在野外调查基础上, 收集整理了文献资料、出版专著、新闻资讯以及公民科学平台记录等相关数据, 对广州市陆生野生脊椎动物多样性进行系统梳理。在此基础上, 利用MaxEnt模型对物种潜在分布进行分析, 并综合层次分析法与熵值法评估和筛选了野生动物重要栖息地。结果表明: (1)广州市有陆生野生脊椎动物33目134科690种, 与现有记录相比, 本次新增记录物种100种, 包括香港湍蛙(*Amolops hongkongensis*)、黑脊蛇(*Achalinus spinalis*)、白头鹤(*Grus monacha*)、利安德水鮹(*Chimarrogale leander*)等; (2)动物多样性格局呈东高西低趋势, 热点集中在北部从化山地、东部增城丘陵耕地及南部南沙湿地; (3)广州市野生动物重要栖息地有24处, 共1,299.5 km^2。现有保护地体系覆盖了约83% (1,078.9 km^2)的重要栖息地, 但仍有17% (220.6 km^2)的空缺。本研究对广州市陆生野生脊椎动物及其栖息地名录进行了梳理和更新, 为城市保护规划与管理提供了科学依据, 同时为高度城市化区域的生物多样性编目、格局与保护研究提供了范例。

关键词: 陆生野生脊椎动物; 城市生态; 保护空缺; 重要栖息地评估; 广州市

梁健超, 陈淑甜, 何文祥, 熊春妮, 许镇洲, 黄源欣, 刘源志弘, 张浪, 胡慧建 (2026) 广州市陆生野生脊椎动物资源: 多样性、分布与保护空缺. 生物多样性, 34, 25422. doi: 10.17520/biods.2025422; cstr: 32101.14.biods.2025422.
Liang JC, Chen ST, He WX, Xiong CN, Xu ZZ, Huang YX, Liu YZH, Zhang L, Hu HJ (2026) Wild terrestrial vertebrate resources in Guangzhou: Diversity, distribution, and conservation gaps. Biodiversity Science, 34, 25422. doi: 10.17520/biods.2025422; cstr: 32101.14.biods.2025422.

Wild terrestrial vertebrate resources in Guangzhou: Diversity, distribution, and conservation gaps

Jianchao Liang[1#], Shutian Chen[1,2#], Wenxiang He[3], Chunni Xiong[3], Zhenzhou Xu[4], Yuanxin Huang[1], Yuanzhihong Liu[1], Lang Zhang[5*], Huijian Hu[1*]

1 *Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Engineering Technology Research Center for Wildlife Survey Monitoring and Ecological Restoration, Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510260, China*
2 *School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
3 *Guangzhou Ecological and Environmental Monitoring Center Station of Guangdong Province, Guangzhou 510030, China*
4 *College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*
5 *Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China*

收稿日期 Received: 2025-10-24; 接受日期 Accepted: 2026-02-15
基金项目: 国家自然科学基金(52478053)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110744; 2024A1515010783)、广东省科技计划项目(2024B1212040009)、广东省科学院科技发展专项(2022GDASZH-2022010105)和广东省林业科技项目(2025KJQT007) Supported by the National Natural Science Foundation of China (52478053), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515110744; 2024A1515010783), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2024B1212040009), Guangdong Academy of Sciences Special Project of Science and Technology Development (2022GDASZH-2022010105), and Forestry Technology Innovation Project of Guangdong Province (2025KJQT007)
共同第一作者 Co-first authors
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zl@shsyky.com; 13922339577@139.com

ABSTRACT

Aims: In the Anthropocene, rapid urban expansion has turned cities into important habitats for many species. However, basic information on wildlife composition and distribution in large cities is often lacking, fragmented, or outdated. As a national central city and the core engine of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Guangzhou lacks systematic research on its wildlife diversity and habitat distribution. This study aims to systematically compile data on wild terrestrial vertebrates in Guangzhou and identify priority habitats to inform conservation planning.

Methods: Based on field surveys, we collected and integrated data from literature, monographs, news reports, and citizen science databases. We analyzed potential species distributions using the MaxEnt model and evaluated priority wildlife habitats by combining the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM).

Results: (1) A total of 690 species of wild terrestrial vertebrates, belonging to 33 orders and 134 families, were recorded in Guangzhou. Among them, 100 species were newly recorded, such as *Amolops hongkongensis*, *Achalinus spinalis*, *Grus monacha*, and *Chimarrogale leander*. (2) Animal diversity showed a pattern of higher richness in the east and lower in the west, with hotspots concentrated in the mountainous areas of Conghua in the north, the hilly farmland of Zengcheng in the east, and the wetlands of Nansha in the south. (3) We identified 24 priority wildlife habitats covering a total area of 1,299.5 km^2. The existing protected area network covered approximately 83% (1,078.9 km^2) of these priority habitats, but a 17% protected gap (220.6 km^2).

Conclusion: This study updates the inventory of wild terrestrial vertebrates and their priority habitats in Guangzhou, providing a scientific basis for urban conservation planning and management. It also offers a valuable model for biodiversity inventory, pattern analysis, and conservation research in highly urbanized areas.

Key words: wild terrestrial vertebrates; urban ecology; conservation gap; priority habitat assessment; Guangzhou

城市野生动物不仅是城市生态系统结构与功能的关键承载者, 更在提供生态系统服务、增强城市韧性以及提升居民福祉方面扮演着不可替代的角色(Shanahan et al., 2015; 王海洋等, 2023)。对城市野生动物资源进行有效保育与科学管理的前提在于系统掌握物种及其栖息地的组成、分布等基础信息(Niemelä, 2011; Beninde et al., 2015)。此类基础信息是理解城市生态过程、评估人类活动干扰效应、识别生物多样性保护关键区域(如生态廊道、核心栖息地)的科学依据, 也是有效协调城市化进程与生态保护之间的尖锐矛盾, 推动城市迈向可持续发展的决策基石(Alberti, 2016; O'Connor et al., 2021)。

然而, 目前我国在城市尺度上的野生动物及栖息地基础信息体系仍存在显著的缺失与不足。首先, 许多城市的野生动物监测调查覆盖范围不足, 大多集中于部分热点区域与类群, 存在显著的空间与类群盲区(Xu et al., 2016; 肖治术等, 2017; 吴政浩等, 2023)。此外, 野生动物数据呈现出高度的零散化和碎片化特征, 数据采集主体多元, 包括科研院所、环保组织、志愿者以及市政部门等, 但彼此间缺乏共享机制(郭俊华等, 2024)。再者, 信息更新严重滞后。许多城市的基础数据来源于数年甚至十余年前的单次普查或零星的科研项目, 无法反映野生动物种群在快速城市化进程中的实时变化(吴政浩等, 2023; 于冬梅等, 2024)。因此, 城市管理部门既无法掌握城市野生动物"有哪些", 更难以回答城市野生动物"在哪里", 导致了管理决策的"模糊化"与"粗放化"。

广州市北邻南岭山脉, 南接珠江出海口, 北部丘陵山地保存着较为完整的南亚热带常绿阔叶林, 是中华穿山甲(*Manis pentadactyla*)、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)等珍稀物种的重要栖息地(胡慧建等, 2023), 南部沿海湿地则是国际候鸟迁徙的关键中转站, 记录到的水鸟物种数量占全国候鸟物种总数的1/6以上(https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6959116.htm), 镶嵌于建成区的白云山、海珠湿地等生态斑块, 则成为城市中心野生动物的关键避难所。这种多元化的生境格局, 使广州在高度城市化背景下仍维系了较高的生物多样性。随着近年来对城市生物多样性的关注, 相关部门及研究人员逐渐展开对广州野生动物资源的调查工作, 但研究结果存在一定差异。例如广州市林业和园林局于2005年、2017年分别开展了两次全市陆生野生动植物资源本底调查, 共记录到陆生野生脊椎动物457种(https://mp.weixin.qq.com/s/0J5iScWETxGIptT92nGn-w)。《广东陆生脊椎动物分布名录》中记录广州分布的陆生脊椎动物495种(邹发生和叶冠锋, 2016)。这种编目信息差异容易导致保护

与管理决策缺乏统一依据。尤其随着近年来公民科学数据的快速发展, 物种新分布记录不断涌现(Sheard et al., 2020)。因此, 亟需对多源数据进行及时的系统梳理, 以形成准确、全面的野生动物编目信息。此外, 目前野生动物编目普遍缺乏准确的物种分布信息, 导致对野生动物栖息地的掌握尚不清晰, 这已成为制约城市生物多样性有效保护的关键因素之一(Wilson et al., 2013)。2023年国家林业和草原局颁布的《陆生野生动物重要栖息地名录(第一批)》中, 将广州市南沙十八涌湿地与海珠湿地纳入了该名录(国家林业和草原局公告(2023年第23号) https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkzfwj/538675.jhtml)。然而, 当前这两处栖息地的主要保护对象均集中于鸟类, 保护目标相对单一, 尚未充分覆盖广州市域野生动物多样性的整体构成与空间需求。

本研究在2005–2023年广东省科学院动物研究所先后3次对广州市全域陆生野生动物资源本底调查的基础上, 系统梳理校核了近20年内的出版专著、报告、发表论文、新闻报道以及公民科学等相关记录, 更新完善广州市陆生野生动物资源名录; 在此基础上, 通过最大熵模型分析各物种在广州市的分布并识别动物多样性热点; 最后, 利用层次分析法与熵值法构建评估体系筛选广州市野生动物重要栖息地。通过以上工作, 本研究旨在解答: (1)广州市有多少陆生野生脊椎动物; (2)广州市陆生脊椎动物主要分布在哪里; (3)广州市哪些区域是陆生野生动物的重要栖息地。本研究结果将为粤港澳大湾区核心城市的生态规划、生物多样性保护以及栖息地管理提供关键数据支撑与决策依据, 同时为典型城市化区域的动物资源编目与格局研究提供范例。

1 研究方法

1.1 研究地概况

广州市(112°57'–114°03' E, 22°26'–23°56' N)位于广东省中南部, 珠江三角洲北缘, 总面积7,434.4 km^2, 2023年常住人口1,882.70万人(《广州统计年鉴2024》编辑委员会, 2024)。该地区属南亚热带季风气候, 年均温20–24℃, 年降水量约1,800 mm, 气候温暖湿润。境内河网密布, 集雨面积100 km^{2}以上的河流22条, 河道密度0.75 km/km^2。地势呈东北高、西南低的特征, 北部为森林覆盖的丘陵山区, 南部属珠江冲积平原。地带性植被南亚热带季风常绿阔叶林主要分布在北部山区, 中部及南部因城市化导致植被覆盖率显著下降, 形成由山地森林向平原城市过渡的空间分布格局。这种多样化的气候、水文和地形条件为陆生野生脊椎动物提供了丰富的栖息环境。本研究将整个研究区域划分为100 m × 100 m的网格体系(共721,610个网格单元), 所有空间分析均基于此标准化网格系统开展。

1.2 数据来源

1.2.1 编目数据

本研究先后于2005年、2017年、2023年开展了3期广州市陆生野生脊椎动物资源本底调查。3期调查均以104条固定监测样线为基础, 每期开展6次重复调查, 分别于3月、5月、6月、9月、11月、12月进行, 样线位置详见附录1。在此基础上, 以2005–2025年为检索年限, 使用“广州(包括海珠、越秀等各区)” “两栖类” “爬行类” “鸟类” “兽类”等关键词, 在Web of Science、中国知网、谷歌学术等平台检索了与广州市陆生野生脊椎动物资源有关的专著6部、文献56篇、新闻资讯68条; 在中国观鸟记录中心(https://www.birdreport.cn/)、GBIF (Global Biodiversity Information Facility, https://www.gbif.org/)和Avibase (https://avibase.bsc-eoc.org/avibase.jsp)等9个公民科学与专业数据库检索了2010年以来广州地区物种记录共305,545条; 整合了广州地区的研究报告13份, 详见附录2。最终, 经过相关类群专家的校核与厘定, 汇总编制形成广州市陆生野生脊椎动物分布名录, 详见附录3。

其中, 两栖类和爬行类分类依据《中国两栖、爬行动物更新名录》(王剀等, 2020), 鸟类分类依据《中国鸟类分类与分布名录》(第四版) (郑光美, 2023), 兽类分类依据《中国生物物种名录(2024版)》(http://sp2000.org.cn)。各类群物种的区系分析基于《中国动物地理》(张荣祖, 2011)。各类群物种的保护等级评估参照《国家重点保护野生动物名录》(2021, https://www.forestry.gov.cn/search/90131, 以下简称“国家一级、二级保护野生动物”)、《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》(2025-2, https://www.iucnredlist.org/, 以下简称IUCN红色名录)、《广东省重点保护陆生野生动物名录》(2021, https://www.gd.gov.cn/zwgk/gongbao/2021/20/conten

t/post_3368515.html, 以下简称“省重点”)、《濒危野生动植物种国际贸易公约》(2023, https://www.forestry.gov.cn/search/368208, 以下简称“CITES”)以及《有重要生态、科学、社会价值的陆生野生动物名录》(2023, https://www.forestry.gov.cn/search/509750, 以下简称“三有物种”)。

1.2.2 分布数据

本研究整合研究团队前期研究基础以及中国观鸟记录中心、GBIF和Avibase等数据库记录, 最终整理广州市陆生野生脊椎动物分布点位366,395个, 共涉及540种动物, 以用于后续物种分布模拟。所有点位数据均通过100 m × 100 m网格系统进行标准化处理, 确保同一物种在同一网格内仅保留1个随机点位。

1.2.3 环境数据

选取气候、生境和干扰3类环境变量。为避免变量共线性对模型的影响, 对所有变量均进行Pearson相关性分析, 筛去相关性大于0.8的变量(张琼悦等, 2023), 最终共确定年均气温、气温年变化、年降水量、降水量季节变化、相对湿度、土地类型、土地类型多样性、湿地类型、植被类型、植被覆盖度、水网密度、水网深度、高程、坡度、建筑密度、建筑高度、人口密度、路网密度等18个环境变量纳入后续分布模型分析(附录4, 附录5)。所有环境变量统一重采样至100 m网格分辨率, 确保空间范围、投影和精度一致。针对兽类环境因子的分析不考虑建筑高度指标。所有分析在ArcGIS 10.8中进行。

1.3 物种分布建模

本研究采用MaxEnt模型对物种潜在分布进行模拟。为确保模型精度, 保留稀疏化后点位 ≥20的物种进行潜在分布建模分析, 包括鸟类243种, 兽类8种。两栖爬行类由于点位 ≥ 20的物种均少于5种, 本研究并未对其分布进行建模分析。针对每个物种, 选取75%的出现点作为训练数据, 剩余25%的点作为独立检验数据, 用于评估模型预测精度。模型采用Subsample模式进行10次重复交叉验证, 每次迭代5,000次以确保收敛, 正则化系数保持默认值1, 背景点数量设置为10,000个。模型预测精度通过受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)及曲线下面积(area under curve, AUC)进行评价, 其中AUC在0.9–1.0之间为优秀, 0.8–0.9为良好, 0.7–0.8为一般, 0.6–0.7为较差, 0.5–0.6为失败, 记录10次重复的平均AUC值以反映整体精度(Phillips et al., 2006; Liu et al., 2013)。

为确定物种潜在分布范围, 选择均等测试敏感性和特异性阈值(equal training sensitivity and specificity logistic threshold)模式, 将10次重复的平均阈值作为判别标准, 适宜性大于阈值记为潜在分布, 记为1, 反之记为0。在此基础上, 通过将各物种潜在分布进行叠加得到生物多样性的空间格局, 并利用自然间断点分级法将其划分为5个等级。

1.4 重要栖息地评估体系

1.4.1 指标体系

从生物指标、环境指标和干扰因素3个维度, 构建动物重要栖息地价值评价体系。通过重要物种多样性(国家一级、二级保护野生动物、广东省重点保护陆生野生动物、IUCN红色名录物种的多样性)、物种多样性、河网密度、植被覆盖度(以归一化植被指数表征, normalized difference vegetation index, NDVI)、人口密度和用地性质等6个指标进行量化(表1)。

1.4.2 权重计算

为科学量化各指标的相对重要性, 本研究结合层次分析法和熵值法分别进行主客观赋权。在层次分析法框架下, 本文依据专家调查问卷结果, 对各二级指标进行两两比较, 进而构建判断矩阵(表2), 并计算归一化特征向量确定各指标的主观权重(W_{1i}), 然后通过一致性检验确保判断矩阵具有较好一致性, 可用于后续权重应用与综合评价分析(一致性比率(consistency ratio, CR) = 0.015 < 0.10, 表明判断矩阵具有满意的一致性)。

熵值法基于信息熵理论, 依据指标数据的离散程度确定权重, 分散度越高则对评价体系的贡献越大, 权重也越高, 可避免主观因素影响。将研究区划分为100 m × 100 m的网格单元, 统计各单元内的指标数值进行分析。其公式为:

$$W_{2i} = \frac{1 + \frac{1}{\ln m}\left(\sum_{z=1}^{m} p_{zi} \ln p_{zi}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left[1 + \frac{1}{\ln m}\left(\sum_{z=1}^{m} p_{zi} \ln p_{zi}\right)\right]} \quad (1)$$

式中, W_{2i}为第i个指标的客观权重; p_{zi}为第z个网格单元的第i个指标值占比(%); m为网格单元数量; n为指标数量。

表1　重要栖息地价值的多维度综合评价体系(含生物、环境、干扰维度及其量化指标)

Table 1　A multi-dimensional comprehensive evaluation system for priority habitat value (including biological, environmental, disturbance dimensions and their quantifying indicators)

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	指标说明 Indicator description
生物指标 Biological indicators	物种多样性 Species diversity	连续型指标。基于MaxEnt模型预测的所有物种的潜在空间分布结果叠加 Continuous indicators. Overlay of potential spatial distribution predictions for all species generated by the MaxEnt model
	重要物种多样性 Priority species diversity	连续型指标 Continuous indicators
环境指标 Environmental indicators	河网密度 River network density	连续型指标 Continuous indicators
	植被覆盖度(归一化植被指数) Vegetation cover (normalized difference vegetation index)	连续型指标 Continuous indicators
干扰因素 Disturbance factors	人口密度 Population density	连续型指标 Continuous indicators
	用地性质 Land-use type	离散型指标。人造地表、耕地和裸地赋值为0，林地、草地、灌丛、湿地和水体赋值为0.5，自然保护地赋值为1 Discrete indicators. Artificial surfaces, cropland, and bare land are assigned a value of 0; forest, grassland, shrubland, wetland, and water bodies are assigned a value of 0.5; protected areas are assigned a value of 1

表2　基于层次分析法的二级指标权重判断矩阵

Table 2　Judgement matrix for determining the weights of secondary indicators using the analytic hierarchy process

	重要物种多样性 Priority species diversity	物种多样性 Species diversity	河网密度 River network density	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	人口密度 Population density	用地性质 Land-use type
重要物种多样性 Priority species diversity	1	2	3	3	3	1
物种多样性 Species diversity	1/2	1	2	2	2	1/4
河网密度 River network density	1/3	1/2	1	1	2	1/5
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	1/3	1/2	1	1	3	1/5
人口密度 Population density	1/3	1/2	1/2	1/3	1	1/6
用地性质 Land-use type	1	4	5	5	6	1

重要性评价采用九级量表，标度为1–9；其中1、3、5、7、9分别表示两个指标同等重要，前者比后者稍微重要、比较重要、十分重要、绝对重要，2、4、6、8分别表示处于上述相邻标度之间。当后者相较于前者更为重要时，则以相对标度值的倒数表示反向比较关系。

Importance was evaluated using a nine-point scale (1–9). Specifically, 1, 3, 5, 7, and 9 indicate that the two indicators are equally important, the former is slightly more important, more important, much more important, and absolutely more important than the latter, respectively; 2, 4, 6, and 8 represent intermediate values between adjacent scale levels. When the latter is considered more important than the former, the reciprocal of the relative scale value is used to indicate this reverse relationship.

为兼顾专家经验与数据特征，根据最小相对信息熵原理，用拉格朗日乘数法计算综合权重(潘鑫等, 2024) (表3)。其公式为:

$$W_i = \frac{\sqrt{W_{1i} W_{2i}}}{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{W_{1i} W_{2i}}} \quad (2)$$

式中，W_i为综合权重；W_{1i}和W_{2i}分别为主观和客观权重。

1.5　保护空缺分析

根据综合权重对归一化后的二级指标进行加权叠加，计算得到重要栖息地的综合评价得分。选取热点分析识别置信度大于99%的热点区域，作为备选重要栖息地。结合维持高生物多样性所需的斑块面积阈值均值，进一步筛选面积大于53.3 ha的重

表3　基于最小相对信息熵原理的主客观综合权重

Table 3　Subjective and objective integrated weights based on the principle of minimum relative information entropy

	重要物种多样性 Priority species diversity	物种多样性 Species diversity	河网密度 River network density	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	人口密度 Population density	用地性质 Land-use type
主观权重 Subjective weight	0.195	0.174	0.229	0.061	0.062	0.279
客观权重 Objective weight	0.257	0.131	0.083	0.092	0.055	0.382
综合权重 Synthesized weight	0.230	0.156	0.141	0.077	0.060	0.336

要栖息地(Beninde et al., 2015), 并将其与广州市自然保护地体系进行叠加分析, 包括自然保护区、森林公园、湿地公园、地质公园和风景名胜区, 以识别重要栖息地保护空缺(《广州市自然保护地规划》(2023–2035年), https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/sfbgtwj/content/post_9967140.html)。

2　结果

2.1　广州市陆生野生脊椎动物多样性组成

广州市共记录陆生野生脊椎动物33目134科690种(图1, 附录3)。包括两栖类2目9科39种; 爬行类2目20科93种; 鸟类21目81科470种; 兽类8目24科88种。

本次调查记录到的脊椎动物中, 两栖类包括无尾目7科36种和有尾目2科3种, 其中蛙科最多, 共12种。在生态类型上, 以陆栖静水型为主, 共13种; 其次是流水型10种, 静水型9种, 树栖型5种, 陆栖流水型2种。爬行类包括龟鳖目3科11种和有鳞目17科82种, 其中游蛇科最多, 共19种; 其生态类型以地面型为主, 共61种, 其次是半水栖型12种, 水栖型11种, 树栖型9种。鸟类以雀形目为主, 共228种, 其中鹟科最多, 共44种。居留型以留鸟和冬候鸟为主, 各172种, 其次是夏候鸟54种, 旅鸟50种, 迷鸟22种。生态类群则以鸣禽为主, 共228种, 其次是涉禽90种, 游禽53种, 攀禽42种, 猛禽42种, 陆禽15种。兽类以翼手目为主, 共38种, 其中蝙蝠科最多, 共23种。

在区系组成方面, 广州市陆生脊椎动物以东洋界成分为主, 同时包含古北界成分和广布种, 形成典型的华南地区动物区系特征。其中东洋界成分共计358种, 包括两栖类36种、爬行类86种、鸟类174种和兽类62种; 古北界成分共计171种, 主要为鸟类169种和兽类2种; 广布种共计161种, 包含两栖类3种、爬行类7种、鸟类127种和兽类24种。

广州市内分布国家一级保护野生动物22种, 二级保护野生动物116种; IUCN红色名录极危物种10种, 濒危物种15种; CITES附录I物种15种, 附录II物种61种, 附录III物种15种; 省重点物种95种; 三有物种455种。广州市内分布的中国特有种共33种, 其中两栖类15种、爬行类11种、鸟类3种、兽类4种(表4)。

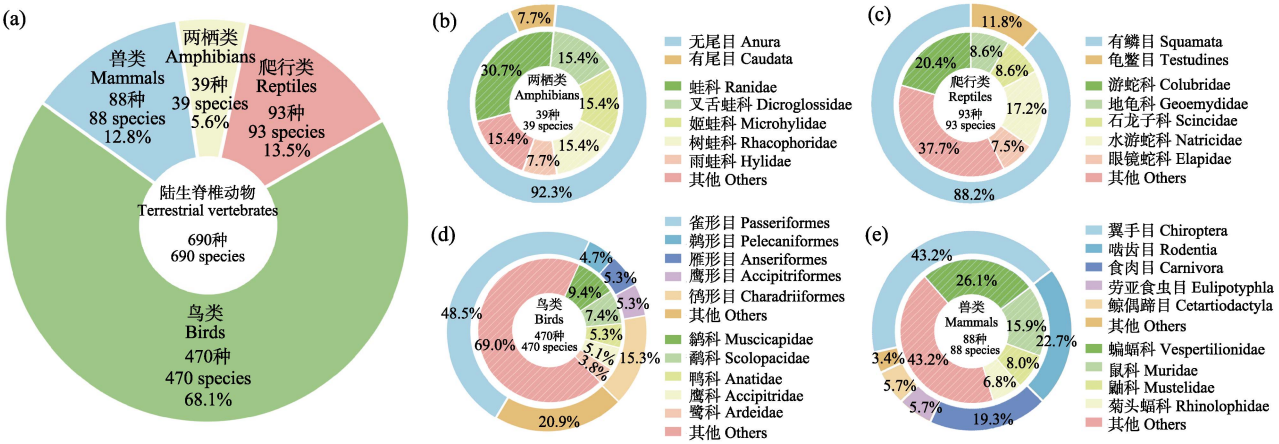


图1　广州市陆生野生脊椎动物多样性组成以及各类群目级和科级组成

Fig. 1　Wild terrestrial vertebrate diversity and order- and family-level composition of each taxonomic group of Guangzhou

表4　广州市陆生野生脊椎动物受保护与濒危现状统计

Table 4　Analysis of the conservation and endangerment status of wild terrestrial vertebrates in Guangzhou

保护级别 Protection level	两栖类 Amphibians	爬行类 Reptiles	鸟类 Birds	兽类 Mammals	合计 Total
国家一级 National Class I	–	–	18	4	22
国家二级 National Class II	4	17	86	9	116
IUCN极危 IUCN CR	1	5	3	1	10
IUCN濒危 IUCN EN	1	5	8	1	15
CITES附录I CITES Appendix I	1	1	8	5	15
CITES附录II CITES Appendix II	1	12	46	2	61
CITES附录III CITES Appendix III	–	2	5	8	15
省重点 Provincial key protected species	–	4	84	7	95
三有物种 Species with “Three Values”	9	71	356	19	455
中国特有 China-endemic	15	11	3	4	33

国家一级、国家二级: 《国家重点保护野生动物名录》(2021)一级和二级保护野生动物; IUCN极危、IUCN濒危: 《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》(2025-2)极危和濒危物种; CITES附录I、CITES附录II、CITES附录III: 《濒危野生动植物种国际贸易公约》(2023)附录I、II、III物种; 省重点: 《广东省重点保护陆生野生动物名录》(2021)物种; 三有物种: 《有重要生态、科学、社会价值的陆生野生动物名录》(2023)物种。

National Class I, National Class II, List of Key Protected Wild Animals in China (2021), Class I and II nationally protected wild animals; IUCN CR, IUCN EN, IUCN Red List of Threatened Species (as of February 2025), Critically Endangered and Endangered species; CITES Appendix I, CITES Appendix II, CITES Appendix III, Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (2023 version), species listed in Appendices I, II, and III; Provincial key protected species, Species listed in the List of Key Protected Terrestrial Wild Animals of Guangdong Province (2021); Species with “Three Values”, Species listed in the List of Terrestrial Wild Animals with Important Ecological, Scientific, and Social Values (2023).

2.2　广州市陆生野生脊椎动物分布

广州市物种多样性高值区呈片状分布特征(图2), 主要集聚于北部从化山地、东部增城山地与农田以及南部南沙湿地, 中部白云山、帽峰山、凤凰山与海珠湿地等零星分布着中高值区。从类群组成来看, 鸟类由于占据陆生脊椎动物数量的绝大部分, 因此其多样性高值区与整体多样性格局表现出较高一致性。兽类多样性高值区主要集中在从化北部山地, 并在花都北部王子山地以及中部白云山、帽峰山、凤凰山丘陵地带存在中高值区。重要物种多样性高值区与整体物种多样性高值区大体一致。

2.3　重要栖息地与保护空缺

广州市栖息地重要性较高区域包括从化北部山地、增城北部山地、花都北部山地、中部白云、帽峰、凤凰山地以及南部南沙湿地。热点分析与面积筛选后共确定广州市陆生野生脊椎动物重要栖息地24处, 总面积1,299.5 km^2 (附录6)。包括北部流溪河-陈禾洞-石门栖息地(549.7 km^2), 主要保护物种有中华穿山甲、猕猴(*Macaca mulatta*)、豹猫、斑林狸(*Prionodon pardicolor*)、黄嘴角鸮(*Otus spilocephalus*)、蟒(*Python bivittatus*)等; 东部白水寨-大东坑栖息地(216.4 km^2)主要分布有豹猫、白眉山鹧鸪(*Arborophila gingica*)、领角鸮(*Otus lettia*)、蟒等; 中部帽峰山-凤凰山栖息地(81.0 km^2)主要分布有豹猫、白鹇(*Lophura nycthemera*)、赤腹鹰(*Accipiter soloensis*)、领角鸮等; 南部南沙湿地栖息地(48.7 km^2)主要分布有黑脸琵鹭(*Platalea minor*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)、小青脚鹬(*Tringa guttifer*)、白腹鹞(*Circus spilonotus*)等。

现有保护地覆盖了约1,078.9 km^{2}的重要栖息地, 保护占比达83.0%。然而, 仍存在约220.6 km^{2}的保护空缺。其用地性质以森林、农田和水域为主, 分别占74.43%、14.50%和8.59%。这些空缺片状分布于从化区东北部和南沙区南部, 零星分布于增城区中部, 占重要栖息地总面积的17.0% (图3)。

3　讨论

3.1　广州市陆生野生脊椎动物资源与分布

城市生物多样性基础数据如编目、分布等是保护管理的基石。然而, 目前国内大中城市的生物多样性基础数据大多存在着覆盖不全, 数据零散、更新滞后等问题, 难以满足精准管理决策的需要。本研究通过对多源数据进行了系统梳理, 共记录到广州市陆生野生脊椎动物690种。在复核现有611种记录的基础上(胡慧建等, 2023), 核减无效记录21种

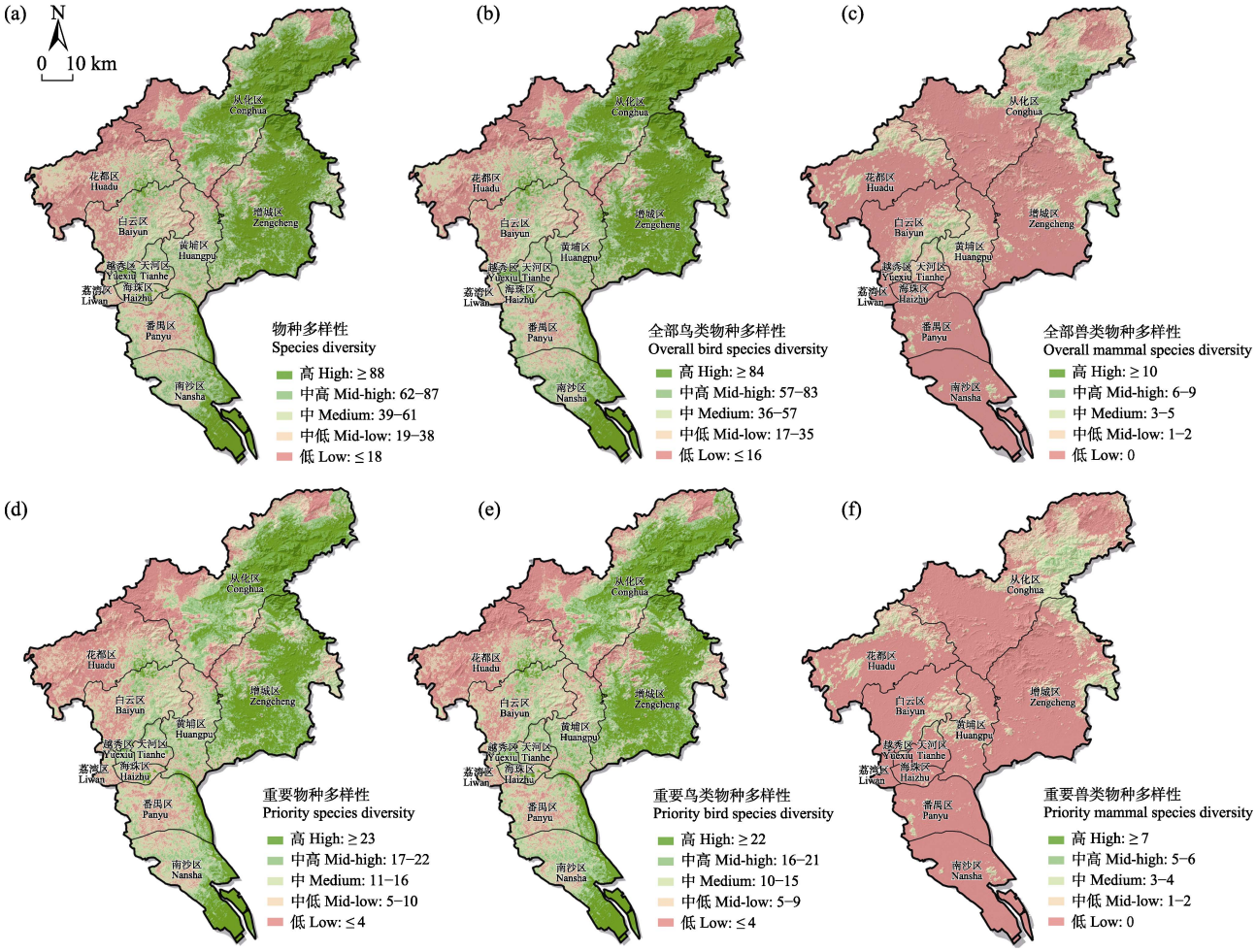


图2　广州市陆生野生脊椎动物的物种多样性分布格局。(a)全部物种; (b)鸟类; (c)兽类; (d)全部重要物种; (e)重要鸟类; (f)重要兽类。

Fig. 2　Species diversity distribution pattern of terrestrial wild vertebrates in Guangzhou. (a) All species; (b) Birds; (c) Mammals; (d) All priority species; (e) Priority birds; (f) Priority mammals.

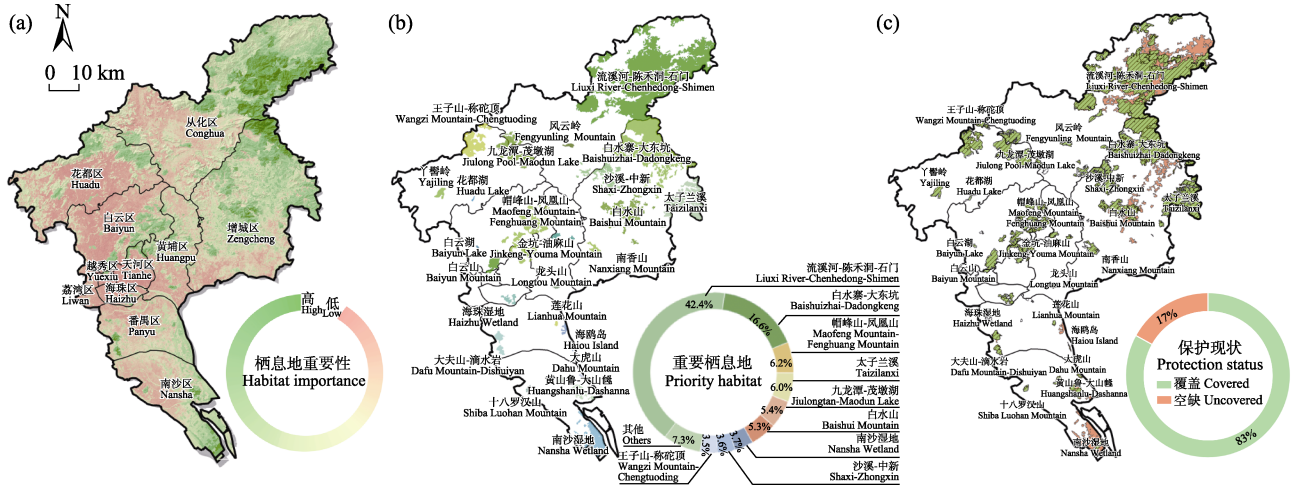


图3　广州市陆生野生脊椎动物的栖息地重要性评价(a)、重要栖息地范围(b)以及保护现状(c)

Fig. 3　Habitat importance assessment (a), distribution of priority habitats (b), and protection status (c) for terrestrial wild vertebrates in Guangzhou

(附录7), 实际新增物种100种, 主要集中在鸟类雀形目(如铁爪鹀*Calcarius lapponicus*)、兽类翼手目(如大菊头蝠*Rhinolophus luctus*)以及鸟类鸻形目(如灰尾漂鹬*Tringa brevipes*), 其中香港湍蛙(*Amolops hongkongensis*)、黑脊蛇(*Achalinus spinalis*)、白头鹤(*Grus monacha*)、利安德水鮫(*Chimarrogale leander*)等为近年来广州地区新记录。值得注意的是, 广州市新增的物种里, 有一定比例(42%)来源于网络数据集, 表明公民科学数据的重要性正日益凸显(Chandler et al., 2017; Tiago et al., 2024), 这不仅是生物多样性基础数据来源的重要扩充, 更代表着生物多样性监测范式的深刻变革(Rivera et al., 2024; Ziliaskopoulos & Laspidou, 2024)。

广州690种陆生野生脊椎动物资源处于我国省会城市与超大城市前列(如杭州696种, 北京625种, 深圳568种)。这主要得益于广州地处南亚热带, 境内涵盖了丘陵、森林、湿地、水域等多种生态系统, 形成了高度异质化的栖息环境, 从而为各类野生动物提供了丰富的生态位和良好的生存条件。然而, 与大多数高度城市化地区一样[①], 广州在中大型兽类等食物链顶层物种上存在明显缺失。20世纪中后期以来, 历史上曾在广州地区有分布记录的部分大型和中大型兽类已长期未见, 而近20年来连续开展的本底调查结果进一步揭示了群落结构的变化趋势。相比2007年第一次本底调查记录的46种兽类, 2017年调查虽在翼手目等小型类群上新增了多种蝙蝠, 如皮氏菊头蝠(*Rhinolophus pearsonii*)、大帝蝠(*Hipposideros armiger*)等, 但包括赤狐(*Vulpes vulpes*)、亚洲狗獾(*Meles leucurus*)、大灵猫(*Viverra zibetha*)、食蟹獴(*Herpestes urva*)、小麂(*Muntiacus reevesi*)、水鹿(*Rusa unicolor*)等在内的14种兽类未被记录到; 同时, 貉(*Nyctereutes procyonoides*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)、欧亚水獭(*Lutra lutra*)、云豹(*Neofelis nebulosa*)、中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)等文献曾记载在广州有分布的物种在两次调查中均未发现。快速城市化导致连续大片栖息地被切割为多个孤立斑块, 自然湖泊湿地、原生林地不断萎缩, 持续削弱了对生境质量和连通性要求较高的中大型兽类的生存环境。2000–2020年间, 广州市建筑用地面积显著增加, 而林地和湿地面积则持续减少, 景观呈现出高度破碎化的格局, 这一趋势已在以鸟类群落为对象的2023年广州本底调查研究中得到系统量化和验证。这类城市化驱动下的景观破碎化和栖息地丧失, 对中大型兽类的影响更为直接和深远: 即便目前仍可在城郊森林公园中记录到部分中型兽类, 如豹猫、鼬獾(*Melogale moschata*)等, 但其分布主要局限于北部山地和干扰相对较小的丘陵林地, 在道路密集、建设强度较高区域的记录频次和分布范围均呈下降趋势。这些物种在试图跨越公路时更易发生路杀(Wu et al., 2023), 或因进入人类社区觅食而被捕捉、驱赶甚至毒杀。与此同时, 由于缺乏有效、连续、安全的生态廊道连接, 来自周边山地的个体难以及时补充城市内部衰退的种群, 一旦局地种群消失, 恢复的难度将显著增加。

广州市陆生野生脊椎动物资源总体呈现东高西低格局, 生物多样性热点集中在从化北部、增城丘陵林地与农田、南沙沿海等区域, 与广州城市化梯度及生境类型高度相关(McKinney, 2008; Filloy et al., 2019)。其中, 鸟类多样性热点与整体格局高度一致。鉴于鸟类在陆生脊椎动物中种类和数量上占优势, 且其具有较强的移动能力和较广的生态幅, 能够利用从自然山地到城市绿地在内的多种生境, 故其分布更能综合反映区域环境的整体质量(Bonier et al., 2007; Concepción et al., 2015)。相比之下, 兽类(尤其是对生境要求严格的中大型兽类)则更依赖于受干扰少、连通性好的大型森林斑块(Paviolo et al., 2016), 因而其热点高度集中于从化北部山地, 对生境破碎化更为敏感。

3.2 广州市陆生野生脊椎动物重要栖息地

当前, 广州市已列入《陆生野生动物重要栖息地名录(第一批)》的两处栖息地——南沙十八涌湿地与海珠湿地, 在构建全域性保护网络方面存在明显局限。一方面, 两者同属于湿地生态系统, 主要保护对象以水鸟为主, 未能满足广州“山、水、城、田、海”复杂多样的地理单元下, 大量依赖森林、灌丛、溪流等生境的陆生野生动物(如多种猛禽、两栖爬行动物、林鸟等)的保护需求。另一方面, 这两处湿地均被超高密度城市建成区包围, 生态连通性受阻, 无法形成覆盖全市域、多功能性的有效保护网

① Haverland MB (2014) Examining the Effects of Urbanization on Occurrence of Mammal Species in Natural Areas of the Eastern Edwards Plateau. Master's thesis, Texas State University, San Marcos.

络(Opdam & Steingröver, 2008)。

因此, 本研究判别的24处广州市陆生野生脊椎动物重要栖息地可作为未来国家级重要栖息地的重要补充及候选。这24处重要栖息地囊括了广州市北部山地森林、中部的丘陵林地到南部的滨海湿地, 对完善广州市野生动物栖息地保护体系具有重要意义。其中, 东北部的流溪河-陈禾洞-石门栖息地与白水寨-大东坑栖息地代表了广州最完整、最连片的亚热带常绿阔叶林生态系统, 不仅是广州生物多样性热点区域, 同时亦是粤港澳大湾区北部重要的生态屏障, 构成了广州乃至大湾区生态廊道的枢纽。这里不仅为许多大中型兽类, 如赤麂(*Muntiacus vaginalis*)、鬣獾、马来豪猪(*Hystrix brachyura*)和众多濒危保护森林鸟类, 如黄嘴角鸮, 提供了关键的栖息地, 更通过连绵的森林为野生动物的南北迁徙与扩散提供了天然通道。中部帽峰山-凤凰山、白水山等栖息地虽然处于城市建成区内, 受到一定人为干扰, 但依然保存了较好的南亚热带季风常绿阔叶林, 是城市中心不可多得的野生动物避难所, 亦是许多内陆森林候鸟迁徙路线上的节点(Yong et al., 2015)。南部南沙湿地、海鸥岛等栖息地则是广州作为东亚-澳大利西亚候鸟迁飞通道节点的关键栖息地(Xia et al., 2017), 是黑脸琵鹭、东方白鹳、白琵鹭等多种保护旗舰物种的核心分布区。此外, 市内大夫山-滴水岩、黄山鲁-大山嵎、风云岭等栖息地, 尽管面积无法与北部的大型森林或南部的广阔湿地相比, 但其保留的森林斑块在高度城市化环境中发挥着重要“生态踏脚石”的作用, 是栖息地连通性的重要基础, 对整体栖息地网络具有不可替代的作用。除本研究识别的24处重要栖息地外, 广州市建成区内仍存在若干生物多样性较为集中的绿地斑块, 如浔峰岗、火炉山、华南植物园及中山大学、华南农业大学等校园绿地。尽管其面积细小, 但在维持建成区生物多样性以及栖息地连通性上具有重要作用。因此建议将这些绿地斑块纳入“生物多样性保护节点”体系, 通过栖息地质量提升与生境连通性修复, 强化其作为城市栖息地网络“踏脚石”的功能, 以弥补保护地外生物多样性保护的不足, 为完善网络化保护格局提供重要补充。

3.3 建议与展望

当前广州市自然保护地虽已覆盖83.0%的重要栖息地, 但仍存在约220.6 km^2的保护空缺, 主要分布于从化区东北部与南沙区南部。对于从化区东北部连片空缺区域, 可依托现有流溪河-陈禾洞-石门栖息地的保护基础, 适当扩大保护范围, 重点保护中华穿山甲、豹猫等中大型兽类的迁徙与繁殖通道; 南沙区南部空缺区域作为东亚-澳大利西亚候鸟迁飞通道的关键补充节点, 可结合滨海湿地修复工程, 增设湿地类型自然保护小区, 重点保护黑脸琵鹭、小青脚鹬等水鸟的觅食与停歇生境。针对中部区域, 包括增城区中部的零星空缺以及帽峰山-凤凰山-白云山周边的栖息地破碎化问题, 可通过植被恢复、地形改造、交通设施生态化改造(如生态桥、动物通道)等措施, 以关键生态节点为依托, 建设连接重要栖息地与周边保护区、森林、湿地公园、农田及城市绿地的生物廊道网络, 从而提升栖息地连通性, 促进城市中心区物种的自然迁移与种群恢复。

在监测手段与治理模式方面, 未来可在现有实践基础上进一步拓展和深化, 以支撑广州市生物多样性长期、精细化管理: 构建全市智能监测网络, 充分应用人工智能与现代信息技术, 通过视频、声纹、物候设备以及无人机、卫星跟踪等技术协同, 构建多层次、全方位的野生动植物监测网络, 覆盖森林、湿地、河流等主要生态系统类型, 实现野生动物种群及栖息地的动态变化的持续性、智能化监测。尤其针对两栖爬行类物种, 根据其对溪流、岩石堆、枯木堆等微生境的特殊依赖性, 增加调查频次与样点覆盖, 采用环境DNA、红外相机等技术提升物种发现率。搭建公民科学参与平台, 形成“专业调查 + 公众观测”的协同监测模式, 开发轻量化观测APP, 简化记录流程, 鼓励市民在公园、绿地、社区周边发现野生动物时即时记录, 记录数据经专家审核后录入数据库, 确保数据准确性。定期发布公民科学数据贡献报告, 公示有效数据来源与应用成果(如新增观测点位、补充物种分布信息), 增强公众参与获得感。

4 结论

本研究基于2005、2017和2023年3次广州市陆生野生脊椎动物本底调查, 并整合文献记录、出版专著、新闻资讯及公民科学平台等多源信息, 系统梳理了广州市陆生野生脊椎动物多样性及其重要

栖息地格局。广州市共记录物种33目134科690种, 在我国省会城市和超大城市中物种数处于前列。

物种多样性空间分布呈“东高西低”特征, 热点区域主要分布于北部从化山地、东部增城丘陵农田以及南部南沙滨海湿地。依据国家相关技术规范与评价标准, 共识别出了24处陆生野生脊椎动物重要栖息地, 基本串联起广州市北部山地森林、中部丘陵林地和南部滨海湿地, 在一定程度上弥补了现有名录中湿地类型占比偏高、难以全面覆盖“山、水、城、田、海”等多类型生态系统的不足。

然而, 在中大型兽类关键栖息地、城市中部生态廊道节点以及部分滨海湿地仍存在保护空缺和管理薄弱环节。整体来看, 广州具备良好的城市生物多样性基础和生态格局。未来建议通过进一步优化保护地布局、加强栖息地连通性和完善监测治理体系, 逐步构建更加系统、韧性更强的城市野生动物保护网络。

致谢: 感谢广东省野生动物调查监测与生态修复工程技术研究中心对本研究的支持; 同时感谢广东省科学院动物研究所张春兰、袁倩敏、张琼悦、周智鑫、柯培峰、黄志文、张亮、覃海华和池鸿健对物种数据核查工作的协助。

ORCID

梁健超 https://orcid.org/0000-0001-9311-0150
陈淑甜 https://orcid.org/0000-0003-2704-3548
许镇洲 https://orcid.org/0009-0000-7630-3399

参考文献

Alberti M (2016) Cities that Think like Planets: Complexity, Resilience, and Innovation in Hybrid Ecosystems. University of Washington Press, Seattle.

Beninde J, Veith M, Hochkirch A (2015) Biodiversity in cities needs space: A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. Ecology Letters, 18, 581–592.

Bonier F, Martin PR, Wingfield JC (2007) Urban birds have broader environmental tolerance. Biology Letters, 3, 670–673.

Chandler M, See L, Copas K, Bonde AMZ, López BC, Danielsen F, Legind JK, Masinde S, Miller-Rushing AJ, Newman G, Rosemartin A, Turak E (2017) Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. Biological Conservation, 213, 280–294.

Concepción ED, Moretti M, Altermatt F, Nobis MP, Obrist MK (2015) Impacts of urbanisation on biodiversity: The role of species mobility, degree of specialisation and spatial scale. Oikos, 124, 1571–1582.

Editorial Board of Guangzhou Statistical Yearbook 2024 (2024) Guangzhou Statistical Yearbook 2024. China Statistics Press, Beijing. (in Chinese) [《广州统计年鉴2024》编辑委员会 (2024) 广州统计年鉴2024. 中国统计出版社, 北京.]

Filloy J, Zurita GA, Bellocq MI (2019) Bird diversity in urban ecosystems: The role of the biome and land use along urbanization gradients. Ecosystems, 22, 213–227.

Guo JH, Guo TT, Jiang ZL (2024) Digitalization and application suggestions for “Multi-Level Engagement and Benefit” of biodiversity. Research of Environmental Sciences, 37, 2333–2340. (in Chinese with English abstract) [郭俊华, 郭婷婷, 蒋智林 (2024) 生物多样性“多产泛融多方惠益”数字化体系构建及应用建议. 环境科学研究, 37, 2333–2340.]

Hu HJ, Zhang CL, Zhang L, Liang JC (2023) Resources of Terrestrial Wild Vertebrates in Guangdong Province: Guangzhou Volume. Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [胡慧建, 张春兰, 张亮, 梁健超 (2023) 广东省陆生野生脊椎动物资源: 广州篇. 广东科技出版社, 广州.]

Liu CR, White M, Newell G (2013) Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. Journal of Biogeography, 40, 778–789.

McKinney ML (2008) Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. Urban Ecosystems, 11, 161–176.

Niemelä J (2011) Urban ecology: Patterns, processes, and applications. Oxford Biology, 100, 44–47.

O’Connor LMJ, Pollock LJ, Renaud J, Verhagen W, Verburg PH, Lavorel S, Maiorano L, Thuiller W (2021) Balancing conservation priorities for nature and for people in Europe. Science, 372, 856–860.

Opdam P, Steingröver E (2008) Designing metropolitan landscapes for biodiversity: Deriving guidelines from metapopulation ecology. Landscape Journal, 27, 69–80.

Pan X, Zhang SW, Shen YF (2024) Study on the evolution of urban spatial performance and system coordination in Yangtze River Delta Region. Shanghai Urban Planning Review, (3), 134–142. (in Chinese with English abstract) [潘鑫, 张尚武, 沈逸菲 (2024) 长三角地区城市空间绩效与系统协调性演变研究. 上海城市规划, (3), 134–142.]

Paviolo A, Angelo CD, Ferraz KMPMB, Morato RG, Martinez Pardo J, Srbek Araujo AC, Beisiegel BDM, Lima F, Sana D, Xavier da Silva M, Velázquez MC, Cullen L, Crawshaw P, Jorge MLSP, Galetti PM, Di Bitetti MS, de Paula RC, Eizirik E, Aide TM, Cruz P, Perilli MLL, Souza ASMC, Quiroga V, Nakano E, Ramírez Pinto F, Fernández S, Costa S, Moraes EA, Azevedo F (2016) A biodiversity hotspot losing its top predator: The challenge of jaguar conservation in the Atlantic Forest of South America. Scientific Reports,

6, 37147.

Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190, 231–259.

Rivera K, Fidino M, Lehrer EW, Torsey HR, Allen S, Trouille L, Magle SB (2024) Optimizing community science contributions in ecology: A case study on Zooniverse's 'Chicago wildlife watch'. Biological Conservation, 292, 110490.

Shanahan DF, Fuller RA, Bush R, Lin BB, Gaston KJ (2015) The health benefits of urban nature: How much do we need? BioScience, 65, 476–485.

Sheard JK, Sanders NJ, Gundlach C, Schär S, Larsen RS (2020) Monitoring the influx of new species through citizen science: The first introduced ant in Denmark. PeerJ, 8, e8850.

Tiago P, Leal AI, Rosário IT, Chozas S (2024) Discovering urban nature: Citizen science and biodiversity on a university campus. Urban Ecosystems, 27, 1609–1621.

Wang HY, Wang HQ, Chen XY, Han BL, Shu CJ, Zhang T, Ding SY (2023) Review on evaluation and enhancement of urban biodiversity. Acta Ecologica Sinica, 43, 2995–3006. (in Chinese with English abstract) [王海洋, 王浩琪, 陈禧悦, 韩宝龙, 束承继, 张童, 丁仕宇 (2023) 国内外城市生物多样性评价与提升研究综述. 生态学报, 43, 2995–3006.]

Wang K, Ren JL, Chen HM, Lyu ZT, Guo XG, Jiang K, Chen JM, Li JT, Guo P, Wang YY, Che J (2020) The updated checklists of amphibians and reptiles of China. Biodiversity Science, 28, 189–218. (in Chinese with English abstract) [王凯, 任金龙, 陈宏满, 吕植桐, 郭宪光, 蒋珂, 陈进民, 李家堂, 郭鹏, 王英永, 车静 (2020) 中国两栖、爬行动物更新名录. 生物多样性, 28, 189–218.]

Wilson JW, Sexton JO, Jobe RT, Haddad NM (2013) The relative contribution of terrain, land cover, and vegetation structure indices to species distribution models. Biological Conservation, 164, 170–176.

Wu Q, Sun TZ, Zhao YM, Yu C, Hu JH, Li ZQ (2023) Temporal and spatial patterns of small vertebrate roadkill in a supercity of eastern China. PeerJ, 11, e16251.

Wu ZH, Ding ZF, Zhou ZX, Liang JC, Wang ZT, Zhang YN, Hu YM, Hu HJ (2023) Development status and document analysis: A review on terrestrial vertebrate field surveys in China. Biodiversity Science, 31, 22363. (in Chinese with English abstract) [吴政浩, 丁志锋, 周智鑫, 梁健超, 王卓婷, 章亚宁, 胡一鸣, 胡慧建 (2023) 中国陆生脊椎动物野外调查的发展现状与文献分析. 生物多样性, 31, 22363.]

Xia SX, Yu XB, Millington S, Liu Y, Jia YF, Wang LZ, Hou XY, Jiang LG (2017) Identifying priority sites and gaps for the conservation of migratory waterbirds in China's coastal wetlands. Biological Conservation, 210, 72–82.

Xiao ZS, Li XY, Xiang ZF, Li M, Jiang XL, Zhang LB (2017) Overview of the Mammal Diversity Observation Network of Sino BON. Biodiversity Science, 25, 237–245. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李学友, 向左甫, 李明, 蒋学龙, 张礼标 (2017) 中国兽类多样性监测网的建设规划与进展. 生物多样性, 25, 237–245.]

Xu HG, Cao MC, Wu Y, Cai L, Cao Y, Wu J, Lei JC, Le ZF, Ding H, Cui P (2016) Disentangling the determinants of species richness of vascular plants and mammals from national to regional scales. Scientific Reports, 6, 21988.

Yong DL, Liu Y, Low BW, Española CP, Choi CY, Kawakami K (2015) Migratory songbirds in the East Asian-Australasian Flyway: A review from a conservation perspective. Bird Conservation International, 25, 1–37.

Yu DM, Deng SQ, Liu YZH, Ruan XD, Hu HJ (2024) Experiences and prospects for national survey of terrestrial wildlife resources in China. Chinese Journal of Applied Ecology, 35, 2006–2012. (in Chinese with English abstract) [于冬梅, 邓诗泉, 刘源志弘, 阮向东, 胡慧建 (2024) 全国性陆生野生动物资源调查的经验总结与思考. 应用生态学报, 35, 2006–2012.]

Zhang QY, Deng ZD, Hu XB, Ding ZF, Xiao RB, Xiu C, Wu ZH, Wang G, Han DH, Zhang YK, Liang JC, Hu HJ (2023) The impact of urbanization on regional bird distribution and habitat connectivity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Biodiversity Science, 31, 22161. (in Chinese with English abstract) [张琼悦, 邓卓迪, 胡学斌, 丁志锋, 肖荣波, 修晨, 吴政浩, 汪光, 韩东晖, 张语克, 梁健超, 胡慧建 (2023) 粤港澳大湾区城市化进程对区域内鸟类分布及栖息地连通性的影响. 生物多样性, 31, 22161.]

Zhang RZ (2011) Zoogeography of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]

Zheng GM (2023) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 4th edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2023) 中国鸟类分类与分布名录(第四版). 科学出版社, 北京.]

Ziliaskopoulos K, Laspidou C (2024) Using remote-sensing and citizen-science data to assess urban biodiversity for sustainable cityscapes: The case study of Athens, Greece. Landscape Ecology, 39, 9.

Zou FS, Ye GF (2016) A Checklist of the Distribution of Terrestrial Vertebrates in Guangdong. Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [邹发生, 叶冠锋 (2016) 广东陆生脊椎动物分布名录. 广东科技出版社, 广州.]

(责任编委: 刘阳　责任编辑: 闫文杰)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025422



附录1　广州市陆生野生脊椎动物资源本底调查样线分布

Appendix 1　Distribution of survey transects for the baseline investigation of wild terrestrial vertebrate resources in Guangzhou

附录2　广州市陆生野生脊椎动物资源编目数据来源

Appendix 2　Data sources for the inventory of wild terrestrial vertebrate resources in Guangzhou

数据类型 Data type	数据来源 Data source
专著（6）	[1]. 邹发生, 叶冠锋 (2016) 广东陆生脊椎动物分布名录. 广东科技出版社, 广州. [2]. 胡慧建, 张春兰, 张亮, 梁健超 (2023) 广东省陆生野生脊椎动物资源·广州篇. 广东科技出版社, 广州. [3]. 胡慧建, 张亮, 谢炎晃, 周智鑫 (2023) 广州市增城区陆生野生动物资源. 广东科技出版社, 广州. [4]. 张亮, 王建荣, 胡慧建, 朱永钊 (2019) 广东从化陈禾洞省级自然保护区野生动物资源. 南方日报出版社, 广州. [5]. 海珠湿地管理办公室, 广东省科学院动物研究所 (2015) 海珠湿地鸟类. 南方日报出版社, 广州. [6]. 廖宝文, 吴敏, 粟娟, 管伟, 李玫, 陈玉军 (2013) 南沙湿地环境与生物多样性. 广东科技出版社, 广州.
报告（13）	[7]. 广州市林业和草原局, 广州市野生动植物保护管理办公室, 广东省科学院动物研究所, 中国科学院华南植物园, 中南林业科技大学 (2007) 广州市陆生野生动物资源本底调查报告. [8]. 广东省科学院动物研究所 (2020) 广州市陆生野生动物资源本底调查报告. [9]. 广东省科学院动物研究所 (2024) 广州市鸟类生物多样性调查与评估项目 2024 年繁殖季调查报告. [10].广东省科学院动物研究所 (2024) 全国越冬水鸟同步监测 2024 年(广东省). [11].广州市林业和园林局 (2022) 广州市城市森林生态效益监测、分析与研究项目验收技术报告. [12].广东省科学院动物研究所 (2023) 番禺区陆生野生动物调查报告. [13].广州市规划和自然资源局白云区分局, 希言自然资源科技(广州)有限公司 (2023) 广州市白云区野生动植物资源本底调查报告. [14].广州市林业和园林局 (2022) 广州增城大东坑次生林地方级自然保护区总体规划(2021–2030 年). [15].广东省科学院动物研究所 (2023) 天河区陆生野生动物调查报告. [16].广东省科学院动物研究所 (2024) 基于 beta 多样性动态解构的广州鸟类群落组成时空演变与驱动机制研究. [17].中大翼镜社团 (2024) 中山大学鸟类名录 5.0. [18].吴凡. 华南理工鸟类图鉴与检索. https://www.renrendoc.com/paper/238087237.html [19].广州野鸟 (2025) 广州市野生鸟类名录 v3.1.
文献	[20].常弘, 陈仁先, 粟娟, 肖嘉杰, 廖宝文, 张国萍 (2007) 广州新垦红树林湿地鸟类多样性与生境分析. 四川动物, 26, 561–565.

数据类型 Data type	数据来源 Data source
（**56**）	[21].常弘, 陈仁先, 粟娟, 肖嘉杰, 廖宝文, 张国萍 (2008) 广州新垦红树林湿地鸟类群落多样性及生物量. 城市环境与城市生态, 21(2), 17–21. [22].常弘, 廖宝文, 粟娟, 管伟 (2011) 2005～2009 年广州南沙湿地鸟类的群落结构及数量动态. 四川动物, 30, 124–130. [23].常弘, 陈仁先, 粟娟, 张国平, 张国萍, 管伟 (2012) 广州南沙红树林湿地鸟类群落多样性(2005～2010). 应用与环境生物学报, 18, 30–34. [24].常弘, 廖宝文 (2009) 广州市南沙湿地公园的鸟类多样性与禽流感监控. 湿地科学与管理, 5(1), 64–65. [25].常弘, 彭友贵 (2005) 广州南沙湿地鸟类群落组成、多样性和保护策略. 生态环境, 14, 242–246. [26].常弘, 粟娟, 廖宝文, 彭瑾瑜, 付艳艳 (2006) 广州新垦红树林湿地鸟类多样性动态研究. 生态科学, 25(1), 4–7. [27].崔融丰 (2007) 黄眉姬鹟琉球亚种在中国大陆的新纪录(雀形目, 鹟科). 动物分类学报, 32, 492–494. [28].邓诗泉, 于冬梅, 刘源志弘, 黄源欣, 李爱英 (2024) 南沙湿地重点保护鸟类物种多样性动态分析. 林业与环境科学, 40(3), 26–32. [29].邓卓迪, 丁志锋, 曾小悦, 张春兰, 李孝恩, 何子晴, 梁健超, 胡慧建 (2023) 广州城市绿地景观特征及其对鸟类多样性的影响. 四川动物, 42, 568–582. [30].范存祥, 林志斌, 钟文 (2020) 海珠湿地生态监测体系构建. 湿地科学与管理, 16(2), 61–64. [31].葛研, 王海京, 潘紫生, 肖绍军, 龚世平 (2012) 广州白云山风景区两栖爬行动物调查. 四川动物, 31, 147–151. [32].郭恒松, 齐玉杰, 范存祥, 马超楠, 陈燕明 (2023) 广州海珠湖湖心岛生态修复工程植物与鸟类多样性变化研究. 江西农业学报, 35(2), 162–167. [33].何芬奇, 林剑声, 杨斌, 江航东, 张浩辉 (2006) 中华秋沙鸭在中国的近期越冬分布与数量. 动物学杂志, 41(5), 5. [34].洪维 (2012) 广东莲花顶森林公园生物多样性现状及其保护对策. 广东林业科技, 28(4), 66–69. [35].胡君梅, 丁志锋, 王玲, 杨道德, 胡慧建 (2017) 广州城市绿地鸟类物种多样性的时空变化. 野生动物学报, 38, 44–51. [36].黄元, 王波, 黄俊杰, 袁倩敏, 陈晓凡, 王晓虎, 王刚 (2024) 从化无规定马属动物疫病区及缓冲区鸟类多样性研究. 林业与环境科学, 40(2), 109–121. [37].黄源欣, 李梦婷, 胡慧建, 袁倩敏, 梁健超, 李玫, 廖宝文 (2023) 广州南沙湿地公园鸟类 2014–2018 年际动态及其对生境变化的响应. 热带地理, 43(1), 71–87.

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	[38].李慧, 洪永密, 邹发生, 张强, 黄俊辉 (2008) 广州市中心城区公园鸟类多样性及季节动态. 动物学研究, 29, 203–211. [39].李玫, 陈桂珠, 彭友贵 (2009) 广州南沙湿地生物多样性现状及其保护. 防护林科技, (3), 46–48. [40].连军豪 (2009) 广州首次陆生野生动植物资源本底调查研究. 广东科技, 18(21), 84–86. [41].梁易天, 柯华煜, 肖永豪, 周宇桐, 李海生 (2023) 广州大观湿地公园中的鸟类食源植物研究. 湿地科学, 21, 323–330. [42].罗泽寰 (2018) 广州地区两栖爬行动物分布及生态初探. 畜禽业, 29(12), 55–56. [43].彭涛, 彭聪, 沈丹, 梁卓粤, 彭南秀, 胡永辉, 张海明, 张海冰, 朱光剑, 原丽红, 陈金平 (2011) 广州亚运无马疫区病媒动物调查. 中国动物检疫, 28(7), 48–50. [44].乔亮, 施泽荣 (2014) 广州白云机场鸟情调查及鸟撞风险分析. 科学技术与工程, 14(3), 7–11. [45].宋卫, 林厚炳, 陈胤瑜, 于洋, 梁慧懿, 刘跃明, 郭郁华, 邹海滨, 黎子强, 李小文 (2013) 珠江水域广州口岸鼠形动物本底调查. 中国国境卫生检疫杂志, 36(4), 252–256, 264. [46].孙业康 (2025) 广州火炉山森林公园鸟类群落结构和多样性调查. 中南农业科技, 46(2), 127–131, 147. [47].唐虹, 冯永军, 刘金成, 梁健超, 毕肖峰, 范存祥, 胡慧建, 杨锡涛 (2018) 广州海珠湿地生态修复过程中的鸟类多样性研究. 野生动物学报, 39(1), 86–91. [48].唐璇, 陈泽茹, 余文华, 宁咏梅, 吴毅, 邹发生 (2018) 广州帽峰山森林公园鸟类物种多样性调查. 广州大学学报(自然科学版), 17(4), 52–57. [49].佟富春, 陆红璇, 袁千允, 孙颖, 莫晓东, 邓适彦, 彭友贵 (2023) 华南农业大学校园鸟类多样性分析. 福建林业科技, 50(2), 70–76. [50].佟富春, 孙冰 (2007) 广州市南沙黄山鲁森林公园鸟类调查初报. 广东林业科技, 23(6), 56–60. [51].佟富春, 肖以华 (2015) 广州海珠湖公园夏季鸟类调查及其保护建议. 广东园林, 37(5), 70–73. [52].佟富春, 谢正生, 崔兆雪 (2008) 华南农业大学校园鸟类多样性初步调查. 山东林业科技, (1), 42–45. [53].佟富春, 郑泽惟, 林嘉莉, 黄子峻, 杨玄宗, 吴牧凡, 张晓玲, 肖以华 (2023) 广州市帽峰山森林公园鸟类多样性研究. 热带地理, 43, 1726–1737. [54].佟富春, 朱纯, 姚舜, 贺漫媚, 熊咏梅, 朱帆远, 张晓军 (2009) 广州越秀公园鸟类多样性及季节动态研究. 广东园林, 31(4), 32–34.

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	[55].王海京, 罗探基, 钟象景, 潘紫生, 陈羽, 陶君, 张明海, 龚世平 (2010) 广东省平胸龟野生种群现状调查. 野生动物, 31(2), 110–112. [56].王相震, 潘雯, 杨东妮, 蒋怡 (2024) 广州市黄埔区贤江公园鸟类资源调查与特征分析. 绿色科技, 26(24), 81–85, 92. [57].吴毅, 李燕梅, 甘颖霞, 朱瑞燕, 何妙珍, 董玉萍 (2005) 广州市越秀公园鸟类种类与数量的初步研究. 广州大学学报(自然科学版), 4(5), 398–402. [58].吴毅, 张成菊, 梁智文, 易祖盛 (2007) 广州市区翼手类物种多样性的研究. 广州大学学报(自然科学版), 6(2), 14–17. [59].吴毅, 张成菊, 余文华, 陈瑞红, 梁智文 (2006) 广州市蝙蝠的多样性及在农业生态环境中的作用. 华南农业大学学报, 27(4), 47–51. [60].吴毅, 周全, 李燕梅, 甘颖霞, 朱瑞燕, 何妙珍, 董玉萍 (2007) 广州市越秀公园鸟类多样性与保护对策. 四川动物, 26, 161–164. [61].肖嘉杰, 李远航, 黄丹丹, 梁晓彤, 丁明艳, 罗连, 林石狮 (2022) 增城大封门水库及周边区域鸟类多样性初步调查. 绿色科技, 24(22), 51–53, 58. [62].杨灿朝, 蔡燕, 梁伟 (2009) 广州市区各公园的鸟类多样性比较. 海南师范大学学报(自然科学版), 22(2), 196–199. [63].杨亚婷, 任荣荣, 佟富春 (2018) 广州天河公园鸟类的初步调查. 广东园林, 40(4), 10–13. [64].游永明, 柯培峰, 袁倩敏, 陈映伸, 张文穗, 于冬梅 (2025) 华南农业大学校园鸟类群落结构及多样性动态. 天津农林科技, (1), 1–6, 11. [65].张敏, 邓云玉, 邹发生 (2019) 海珠湿地繁殖季节鸟类的分布及惊飞距离分析. 广东园林, 41(3), 33–39. [66].郑孜文, 张春兰, 胡慧建 (2008) 广州地区鸟类资源本底调查及其整体特征分析. 动物学杂志, 43(1), 122–133. [67].郑孜文, 张春兰, 胡慧建 (2014) 广州农田灌丛区鸟类多样性调查分析. 南方农业学报, 45, 1079–1083. [68].Fang XS, Wu RZ, Feng YJ, Huang YX, Liu S, Yuan L, Liu JC, Niu XJ, Wang XC, Hu HJ (2020) Enhancing bird diversity via species differential analysis at the Haizhu National Wetland Park in Guangzhou, China: A case study. Restoration Ecology, 29, e13329. [69].谷颖乐 (2008) 广州市郊区公路交通系统对两栖爬行动物公路死亡的影响及对策. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙. [70].梁家智 (2017) 广州城市“南拓”进程中南沙滨海湿地保护问题研究. 硕士学位论文, 仲恺农业工程学院, 广州. [71].刘松 (2008) 广州市城市化不同进程对爬行动物群落的影响研究. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙. [72].王佳丽 (2017) 广州海珠湿地公园二期生态恢复中鸟类恢复设计与效果评价. 硕士学位论文, 华南农业大学, 广州.

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	[73].吴娟 (2016) 海珠生态城市建设中野生动物保护效果评价. 硕士学位论文, 华南农业大学, 广州. [74].张悦 (2024) 基于鸟声的鸟类丰富度评估方法研究. 硕士学位论文, 广州大学, 广州. [75].钟文 (2019) 基于生态理念的 HZ 湿地公园恢复策略研究. 硕士学位论文, 华南理工大学, 广州.
新闻 **（68）**	[76].“鸟中国宝”盯上广东: 东方白鹳, 广州塔下, 欢迎办理入住 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1795958228481018802&wfr=spider&for=pc [77].“稀客”东方白鹳飞临广州 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1795911578807015060&wfr=spider&for=pc [78].“新成员”报到！白眉鸭惊现海珠湿地. https://www.sohu.com/a/394124130_120152148 [79].“眼镜蛇！两条！”白云儿童公园有蛇出没, 园方回应 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1835949774598460440&wfr=spider&for=pc [80].1980 年后首现广州野外！海珠湿地发现稀有鸟类红领绿鹦鹉 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1807457374351437674&wfr=spider&for=pc [81].2020 年广州野生鸟类累计 354 种！生态环境越来越美, 观鸟拍鸟人群快速增长. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1667053635937228916&wfr=spider&for=pc [82].2023 年秋季, 广州白云山猛禽观测活动小结. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI0NzA5NjQwNw==&mid=2650087117&idx=1&sn=d7ffb1719114699d14cc0ff9e2fc3863&chksm=f0620c346da8435ece2b67d4583f63242f62be32f06f0fd5e003b5e38b63b881bad01df953f5&scene=27 [83].白肩雕, 广州极罕见记录！2022 年广州白云山秋季猛禽观测, 第 21 种猛禽. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI0NzA5NjQwNw==&mid=2650085389&idx=1&sn=fb2f92e17dcca8ebf42e055f42a71b1e&chksm=f1b48d35c6c3042330d431b9f6157ed630c1f238b8678126af5d9d05ef638d4c294d28434eb4&scene=27 [84].比大熊猫还稀有, “世界上最神秘的鸟”海南鹛神秘在哪里？ https://www.gz.gov.cn/zt/lmgzssst/content/mpost_9618777.html [85].第 201 位！广州初中生发现湿地新鸟种 https://www.haizhu.gov.cn/hzdt/ztlm/tzhz/rjhj/yxhz/content/mpost_9970034.html [86].观鸟攻略①	又到最美观鸟季！广东这些地方来了好多“小可爱”. https://lyj.gd.gov.cn/gkmlpt/content/4/4048/post_4048575.html#2441

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	[87].广东“省鸟”惊现白云山！走，到绿野仙踪寻飞鸟掠影 https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA5MjgyODMxMg==&mid=2652374776&idx=3&sn=87d5014fb7e305f33a98ac209d6f9c3f&chksm=0b7547e8a85acff486e2f236596562df048ceae7de74d2a67f6e1a929511eee393b01c0137c5&scene=27 [88].广东省动物学会: 广州再次发现长鬣蜥. https://huacheng.gz-cmc.com/pages/2022/04/07/bcebcb66777a42db98c6a5ff0e1d3004.html [89].广东迎来最佳观鸟季！鸟类品种纪录不断刷新. https://www.xkb.com.cn/articleDetail/112250 [90].广州八类特毒毒蛇揭秘: 银环蛇号称“毒霸”. https://m.sohu.com/n/362774406/ [91].广州大学城湾咀头湿地监测到 19 种鸟类新记录. https://www.chinanews.com.cn/dwq/2023/06-09/10021964.shtml [92].广州发现“黄猄”，叫声似狗吠，嘴长獠牙，胆子却很小，遇事就逃 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1781530393020110116&wfr=spider&for=pc [93].广州发现罕见毒蛇白头蝰 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1701270210972576850&wfr=spider&for=pc [94].广州发现香港后棱蛇 说明白云山生态“棒棒哒”. https://www.sohu.com/a/42814897_115402 [95].广州发现中国新记录种——卡氏伏翼. https://www.sohu.com/a/498396940_120091004 [96].广州海珠湿地发现“三有“物种赤麻鸭，鸟类提升至 202 种 https://huacheng.gz-cmc.com/pages/2025/03/31/SF136081378f8b7d59bab6440e85d369.html [97].广州海珠湿地正式公布两种在湿地新发现鸟类 https://sthjj.gz.gov.cn/ysxw/content/post_9816502.html [98].广州陆生野生脊椎动物增至 457 种.https://gzdaily.dayoo.com/pc/html/2021-11/02/content_878_773702.htm [99].广州难得一见的稀客 ·白喉林莺. https://www.bilibili.com/video/BV1XU4y1d7cE/?vd_source=d37f8d647165d7c72eb44e3c0266ff60 [100]. 广州市哺乳动物又添新成员. https://www.gdkjb.com/view-19370.html [101]. 广州市从化区发现数种新分布物种！ https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyODgwMTA3Mg==&mid=2248122609&idx=1&sn=d842f9b2fc414d8e8b6d46d5a48855e4&chksm=e8476faedf30e6b8a437b691ac824f65fbe14eadb068e0269486da0878c996d0019411662c7d&scene=27 [102]. 广州市流溪河国家森林公园首次记录中华穿山甲

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	https://lyj.gd.gov.cn/news/special/swdyxbh/content/post_4751386.html [103]. 广州首次发现！黑冠鹃在金沙街浔峰山筑巢繁殖 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1771404793805081664&wfr=spider&for=pc [104]. 广州新发现 36 种鸟类. https://news.qq.com/rain/a/20211125A06UBD00 [105]. 广州新纪录 | 白云山猛禽监测发现内陆罕见鸟类黑叉尾海燕. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI0NzA5NjQwNw==&mid=2650087263&idx=1&sn=219a42a4e819ffc40b7a9a3da81566c0&chksm=f01f6971a8488e9e79519c5f7287620bf68be4425c6ece9d7859634f76bc947bdc3fd5f39a3d&scene=27 [106]. 广州野生鸟类多达 307 种, 最新观鸟导览请收好！ https://baijiahao.baidu.com/s?id=1715566490503927937&wfr=spider&for=pc [107]. 国家二级重点保护动物地龟现身广州从化陈禾洞自然保护区. https://static.nfapp.southcn.com/content/202306/06/c7762011.html [108]. 海珠湿地发现昆虫新物种、濒危动物地龟现身从化、黑冠鹃首次浔峰山筑巢……越来越多的生物 越来越美的广州. https://sthjj.gz.gov.cn/ysxw/content/post_9164246.html [109]. 海珠湿地发现两种新鸟 一为红头长尾山雀, 一为淡眉雀鹛 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1794364792200085049&wfr=spider&for=pc [110]. 海珠湿地接二连三发现鸟类新记录. https://www.haizhu.gov.cn/hzdt/bmyw/qsdb/content/post_8985440.html [111]. 海珠湿地鸟类添“新员”. https://www.gz.gov.cn/zt/lmgzsss/gntj/content/mpost_9943305.html [112]. 海珠湿地迎来第 202 种鸟类 https://www.haizhu.gov.cn/hzdt/ztlm/zzyyzq/bm/content/post_10222733.html [113]. 红领绿鹦鹉回归现身广州海珠湿地 https://www.forestry.gov.cn/c/www/mtbd/582860.jhtml [114]. 绿美广州·飞鸟进城|观鸟指南. https://news.qq.com/rain/a/20231220A011TI00 [115]. 帽峰山又发现珍贵物种啦！https://www.gz.gov.cn/zt/lmgzsss/gntj/content/mpost_9456265.html [116]. 鸟类提升至 196 种！广州海珠国家湿地公园新增两种新纪录鸟类. https://k.sina.com.cn/article_2131593523_7f0d893302001dc7d.html [117]. 趣味科普 | 湿地再添新纪录！其中有全国最小蝙蝠 http://ftourcn.isenlin.cn/sf_B92585F834A14432AB62EFE4FFB4B2DB_246_37B2B541446.html

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	[118]. 热林所在帽峰山森林公园新发现 3 种国家二级保护动物 https://www.caf.ac.cn/info/1213/50668.htm [119]. 图集: 发现新鸟种！广东候鸟“先头部队”来了哪些珍稀鸟类？https://news.qq.com/rain/a/20231023A0AE4B00 [120]. 夏日频繁出没！一小区两天抓三条, 其中一条有剧毒, 医生提醒…… https://society.huanqiu.com/article/3yK8QkfH6ot [121]. 消失超 40 年, 该鹦鹉回归广州！ https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5MjA0MDk2MA==&mid=2653327602&idx=3&sn=87bf8f52d3d3f28c794d103c8714c878&chksm=bcf04dda249ae5a27981ac9d4a6f3744204920148d587aa55cf002c9027415278c371e3e5fbf&scene=27 [122]. 小小翠金鹃、湾区观鸟情, 广州构筑“鸟性化”生态家园. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1801124960507523190&wfr=spider&for=pc [123]. 新发现！广州小学生“立功”了. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1763403439712925669 [124]. 野外消失物种回归！广州海珠湿地鸟类接连“上新”. https://news.southcn.com/node_54a44f01a2/286d8e83ef.shtml [125]. 一个月 2 次！海珠湿地又有新发现！https://www.gz.gov.cn/zt/lmgzsss/gntj/content/post_9457651.html [126]. 又见野外穿山甲！广州市从化区发现数种新分布物种 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1813604442269907026&wfr=spider&for=pc [127]. 又！双！叒！从化陈禾洞省级自然保护区连续发现广东新分布物种！ https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyODgwMTA3Mg==&mid=2248117773&idx=2&sn=fd6d9cb73095af6a3de12f5c18d80e5c&chksm=e9127f1ba2c108d70b30ee2545c0aa6752ce66e54deaf8f0d6663e919255c44fb61711575f01&scene=27 [128]. 又美又飒的它们到广东了！广州这些地方可以看..... https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5MTYzOTQyNA==&mid=2657072711&idx=1&sn=c58ae41a0ca2379b4571dafdbc71412a&chksm=bcf6fcbfb7e2c475984fa92bd8aecff274494571f92f5d7a51e09e9d3d06278998dd9e853452&scene=27 [129]. 越来越多的生物 越来越美的广州 https://www.gz.gov.cn/zlgz/tsgz/content/mpost_9158956.html [130]. 粤看粤美丨新增物种！濒危动物地龟现身广东从化 http://gd.people.com.cn/n2/2023/0607/c123932-40447464.html [131]. 国家一级保护鸟类, 现身广州 https://baijiahao.baidu.com/s?id=1846368836860214232&wfr=spider&for=pc [132]. 鸦嘴卷尾, 广州新发现的鸟类！https://mp.weixin.qq.com/s/JMYQgXhIAO3Hrh7ROb8XYw [133]. 南沙又发现国家一级保护野生鸟类, 而且还是广州地区的新记录

数据类型 Data type	数据来源 Data source
	https://mp.weixin.qq.com/s/IsX2pQnnU33IbGxfsOAzXQ
	[134]. 南沙首次发现国家二级保护动物黑颈鹳鹮 https://mp.weixin.qq.com/s/CXGvwMpFZT7FoGN32lBKlQ
	[135]. “五彩斑斓的黑”首次现身！国家一级保护鸟类彩鹳造访广州最大滨海湿地 https://www.gz.gov.cn/zt/lmgzsss/gntj/content/post_10499802.html
	[136]. 2025 广东省保护野生动物宣传月启动 https://lyj.gd.gov.cn/news/forestry/content/post_4795722.html
	[137]. 短趾雕！广州南沙黄山鲁森林公园猛禽观察发现广州鸟类新纪录！ https://mp.weixin.qq.com/s/CqEfABqfqvJbL9ykkxTlDg
	[138]. 广州“大湾鸡”又多一成员：紫水鸡 https://mp.weixin.qq.com/s/iV8xv8sMa7Z74yTxZ6R4xA
	[139]. 在广州，这个观猛点，不提是真的对不住你！！！ https://mp.weixin.qq.com/s/dYSxy7keaIjl-kTyCbSuzw
	[140]. 红领绿鹦鹉成功回归，海珠湿地鸟类突破 200 种 https://lyylj.gz.gov.cn/ztzl/lvst/gqdt/content/post_9912536.html
	[141]. 叽叽喳喳，广州又新加一种记录 https://mp.weixin.qq.com/s/jtScm-DLWZk4T5nwhii3IQ
	[142]. 家人们，谁懂啊！！！黄山鲁潘多拉的盒子打开了 https://mp.weixin.qq.com/s/_TUpXaVtXf0P1b0c2MRmYw
	[143]. 朱村发现白腹毛脚燕 https://mp.weixin.qq.com/s/EOA8HvJsNfPBXIbgW8jzeg
数据库（9）	[144]. 中国观鸟记录中心. https://www.birdreport.cn/
	[145]. 动物智能化调查监测决策指挥系统. https://ui.forestrycat.com/index
	[146]. Global Biodiversity Information Facility. https://www.gbif.org/
	[147]. eBird. https://ebird.org/home
	[148]. iNaturalist. https://www.inaturalist.org
	[149]. Avibase-世界鸟类数据库. https://avibase.bsc-eoc.org/avibase.jsp
	[150]. BOLD Systems. https://portal.boldsystems.org/
	[151]. AFD. https://biodiversity.org.au/afd/home
	[152]. EBI. https://www.ebi.ac.uk/

附录3　广州市陆生野生脊椎动物名录

Appendix 3　Checklist of wild terrestrial vertebrates in Guangzhou

物种 Species	拉丁名 Latin name	保护级别 Protection Class	分布区域 Distribution area	数据来源 Data source
两栖纲 AMPHIBIA				
有尾目 CAUDATA				
隐鳃鲵科 Cryptobranchidae				
中国大鲵	*Andrias davidianus*	II, CR, i, T	广州市	[1]
蝾螈科 Salamandridae				
香港瘰螈	*Paramesotriton hongkongensis*	II, ii, T	从化区	[1], [2], [8]
黑斑肥螈	*Pachytriton brevipes*	T	从化区	[2], [127]
无尾目 ANURAN				
角蟾科 Megophryidae				
九连山角蟾	*Megophrys jiulianensis*	3	从化区	[127]
莽山角蟾	*Megophrys mangshanensis*	3, T	从化区, 增城区	[2]–[4], [8], [147]
蟾蜍科 Bufonidae				
黑眶蟾蜍	*Duttaphrynus melanostictus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
雨蛙科 Hylidae				
华南雨蛙	*Hyla simplex*		从化区	[2], [8], [95], [98]
三港雨蛙	*Hyla sanchiangensis*	T	广州市	[2], [7], [8], [69]
中国雨蛙	*Hyla chinensis*		从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [14]等

蛙科 Ranidae				
大绿臭蛙	*Odorrana graminea*		白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [13]等
黑斑侧褶蛙	*Pelophylax nigromaculatus*		白云区, 黄埔区	[1], [2], [8], [13], [31], [146]
华南湍蛙	*Amolops ricketti*		从化区, 增城区	[1], [2], [4], [7], [8], [14], [69]
黄岗臭蛙	*Odorrana huanggangensis*	T	白云区, 从化区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [69]等
阔褶水蛙	*Hylarana latouchii*	T	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [13]等
台北纤蛙	*Hylarana taipehensis*		增城区	[1]–[3], [7], [8], [14]
香港湍蛙	*Amolops hongkongensis*	II, EN, T	增城区	[3], [12], [15]
粤琴蛙	*Nidirana guangdongensis*	T	增城区	[1]–[3], [7], [8], [14]
长肢林蛙	*Rana longicrus*	VU, T	从化区	[1], [2], [4], [7], [8], [69], [147]
长趾纤蛙	*Hylarana macrodactyla*		花都区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [14], [69]
沼水蛙	*Hylarana guentheri*		白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
竹叶蛙	*Odorrana versabilis*	T	从化区, 增城区	[2]–[4], [7], [8]
叉舌蛙科 Dicroglossidae				
福建大头蛙	*Limnonectes fujianensis*	T	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [13]等
虎纹蛙	*Hoplobatrachus chinensis*	II	白云区, 增城区, 从化区, 花都区, 番禺区, 海珠区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
棘胸蛙	*Quasipaa spinosa*	VU	白云区, 从化区, 花都区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14]等
岭南浮蛙	*Occidozyga lingnanica*	T	番禺区	[2], [147]
小棘蛙	*Quasipaa exilispinosa*	T	白云区, 从化区	[2], [4], [8], [13], [145], [147]
泽陆蛙	*Fejervarya multistriata*		白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
树蛙科 Rhacophoridae				

斑腿泛树蛙	*Polypedates megacephalus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
布氏泛树蛙	*Polypedates braueri*	3	从化区	[2], [98]
大树蛙	*Zhangixalus dennysi*	3, T	从化区, 番禺区, 花都区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [14]等
红吸盘棱皮树蛙	*Theloderma rhododiscus*	3	从化区	[2], [8], [98]
锯腿原指树蛙	*Kurixalus odontotarsus*	3	从化区	[2], [4], [8]
无声囊泛树蛙	*Polypedates mutus*	3	番禺区, 天河区, 增城区	[2], [3], [7], [8], [12], [15], [69]
姬蛙科 Microhylidae				
粗皮姬蛙	*Microhyla butleri*		白云区, 增城区, 从化区, 番禺区, 花都区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
花姬蛙	*Microhyla pulchra*		白云区, 增城区, 从化区, 花都区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
花细狭口蛙	*Kalophrynus interlineatus*		白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [14]等
花狭口蛙	*Kaloula pulchra*		白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 增城区, 花都区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
饰纹姬蛙	*Microhyla fissipes*		白云区, 增城区, 从化区, 花都区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
小弧斑姬蛙	*Microhyla heymonsi*		白云区, 增城区, 番禺区, 天河区	[1]–[3], [7], [8], [12]–[15]等
爬行纲 REPTILIA				
龟鳖目 TESTUDINES				
鳖科 Trionychidae				
山瑞鳖	*Palea steindachneri*	II, CR, ii	广州市	[7]
中华鳖	*Pelodiscus sinensis*	VU	白云区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [14]等
平胸龟科 Platysternidae				
平胸龟	*Platysternon megacephalum*	II, CR, i	白云区, 从化区, 增城区, 花都区	[1]–[4], [7], [8], [14], [34]等

地龟科 Geoemydidae				
地龟	*Geoemyda spengleri*	II, EN, ii	从化区, 增城区	[1], [2], [8], [107], [108], [129]等
黑颈乌龟	*Mauremys nigricans*	II, EN, ii	增城区	[2], [7], [8]
花龟	*Mauremys sinensis*	II, CR, ii	白云区, 从化区, 海珠区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [13]等
黄喉拟水龟	*Mauremys mutica*	II, CR, ii	白云区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [15]等
锯缘闭壳龟	*Cuora mouhotii*	II, EN, ii	从化区	[1], [2], [8]
三线闭壳龟	*Cuora trifasciata*	II, CR, ii	从化区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [15]
乌龟	*Mauremys reevesii*	II, EN, ii	白云区, 增城区, 从化区, 番禺区, 荔湾区, 天河区	[1]–[3], [7], [8], [12], [13]等
眼斑水龟	*Sacalia bealei*	II, EN, ii, T	增城区, 从化区	[1]–[3], [7], [8]
有鳞目 SQUAMATA				
壁虎科 Gekkonidae				
多疣壁虎	*Gekko japonicus*	3	广州市	[42]
黑疣大壁虎	*Gekko reevesii*	II	广州市	[2], [8]
锯尾蜥虎	*Hemidactylus garnotii*	3	天河区	[2], [8]
梅氏壁虎	*Gekko melli*	S, 3, T	从化区, 增城区	[2]–[4], [8], [145], [147]
原尾蜥虎	*Hemidactylus bowringii*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
中国壁虎	*Gekko chinensis*	3, T	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
石龙子科 Scincidae				
股鳞蜓蜥	*Sphenomorphus incognitus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [8], [12], [13], [15]等
光蜥	*Ateuchosaurus chinensis*	3	番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [8], [12], [14], [15]
蓝尾石龙子	*Plestiodon elegans*	3	番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [14]等

南滑蜥	*Scincella reevesii*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
宁波滑蜥	*Scincella modesta*	3, T	增城区, 从化区	[1], [2], [7], [8]
铜蜓蜥	*Sphenomorphus indicus*	3	白云区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [14]等
中国棱蜥	*Tropidophorus sinicus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
中国石龙子	*Plestiodon chinensis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12]–[15]等
蜥蜴科 Lacertidae				
古氏草蜥	*Takydromus kuehnei*	3	从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [8], [12], [15]
南草蜥	*Takydromus sexlineatus*	3	海珠区, 黄埔区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [14], [73]等
鬣蜥科 Agamidae				
变色树蜥	*Calotes versicolor*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
蜡皮蜥	*Leiolepis reevesii*	II	广州市	[7]
丽棘蜥	*Acanthosaura lepidogaster*	3	从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [14]等
长鬣蜥	*Physignathus cocincinus*	II, VU, ii	从化区	[1], [2], [8], [88], [147]
盲蛇科 Typhlopidae				
钩盲蛇	*Indotyphlops braminus*	3	白云区, 番禺区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [14]等
蟒科 Pythonidae				
蟒	*Python bivittatus*	II, VU, ii	白云区, 从化区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [14]等
闪皮蛇科 Xenodermidae				
黑脊蛇	*Achalinus spinalis*	3	白云区	[146]
棕脊蛇	*Achalinus rufescens*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [8], [12], [15], [146]等
钝头蛇科 Pareidae				

横纹钝头蛇	*Pareas margaritophorus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [13]等
中国钝头蛇	*Pareas chinensis*	3, T	从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [8], [12], [15]
蝰科 Viperidae				
白唇竹叶青蛇	*Trimeresurus albolabris*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
福建竹叶青蛇	*Viridovipera stejnegeri*	3	白云区, 从化区	[1], [2], [7], [8], [13], [31], [69]等
白头蝰	*Azemiops kharini*	S, 3	从化区	[2], [93], [147]
泰国圆斑蝰	*Daboia siamensis*	II	广州市	[1], [2], [7], [8], [90]
原矛头蝮	*Protobothrops mucrosquamatus*	3	白云区, 从化区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14]等
越南烙铁头蛇	*Ovophis tonkinensis*	S, 3	从化区	[2], [8], [147]
水蛇科 Homalopsidae				
黑斑水蛇	*Myrrophis bennettii*		南沙区, 增城区	[1], [2], [8], [14]
铅色水蛇	*Hypsiscopus plumbea*		白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
中国水蛇	*Myrrophis chinensis*		白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
屋蛇科 Lamprophiidae				
紫沙蛇	*Psammodynastes pulverulentus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12]–[15]等
眼镜蛇科 Elapidae				
福建华珊瑚蛇	*Sinomicrurus kelloggi*	3	从化区, 增城区	[2], [3], [8]
环纹华珊瑚蛇	*Sinomicrurus annularis*	3	白云区, 花都区, 黄埔区, 天河区	[2], [146], [147]
金环蛇	*Bungarus fasciatus*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等

眼镜王蛇	*Ophiophagus hannah*	II, VU, ii	从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12], [14]等
银环蛇	*Bungarus multicinctus*	VU, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
中华珊瑚蛇	*Sinomicrurus macclellandi*	3	花都区	[1], [7], [8], [69], [71], [90]
舟山眼镜蛇	*Naja atra*	VU, ii, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
游蛇科 Colubridae				
赤链蛇	*Lycodon rufozonatus*	3	白云区	[1], [2], [7], [8], [13], [31]等
翠青蛇	*Cyclophiops major*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
繁花林蛇	*Boiga multomaculata*	3	花都区, 增城区	[1]–[3], [8], [14], [147]
福清白环蛇	*Lycodon futsingensis*	3	从化区, 增城区	[2]–[4], [8], [147]
黑背白环蛇	*Lycodon ruhstrati*	3	从化区	[2], [7], [8], [69], [71], [147]
黑眉锦蛇	*Elaphe taeniura*	VU, 3	天河区, 黄埔区	[1], [2], [7], [8], [14], [69], [71]
滑鼠蛇	*Ptyas mucosa*	ii, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
黄链蛇	*Lycodon flavozonatus*	3	从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [12], [15]等
灰鼠蛇	*Ptyas korros*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
绞花林蛇	*Boiga kraepelini*	3	从化区	[2], [4], [8], [147]
绿瘦蛇	*Ahaetulla prasina*	3	从化区, 黄埔区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [14], [69]等
三索锦蛇	*Coelognathus radiatus*	II	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
台湾小头蛇	*Oligodon formosanus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [8], [12], [13], [15]等
王锦蛇	*Elaphe carinata*	3	广州市	[2], [7], [8], [69], [71]
乌梢蛇	*Ptyas dhumnades*	3	白云区	[1], [2], [7], [8], [13], [31]等
细白环蛇	*Lycodon subcinctus*	3	白云区, 番禺区, 南沙区, 天河区	[2], [8], [146], [147]
中国小头蛇	*Oligodon chinensis*	3	从化区	[2], [7], [8], [69], [71], [147]

紫灰锦蛇	*Oreocryptophis porphyraceus*	3	番禺区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[2], [3], [7], [8], [12], [14]等
紫棕小头蛇	*Oligodon cinereus*	3	广州市	[1], [2], [7], [8]
两头蛇科 Calamariidae				
钝尾两头蛇	*Calamaria septentrionalis*	3	增城区	[2], [7], [8], [14], [69], [71]
水游蛇科 Natricidae				
白眉腹链蛇	*Hebius boulengeri*	3	增城区	[2], [3], [8], [95]
草腹链蛇	*Amphiesma stolatum*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12]–[15]等
侧条后棱蛇	*Opisthotropis lateralis*	3	白云区	[1], [2], [8], [13], [31], [147]
赤链华游蛇	*Trimerodytes annularis*	3, T	白云区	[1], [2], [7], [8], [13], [31]等
挂墩后棱蛇	*Opisthotropis kuatunensis*	3, T	从化区	[1], [2], [8]
红脖颈槽蛇	*Rhabdophis subminiatus*		白云区, 从化区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
环纹华游蛇	*Trimerodytes aequifasciatus*	3	白云区, 从化区, 黄埔区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14]等
黄斑渔游蛇	*Xenochrophis flavipunctatus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
丽纹腹链蛇	*Hebius optatus*	3	从化区	[2], [8], [95]
坡普腹链蛇	*Hebius popei*	3, T	增城区	[2], [3], [8], [95]
山溪后棱蛇	*Opisthotropis latouchii*	3, T	从化区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [42], [69]等
乌华游蛇	*Trimerodytes percarinatus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14]等
无颞鳞腹链蛇	*Hebius atemporalis*	3	增城区	[3]
香港后棱蛇	*Opisthotropis andersonii*	3, T	白云区	[2], [8], [94], [95]
锈链腹链蛇	*Hebius craspedogaster*	3, T	广州市	[2], [7], [8], [69], [71]
棕黑腹链蛇	*Hebius sauteri*	3	广州市	[2], [7], [8], [69], [71]
斜鳞蛇科 Pseudoxenodontidae				

崇安斜鳞蛇	*Pseudoxenodon karlschmidti*	3	从化区	[1], [2], [7], [8], [69], [71]等
横纹斜鳞蛇	*Pseudoxenodon bambusicola*	3	从化区	[1], [2], [8]
剑蛇科 Sibynophiidae				
黑头剑蛇	*Sibynophis chinensis*	3	广州市	[2], [8]
鸟纲 AVES				
鸡形目 GALLIFORMES				
雉科 Phasianidae				
鹌鹑	*Coturnix japonica*	3	从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [14], [16]等
白眉山鹧鸪	*Arborophila gingica*	II, T	从化区, 花都区, 增城区, 海珠区	[1]–[3], [8], [16], [19], [144]等
白鹇	*Lophura nycthemera*	II	广州全境	[1]–[4], [7], [8], [13]–[16]等
环颈雉	*Phasianus colchicus*	3	白云区, 从化区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 南沙区, 越秀区	[2], [3], [5], [7], [8], [13], [16]等
灰胸竹鸡	*Bambusicola thoracicus*	3, T	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [13], [15]等
中华鹧鸪	*Francolinus pintadeanus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [5], [7], [8], [13], [14]等
鹱形目 XPROCELLARIIFORMES				
海燕科 Hydrobatidae				
黑叉尾海燕	*Hydrobates monorhis*	S, 3	白云区	[19], [105], [144]
雁形目 ANSERIFORMES				
鸭科 Anatidae				
白额雁	*Anser albifrons*	II	海珠区, 南沙区, 越秀区	[19], [114], [144]

青头潜鸭	*Aythya baeri*	I, CR	南沙区, 越秀区	[2], [8], [104], [144]
红头潜鸭	*Aythya ferina*	VU, 3	番禺区, 海珠区, 南沙区, 越秀区	[2], [5], [8], [19], [37], [144]等
凤头潜鸭	*Aythya fuligula*	3	番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[2], [7], [8], [19], [37], [144]等
白眼潜鸭	*Aythya nyroca*	S, 3	海珠区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[2], [3], [5], [8], [19], [37]等
斑嘴鸭	*Anas zonorhyncha*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 南沙区, 越秀区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [5]–[13], [16], [19]等
赤麻鸭	*Tadorna ferruginea*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 荔湾区, 南沙区, 越秀区	[2], [5], [7], [8], [11], [19]等
翘鼻麻鸭	*Tadorna tadorna*	3	南沙区, 越秀区	[19], [144]
豆雁	*Anser fabalis*	S, 3	南沙区	[1], [2], [6], [8]
红胸秋沙鸭	*Mergus serrator*	S, 3	增城区	[19], [145]
中华秋沙鸭	*Mergus squamatus*	I, EN	从化区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19]
花脸鸭	*Sibirionetta formosa*	II, ii	海珠区, 黄埔区, 南沙区	[1], [2], [5]–[8], [19], [21]等
灰雁	*Anser anser*	S, 3	海珠区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [5], [8], [19], [73]等
栗树鸭	*Dendrocygna javanica*	II	黄埔区	[19], [81], [144], [148]
罗纹鸭	*Mareca falcata*	S, 3	从化区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 越秀区	[1], [2], [6]–[8], [19], [21]等
赤颈鸭	*Mareca penelope*	3	番禺区, 从化区, 南沙区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[9], [11], [12]等
赤膀鸭	*Mareca strepera*	3	黄埔区, 南沙区	[2], [7], [8], [19], [37], [144]等
针尾鸭	*Anas acuta*	3	番禺区, 从化区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区	[1], [2], [5]–[8], [10], [19]等

绿翅鸭	*Anas crecca*	3	白云区, 番禺区, 从化区, 南沙区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5]–[8], [16], [19]等
绿头鸭	*Anas platyrhynchos*	3	广州全境	[1], [2], [5]–[13], [16], [19]等
棉凫	*Nettapus coromandelianus*	II	海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等
琵嘴鸭	*Spatula clypeata*	3	从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [5]–[8], [11], [19]等
白眉鸭	*Spatula querquedula*	3	从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [16], [19]等
鹊鸭	*Bucephala clangula*	3	南沙区	[2], [7], [8], [37]
鸳鸯	*Aix galericulata*	II	从化区, 南沙区, 番禺区, 海珠区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5]–[8], [11], [19]等
䴙䴘目 PODICIPEDIFORMES				
䴙䴘科 Podicipedidae				
凤头䴙䴘	*Podiceps cristatus*	S, 3	白云区, 从化区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]等
黑颈䴙䴘	*Podiceps nigricollis*	II	南沙区	[134], [144]
小䴙䴘	*Tachybaptus ruficollis*	3	广州全境	[1]–[19], [36], [37], [73], [144]等
鸽形目 COLUMBIFORMES				
鸠鸽科 Columbidae				
斑尾鹃鸠	*Macropygia unchall*	II	从化区, 黄埔区, 番禺区, 天河区, 越秀区	[19], [86], [144]–[146], [148]
厚嘴绿鸠	*Treron curvirostra*	II	白云区	[13], [19], [144], [148]
红翅绿鸠	*Treron sieboldii*	II	白云区, 天河区, 海珠区	[13], [17], [19], [144], [148]
灰斑鸠	*Streptopelia decaocto*	3	番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [19], [145]等
山斑鸠	*Streptopelia orientalis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[17], [19], [20]等

火斑鸠	*Streptopelia tranquebarica*	3	广州全境	[1], [2], [7], [8], [13], [17]等
绿翅金鸠	*Chalcophaps indica*	3	白云区, 从化区, 天河区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 越秀区	[1], [2], [7]–[9], [12], [15]等
绿皇鸠	*Ducula aenea*	II	增城区, 从化区	[1], [2], [8]
珠颈斑鸠	*Spilopelia chinensis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
夜鹰目 CAPRIMULGIFORMES				
夜鹰科 Caprimulgidae				
林夜鹰	*Caprimulgus affinis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
普通夜鹰	*Caprimulgus jotaka*	3	广州全境	[1], [2], [8], [9], [12], [14]等
雨燕科 Apodidae				
白喉针尾雨燕	*Hirundapus caudacutus*	3	白云区, 从化区, 黄埔区, 南沙区, 天河区	[1], [2], [8], [19], [144], [148]
灰喉针尾雨燕	*Hirundapus cochinchinensis*	II	白云区	[144]
白腰雨燕	*Apus pacificus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5], [7], [8], [13], [14]等
小白腰雨燕	*Apus nipalensis*	3	广州全境	[1]–[9], [11]–[19], [21], [36]等
爪哇金丝燕	*Aerodramus fuciphagus*	II	白云区, 海珠区, 增城区, 南沙区	[19], [144]
鹃形目 ICUCULIFORMES				
杜鹃科 Cuculidae				
八声杜鹃	*Cacomantis merulinus*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[17]等

大杜鹃	*Cuculus canorus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
四声杜鹃	*Cuculus micropterus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5]–[9], [13], [14]等
小杜鹃	*Cuculus poliocephalus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [7]–[9], [12]–[17]等
中杜鹃	*Cuculus saturatus*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 天河区, 越秀区, 增城区, 黄埔区	[1], [2], [7], [8], [14], [17]等
褐翅鸦鹃	*Centropus sinensis*	II	广州全境	[1]–[9], [11]–[19], [21], [29]等
红翅凤头鹃	*Clamator coromandus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 越秀区, 南沙区	[1]–[3], [5], [7]–[9], [13], [14]等
绿嘴地鹃	*Phaenicophaeus tristis*	3	越秀区	[19], [144]
乌鹃	*Surniculus lugubris*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 海珠区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [6]–[8], [13], [15]等
小鸦鹃	*Centropus bengalensis*	II	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 增城区, 海珠区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [6]–[8], [12], [14]等
噪鹃	*Eudynamys scolopaceus*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[19]等
北棕腹鹰鹃	*Hierococcyx hyperythrus*	3	天河区, 越秀区	[17], [19], [144]
棕腹鹰鹃	*Hierococcyx nisicolor*	S, 3	白云区, 从化区, 花都区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[2], [3], [8], [16], [17], [19]等
大鹰鹃	*Hierococcyx sparverioides*	3	白云区, 从化区, 花都区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 南沙区, 增城区, 黄埔区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [13]–[17]等

翠金鹃	*Chrysococcyx maculatus*	3	天河区, 越秀区	[122], [144], [146]
鹳形目 CICONIIFORMES				
鹳科 Ciconiidae				
东方白鹳	*Ciconia boyciana*	I, EN, i	番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6], [8]–[10], [19]等
黑鹳	*Ciconia nigra*	I, ii	南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [128]等
鹤形目 GRUIFORMES				
鹤科 Gruidae				
白头鹤	*Grus monacha*	I, VU, i	海珠区, 南沙区	[19], [145]
灰鹤	*Grus grus*	II	广州市	[1], [2], [8]
秧鸡科 Rallidae				
白骨顶	*Fulica atra*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [10]–[12]等
白喉斑秧鸡	*Rallina eurizonoides*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1], [2], [8], [17], [19], [74]等
白胸苦恶鸟	*Amaurornis phoenicurus*	3	广州全境	[1]–[19], [21], [29], [32], [36]等
斑胁田鸡	*Zapornia paykullii*	II	广州市	[1], [2], [8]
小田鸡	*Zapornia pusilla*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[2], [8], [19], [144], [146], [148]
斑胸田鸡	*Porzana porzana*	3	海珠区, 黄埔区, 天河区	[19], [81], [114], [144], [146]等
董鸡	*Gallicrex cinerea*	S, 3	从化区, 番禺区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [8], [16], [19], [144]等

黑水鸡	*Gallinula chloropus*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[13], [15]–[17]等
紫水鸡	*Porphyrio poliocephalus*	II	南沙区	[7], [138]
红脚田鸡	*Zapornia akool*	3	从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [16], [19]等
红胸田鸡	*Zapornia fusca*	S, 3	从化区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [16], [19]等
花田鸡	*Coturnicops exquisitus*	II	广州市	[1], [2], [7], [8]
灰胸秧鸡	*Lewinia striata*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [6]–[8], [16], [17]等
普通秧鸡	*Rallus indicus*	3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [5]–[8], [17], [19]等
鹈形目 PELECANIFORMES				
鹮科 Threskiornithidae				
白琵鹭	*Platalea leucorodia*	II, ii	白云区, 番禺区, 南沙区, 天河区, 增城区	[2], [6]–[9], [19], [37], [70]等
黑脸琵鹭	*Platalea minor*	I, EN	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [6]–[11], [19], [28]等
彩鹮	*Plegadis falcinellus*	I	南沙区	[131], [133]
鹭科 Ardeidae				
苍鹭	*Ardea cinerea*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[12], [15]–[17]等
中白鹭	*Ardea intermedia*	S, 3	广州全境	[1], [2], [5]–[9], [11]–[13]等
草鹭	*Ardea purpurea*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [5]–[11], [19], [20]等
池鹭	*Ardeola bacchus*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[19], [21], [32]等
大白鹭	*Ardea alba*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[13], [15], [16]等
大麻鳽	*Botaurus stellaris*	S, 3	海珠区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [8], [19], [37], [75]等
黄嘴白鹭	*Egretta eulophotes*	I, VU	海珠区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[5], [11], [19], [51], [144]
白鹭	*Egretta garzetta*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[17], [19], [21]等
岩鹭	*Egretta sacra*	II	南沙区	[19], [144], [145]

海南鸦	*Gorsachius magnificus*	I	从化区	[1]–[3], [5]–[8], [11], [13]等
黑冠鸦	*Gorsachius melanolophus*	II	白云区, 海珠区, 黄埔区, 番禺区, 天河区, 增城区	[17], [19], [81], [103], [108]等
栗苇鸦	*Ixobrychus cinnamomeus*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 增城区, 海珠区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5]–[8], [11]–[16]等
紫背苇鸦	*Ixobrychus eurhythmus*	S, 3	番禺区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [15], [17]等
黑苇鸦	*Ixobrychus flavicollis*	S, 3	白云区, 从化区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]等
黄斑苇鸦	*Ixobrychus sinensis*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[17]等
绿鹭	*Butorides striata*	S, 3	白云区, 从化区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5]–[8], [11], [13]等
牛背鹭	*Bubulcus coromandus*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[17]等
夜鹭	*Nycticorax nycticorax*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[13], [15]–[19]等
鹈鹕科 Pelecanidae				
卷羽鹈鹕	*Pelecanus crispus*	I, i	南沙区	[9], [145], [148]
鲣鸟目 SULIFORMES				
军舰鸟科 Fregatidae				
白斑军舰鸟	*Fregata ariel*	II	黄埔区	[1], [2], [8], [19]
鸬鹚科 Phalacrocoracidae				
普通鸬鹚	*Phalacrocorax carbo*	3	白云区, 从化区, 南沙区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [4]–[11], [16], [17]等
鸻形目 CHARADRIIFORMES				
彩鹬科 Rostratulidae				

彩鹬	*Rostratula benghalensis*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[2], [7], [8], [16], [19], [36]等
反嘴鹬科 Recurrostridae				
反嘴鹬	*Recurvirostra avosetta*	S, 3	白云区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [10], [11]等
黑翅长脚鹬	*Himantopus himantopus*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [5]–[8], [10], [11]等
鸻科 Charadriidae				
环颈鸻	*Charadrius alexandrinus*	3	白云区, 南沙区, 番禺区, 增城区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 越秀区	[1], [2], [5]–[8], [11], [12]等
白脸鸻	*Charadrius dealbatus*		黄埔区, 天河区, 南沙区	[144]–[146]
金眶鸻	*Charadrius dubius*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[8], [12]–[14]等
剑鸻	*Charadrius hiaticula*	3	增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]等
铁嘴沙鸻	*Charadrius leschenaultii*	3	南沙区	[2], [7], [8], [19], [37], [144]等
青藏沙鸻	*Charadrius atrifrons*		黄埔区, 南沙区	[144], [145]
蒙古沙鸻	*Charadrius mongolus*	EN, 3	黄埔区, 南沙区	[2], [8], [16], [19], [37], [144]等
长嘴剑鸻	*Charadrius placidus*	S, 3	海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [5], [7], [8], [19], [72]等
东方鸻	*Charadrius veredus*	3	海珠区, 南沙区, 增城区	[2], [8], [19], [144]–[148]
灰头麦鸡	*Vanellus cinereus*	3	从化区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等
凤头麦鸡	*Vanellus vanellus*	3	从化区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等
金鸻	*Pluvialis fulva*	3	番禺区, 南沙区, 黄埔区, 增城区	[2], [3], [8], [12], [16], [19]等
灰鸻	*Pluvialis squatarola*	VU, 3	南沙区, 增城区	[2], [8], [19], [37], [144], [148]

鸥科 Laridae

白翅浮鸥	*Chlidonias leucopterus*	S, 3	番禺区, 南沙区, 花都区, 越秀区	[1], [2], [6]–[9], [12], [16]等
白额燕鸥	*Sternula albifrons*	S, 3	从化区, 南沙区, 增城区	[2], [3], [8], [19], [37], [144]等
粉红燕鸥	*Sterna dougallii*	S, 3	南沙区	[1], [2], [8], [144]
普通燕鸥	*Sterna hirundo*	S, 3	南沙区	[1], [2], [6]–[9], [16], [19]等
黑嘴鸥	*Saundersilarus saundersi*	I, VU	南沙区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等
红嘴巨燕鸥	*Hydroprogne caspia*	S, 3	南沙区	[2], [7], [8], [19], [37], [144]等
红嘴鸥	*Chroicocephalus ridibundus*	S, 3	白云区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [6]–[9], [11], [16]等
灰翅浮鸥	*Chlidonias hybrida*	S, 3	从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[2], [8], [16], [19], [36], [37]等
鸥嘴噪鸥	*Gelochelidon nilotica*	S, 3	南沙区	[1], [2], [6], [8], [16], [19]等
普通海鸥	*Larus canus*	S, 3	海珠区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [72], [75]等
黑尾鸥	*Larus crassirostris*	S, 3	南沙区	[2], [8], [19], [37], [144], [145]
小黑背银鸥	*Larus fuscus*	S, 3	海珠区, 南沙区	[19], [65]
灰翅鸥	*Larus glaucescens*	S, 3	南沙区	[2], [8], [37]
西伯利亚银鸥	*Larus vegae*	S, 3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[2], [8], [19], [37], [144], [145]
三趾鸥	*Rissa tridactyla*	VU, S, 3	海珠区, 天河区	[17], [19], [144], [148]
遗鸥	*Ichthyaetus relictus*	I, VU, i	南沙区	[19], [114], [144]

渔鸥	*Ichthyaetus ichthyaetus*	S, 3	南沙区	[1], [2], [8], [19], [144]
三趾鹑科 Turnicidae				
黄脚三趾鹑	*Turnix tanki*	3	白云区, 海珠区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
林三趾鹑	*Turnix sylvaticus*	3	白云区, 花都区, 番禺区	[1], [2], [8], [145]
水雉科 Jacanidae				
水雉	*Hydrophasianus chirurgus*	II	白云区, 海珠区, 花都区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [6]–[8], [19], [37]等
燕鸻科 Glareolidae				
普通燕鸻	*Glareola maldivarum*	3	白云区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [8], [16], [19], [37]等
鹬科 Scolopacidae				
白腰杓鹬	*Numenius arquata*	II	南沙区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [19], [20]等
大杓鹬	*Numenius madagascariensis*	II, EN	从化区, 南沙区	[19], [144]–[146]
小杓鹬	*Numenius minutus*	II	番禺区, 南沙区	[1], [2], [8], [19], [144], [148]
中杓鹬	*Numenius phaeopus*	S, 3	番禺区, 海珠区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [6], [8], [16], [19]等
斑尾塍鹬	*Limosa lapponica*	S, 3	南沙区	[1], [2], [7], [8], [11], [19]等
黑尾塍鹬	*Limosa limosa*	3	黄埔区, 南沙区, 增城区	[2], [7]–[11], [19], [37], [144]等
三趾滨鹬	*Calidris alba*	3	南沙区	[1], [2], [6], [8], [19], [20]等
黑腹滨鹬	*Calidris alpina*	3	黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
红腹滨鹬	*Calidris canutus*	S, 3	南沙区	[2], [7], [8], [19], [37], [144]等
弯嘴滨鹬	*Calidris ferruginea*	VU, 3	黄埔区, 南沙区, 增城区	[2], [8], [19], [37], [144]
斑胸滨鹬	*Calidris melanotos*	3	南沙区	[19]

流苏鹬	*Calidris pugnax*	3	南沙区	[2], [8], [19], [37], [144]
勺嘴鹬	*Calidris pygmaea*	I, CR	南沙区	[19]
红颈滨鹬	*Calidris ruficollis*	3	海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等
长趾滨鹬	*Calidris subminuta*	3	黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [19], [20]等
青脚滨鹬	*Calidris temminckii*	3	海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [11], [19]等
大滨鹬	*Calidris tenuirostris*	II, EN	从化区, 黄埔区, 南沙区	[2], [8], [16], [19], [37], [104]等
扇尾沙锥	*Gallinago gallinago*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [12], [16]等
大沙锥	*Gallinago megala*	3	黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [6], [8], [16], [19]等
针尾沙锥	*Gallinago stenura*	3	从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [5], [7], [8], [14], [16]等
翻石鹬	*Arenaria interpres*	II	番禺区, 南沙区	[19], [144], [145]
红颈瓣蹼鹬	*Phalaropus lobatus*	3	南沙区	[133], [144], [146]
灰尾漂鹬	*Tringa brevipes*	3	黄埔区, 南沙区	[16], [19], [144], [145], [148]
鹤鹬	*Tringa erythropus*	3	海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [7]–[11], [19], [37]等
林鹬	*Tringa glareola*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区, 天河区	[1]–[3], [5]–[8], [16], [19]等
小青脚鹬	*Tringa guttifer*	I, EN, i	从化区, 南沙区	[1], [2], [6]–[8], [144], [146]
青脚鹬	*Tringa nebularia*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 南沙区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 增城区	[1]–[3], [5]–[8], [11]–[14]等
白腰草鹬	*Tringa ochropus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 增城区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [6]–[8], [11]–[14]等
泽鹬	*Tringa stagnatilis*	3	黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [6], [8], [10], [11]等

红脚鹬	*Tringa totanus*	3	从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [10], [19]等
矶鹬	*Actitis hypoleucos*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[14]等
翘嘴鹬	*Xenus cinereus*	3	南沙区	[1], [2], [6]–[8], [19], [20]等
丘鹬	*Scolopax rusticola*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 天河区, 增城区, 番禺区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
长嘴半蹼鹬	*Limnodromus scolopaceus*	3	南沙区	[2], [8], [19], [37], [144]
半蹼鹬	*Limnodromus semipalmatus*	II	南沙区	[2], [8], [19], [37], [144], [145]
鸮形目 STRIGIFORMES				
草鸮科 Tytonidae				
草鸮	*Tyto longimembris*	II, ii	白云区, 增城区	[1], [2], [8], [14]
鸱鸮科 Strigidae				
雕鸮	*Bubo bubo*	II, ii	番禺区, 海珠区	[17], [19], [30], [72], [75]等
短耳鸮	*Asio flammeus*	II, ii	南沙区, 增城区, 黄埔区	[1], [2], [8], [19], [144]
褐林鸮	*Strix leptogrammica*	II, ii	从化区	[19], [74], [144], [146]
灰林鸮	*Strix nivicolum*	II, ii	白云区	[1], [2], [8]
褐渔鸮	*Ketupa zeylonensis*	II, ii	广州市	[1], [2], [7], [8]
领角鸮	*Otus lettia*	II, ii	白云区, 从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [13]–[15]等
黄嘴角鸮	*Otus spilocephalus*	II, ii	白云区, 从化区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [19], [74]等
红角鸮	*Otus sunia*	II, ii	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 南沙区	[2], [8], [9], [17], [19], [139]等
领鸺鹠	*Glaucidium brodiei*	II, ii	广州全境	[1], [2], [6]–[8], [14]–[16]等

斑头鸺鹠	*Glaucidium cuculoides*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5], [7]–[9], [12]–[19]等
长耳鸮	*Asio otus*	II, ii	从化区	[1], [2], [8]
日本鹰鸮	*Ninox japonica*	II, ii	天河区, 越秀区, 海珠区, 南沙区	[1], [2], [7], [8], [144], [146]等
鹰形目 ACCIPITRIFORMES				
鹗科 Pandionidae				
鹗	*Pandion haliaetus*	II, ii	白云区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [17], [19]等
鹰科 Accipitridae				
白腹鹞	*Circus spilonotus*	II, ii	白云区, 从化区, 南沙区, 番禺区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
白尾鹞	*Circus cyaneus*	II, ii	白云区, 南沙区	[1], [2], [8], [19], [37], [144]等
白尾海雕	*Haliaeetus albicilla*	I, i	南沙区	[2], [8], [37], [70], [89], [104]等
白腹隼雕	*Aquila fasciata*	II, ii	白云区, 南沙区	[7], [19], [144], [148]
白肩雕	*Aquila heliaca*	I, VU, i	白云区	[19], [83], [144]
林雕	*Ictinaetus malaiensis*	II, ii	南沙区, 从化区	[1], [2], [8], [19], [37], [82]等
乌雕	*Clanga clanga*	I, VU, ii	南沙区	[136], [139], [142], [144], [146]
靴隼雕	*Hieraaetus pennatus*	II, ii	南沙区	[19]
苍鹰	*Accipiter gentilis*	II, ii	白云区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[1], [2], [5], [8], [37], [39]等
日本松雀鹰	*Accipiter gularis*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[2], [7], [8], [17], [19], [30]等
雀鹰	*Accipiter nisus*	II, ii	白云区, 从化区, 南沙区, 海珠区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [6], [8], [19], [30]等
赤腹鹰	*Accipiter soloensis*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区, 花都区	[1], [2], [7], [8], [13], [14]等

凤头鹰	*Accipiter trivirgatus*	II, ii	广州全境	[1], [2], [4], [7], [8], [13]–[17]等
松雀鹰	*Accipiter virgatus*	II, ii	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14]等
凤头蜂鹰	*Pernis ptilorhynchus*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[7], [13], [16], [19], [53], [74]等
黑翅鸢	*Elanus caeruleus*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 南沙区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[16]等
褐冠鹃隼	*Aviceda jerdoni*	II, ii	白云区, 天河区, 增城区, 番禺区, 南沙区	[139], [144], [146]
黑冠鹃隼	*Aviceda leuphotes*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7]–[9], [14], [17]等
黑鸢	*Milvus migrans*	II, ii	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [14]–[19]等
灰脸鵟鹰	*Butastur indicus*	II, ii	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[13], [17], [19], [139], [144]等
普通鵟	*Buteo japonicus*	II, ii	广州全境	[1]–[3], [6]–[9], [12]–[14]等
鹊鹞	*Circus melanoleucos*	II, ii	白云区, 从化区, 南沙区, 海珠区, 黄埔区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [139]等
蛇雕	*Spilornis cheela*	II, ii	白云区, 增城区, 从化区, 花都区, 天河区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[1]–[3], [7]–[9], [13]–[17]等
短趾雕	*Circaetus gallicus*	II, ii	南沙区	[136], [137], [142]
咬鹃目 TROGONIFORMES				
咬鹃科 Trogonidae				
红头咬鹃	*Harpactes erythrocephalus*	II	从化区, 增城区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [7], [8], [16], [19]等
犀鸟目 BUCEROTIFORMES				

戴胜科 Upupidae				
戴胜	*Upupa epops*	3	白云区, 花都区, 南沙区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [13], [17]等
佛法僧目 CORACIIFORMES				
翠鸟科 Alcedinidae				
斑鱼狗	*Ceryle rudis*	S, 3	白云区, 从化区, 天河区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 越秀区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [12], [14]等
冠鱼狗	*Megaceryle lugubris*	S, 3	白云区, 海珠区	[1], [2], [7], [8], [148]
蓝翡翠	*Halcyon pileata*	VU, S, 3	从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
白胸翡翠	*Halcyon smyrnensis*	II	广州全境	[2], [3], [5]–[8], [12]–[19]等
普通翠鸟	*Alcedo atthis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
蜂虎科 Meropidae				
蓝喉蜂虎	*Merops viridis*	II	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [7], [8], [13], [16]等
栗喉蜂虎	*Merops philippinus*	II	从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区	[2], [8], [17], [19], [37], [108]等
佛法僧科 Coraciidae				
三宝鸟	*Eurystomus orientalis*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [7], [8], [13], [16]等
啄木鸟目 PICIFORMES				
拟啄木鸟科 Megalaimidae				
黑眉拟啄木鸟	*Psilopogon faber*	3	白云区, 从化区, 花都区, 南沙区, 增城区, 黄埔区, 天河区, 海珠区, 越秀区, 荔湾区	[1]–[4], [6]–[8], [13]–[16]等

大拟啄木鸟	*Psilopogon virens*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12], [13]等
啄木鸟科 Picidae				
斑姬啄木鸟	*Picumnus innominatus*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [7]–[9], [13], [15]等
大斑啄木鸟	*Dendrocopos major*	S, 3	从化区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [14], [16]等
黄嘴栗啄木鸟	*Blythipicus pyrrhotis*	S, 3	白云区, 从化区, 花都区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [14]等
灰头绿啄木鸟	*Picus canus*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [15]等
栗啄木鸟	*Micropternus brachyurus*	S, 3	白云区, 从化区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[3], [9], [13], [16], [19], [144]等
星头啄木鸟	*Picoides canicapillus*	S, 3	从化区, 越秀区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
蚁䴕	*Jynx torquilla*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [5]–[8], [12]–[14]等
隼形目 FALCONIFORMES				
隼科 Falconidae				
红脚隼	*Falco amurensis*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [8], [19], [139], [144]等
游隼	*Falco peregrinus*	II, i	白云区, 增城区, 从化区, 花都区, 南沙区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [6]–[8], [17], [19]等
燕隼	*Falco subbuteo*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 增城区, 南沙区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [6]–[8], [14], [17]等
红隼	*Falco tinnunculus*	II, ii	白云区, 从化区, 花都区, 南沙区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [6]–[8], [11], [13]等
鹦鹉目 PSITTACIFORMES				

鹦鹉科 Psittacidae				
红领绿鹦鹉	*Psittacula krameri*	II	白云区, 海珠区, 天河区, 越秀区	[80], [97], [113], [121], [124]等
雀形目 PASSERIFORMES				
八色鸫科 Pittidae				
仙八色鸫	*Pitta nympha*	II, VU, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [16]等
百灵科 Alaudidae				
双斑百灵	*Melanocorypha bimaculata*	3	黄埔区	[19], [114], [144], [148]
小云雀	*Alauda gulgula*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [19], [20]等
云雀	*Alauda arvensis*	II, ii	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
鹎科 Pycnonotidae				
白喉红臀鹎	*Pycnonotus aurigaster*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [29], [36]等
红耳鹎	*Pycnonotus jocosus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[20], [29], [36]等
白头鹎	*Pycnonotus sinensis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [34]等
黄臀鹎	*Pycnonotus xanthorrhous*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 越秀区, 增城区	[1]–[5], [7]–[9], [19], [146]等
黑短脚鹎	*Hypsipetes leucocephalus*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[17]等
栗背短脚鹎	*Hemixos castanonotus*	3	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[17]等
领雀嘴鹎	*Spizixos semitorques*	3	从化区, 花都区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 天河区	[1]–[3], [7], [8], [14], [16]等
绿翅短脚鹎	*Ixos mcclellandii*	3	白云区, 从化区, 花都区, 天河区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [13], [15]等
伯劳科 Laniidae				
牛头伯劳	*Lanius bucephalus*	S, 3	从化区, 南沙区, 番禺区, 越秀区, 增城区	[19], [144], [146]

栗背伯劳	*Lanius collurioides*	S, 3	白云区, 海珠区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [17], [19], [144]等
红尾伯劳	*Lanius cristatus*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[8], [13], [14]等
棕背伯劳	*Lanius schach*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
楔尾伯劳	*Lanius sphenocercus*	3	南沙区, 从化区	[2], [8], [19], [144]
虎纹伯劳	*Lanius tigrinus*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [17], [19], [144]等
鸫科 Turdidae				
橙头地鸫	*Geokichla citrina*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 增城区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [7], [8], [13], [16]等
白眉地鸫	*Geokichla sibirica*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [17], [19]等
虎斑地鸫	*Zoothera aurea*	3	白云区, 从化区, 花都区, 天河区, 越秀区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [5]–[9], [13], [14]等
红尾斑鸫	*Turdus naumanni*	3	白云区, 海珠区, 番禺区	[144]
乌灰鸫	*Turdus cardis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7]–[9], [13], [16]等
黑胸鸫	*Turdus dissimilis*	S, 3	广州市	[17]
斑鸫	*Turdus eunomus*	3	白云区, 海珠区, 番禺区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
灰背鸫	*Turdus hortulorum*	3	广州全境	[1]–[3], [6]–[8], [12]–[14]等
乌鸫	*Turdus mandarinus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
白眉鸫	*Turdus obscurus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
白腹鸫	*Turdus pallidus*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [14]等
赤颈鸫	*Turdus ruficollis*	3	海珠区, 天河区	[17], [19], [144], [146], [148]
钩嘴鹎科 Vangidae				

钩嘴林鹛	*Tephrodornis virgatus*	3	白云区, 增城区, 从化区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]
河乌科 Cinclidae				
褐河乌	*Cinclus pallasii*	3	从化区	[19], [36], [144], [146]
花蜜鸟科 Nectariniidae				
叉尾太阳鸟	*Aethopyga christinae*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [29], [36]等
蓝喉太阳鸟	*Aethopyga gouldiae*	3	白云区, 天河区, 越秀区, 增城区	[3], [7], [15], [17], [19], [144]等
黄腹花蜜鸟	*Cinnyris jugularis*	3	番禺区, 黄埔区, 天河区	[1], [2], [8], [144], [146], [148]
黄鹂科 Oriolidae				
黑枕黄鹂	*Oriolus chinensis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 越秀区, 增城区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
鹊鹂	*Oriolus mellianus*	II, EN	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 花都区, 天河区	[1], [2], [8], [19], [144], [146]等
蝗莺科 Locustellidae				
东亚蝗莺	*Helopsaltes pleskei*	S, 3	广州市	[1], [2], [8]
矛斑蝗莺	*Locustella lanceolata*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[2], [8], [17], [19], [144], [146]等
高山短翅蝗莺	*Locustella mandelli*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[16], [19], [108], [129], [144]等
鹡鸰科 Motacillidae				
白鹡鸰	*Motacilla alba*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [36]等
灰鹡鸰	*Motacilla cinerea*	3	广州全境	[1]–[8], [13]–[19], [36], [37]等
黄头鹡鸰	*Motacilla citreola*	3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 越秀区	[19], [108], [123], [129], [144]等

黄鹡鸰	*Motacilla tschutschensis*	3	广州全境	[1]–[3], [5], [7], [8], [16], [19]等
红喉鹨	*Anthus cervinus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [5]–[8], [13], [19]等
北鹨	*Anthus gustavi*	3	海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
树鹨	*Anthus hodgsoni*	3	广州全境	[1]–[8], [11]–[19], [21], [36]等
田鹨	*Anthus richardi*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [12]–[14]等
粉红胸鹨	*Anthus roseatus*	3	白云区, 花都区, 增城区	[7], [19], [144], [146]
黄腹鹨	*Anthus rubescens*	3	从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[2], [3], [8], [16], [19], [36]等
东方田鹨	*Anthus rufulus*	3	从化区, 黄埔区, 天河区, 白云区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [144]
水鹨	*Anthus spinoletta*	3	从化区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [19], [144]
山鹡鸰	*Dendronanthus indicus*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
鹪鹩科 Troglodytidae				
鹪鹩	*Troglodytes troglodytes*	ii, 3	广州市	[2], [8]
卷尾科 Dicruridae				
鸦嘴卷尾	*Dicrurus annectens*	3	白云区	[132], [145]
发冠卷尾	*Dicrurus hottentottus*	3	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[19]等
古铜色卷尾	*Dicrurus aeneus*	3	从化区	[1], [2], [7], [8], [16]
黑卷尾	*Dicrurus macrocercus*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [12]–[14]等
灰卷尾	*Dicrurus leucophaeus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区, 越秀区	[1]–[3], [7]–[9], [13]–[17]等

椋鸟科 Sturnidae				
八哥	*Acridotheres cristatellus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
斑椋鸟	*Gracupica contra*	3	南沙区	[7], [37]
黑领椋鸟	*Gracupica nigricollis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
北椋鸟	*Agropsar sturninus*	3	海珠区, 南沙区, 越秀区, 增城区, 黄埔区	[1], [2], [6], [8], [14], [19]等
灰背椋鸟	*Sturnia sinensis*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[8], [14], [16]等
灰椋鸟	*Spodiopsar cineraceus*	3	白云区, 从化区, 南沙区, 越秀区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区	[1]–[3], [5], [7], [8], [13], [16]等
丝光椋鸟	*Spodiopsar sericeus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
紫翅椋鸟	*Sturnus vulgaris*	3	从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[2], [8], [16], [19], [114], [144]等
林鹛科 Timaliidae				
红头穗鹛	*Cyanoderma ruficeps*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[17]等
华南斑胸钩嘴鹛	*Erythrogenys swinhoei*	3, T	白云区, 从化区, 花都区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [8], [16], [19], [53]等
棕颈钩嘴鹛	*Pomatorhinus ruficollis*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 番禺区, 南沙区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [13]–[17]等
鳞胸鹪鹛科 Pnoepygidae				
小鳞胸鹪鹛	*Pnoepyga pusilla*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区, 海珠区, 越秀区	[1]–[4], [8], [9], [12], [13]等
柳莺科 Phylloscopidae				
极北柳莺	*Phylloscopus borealis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5], [7], [8], [11], [16]等

栗头鹟莺	*Phylloscopus castaniceps*	3	白云区, 从化区, 黄埔区, 天河区, 海珠区	[4], [7], [8], [17], [19], [53]等
冕柳莺	*Phylloscopus coronatus*	3	广州全境	[1]–[3], [5], [7], [8], [16], [17]等
褐柳莺	*Phylloscopus fuscatus*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[20]等
华南冠纹柳莺	*Phylloscopus goodsoni*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [15], [17]等
黄眉柳莺	*Phylloscopus inornatus*	3	广州全境	[1]–[9], [11]–[19], [36], [37]等
叽喳柳莺	*Phylloscopus collybita*	3	增城区	[141]
白眶鹟莺	*Phylloscopus intermedius*	3	白云区, 天河区, 海珠区	[17], [19], [144], [148]
白斑尾柳莺	*Phylloscopus ogilviegranti*	3	番禺区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [144], [145]
双斑绿柳莺	*Phylloscopus plumbeitarsus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [17], [19]等
黄腰柳莺	*Phylloscopus proregulus*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [11]–[19]等
黑眉柳莺	*Phylloscopus ricketti*	3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
巨嘴柳莺	*Phylloscopus schwarzi*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
淡尾鹟莺	*Phylloscopus soror*	3	海珠区	[1], [2], [8], [17], [19], [144]
淡脚柳莺	*Phylloscopus tenellipes*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [8], [17], [19], [144]等
比氏鹟莺	*Phylloscopus valentini*	3	海珠区, 黄埔区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
梅花雀科 Estrildidae				
斑文鸟	*Lonchura punctulata*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
白腰文鸟	*Lonchura striata*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [12]–[19]等

攀雀科 Remizidae				
中华攀雀	*Remiz consobrinus*	3	从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[2], [8], [19], [36], [37], [104]等
雀科 Passeridae				
山麻雀	*Passer cinnamomeus*	3	白云区, 从化区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区, 海珠区	[1]–[3], [7], [8], [19], [144]等
麻雀	*Passer montanus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
雀鹎科 Alcippeidae				
淡眉雀鹎	*Alcippe hueti*		广州全境	[1]–[5], [7], [8], [12]–[17]等
山椒鸟科 Campephagidae				
暗灰鹃鵙	*Lalage melaschistos*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [14], [16]等
大鹃鵙	*Coracina macei*	3	广州市	[1], [2], [8]
短嘴山椒鸟	*Pericrocotus brevirostris*	3	白云区, 天河区, 从化区, 花都区	[1], [2], [7], [8], [144], [146]
小灰山椒鸟	*Pericrocotus cantonensis*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
灰山椒鸟	*Pericrocotus divaricatus*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [17]等
灰喉山椒鸟	*Pericrocotus solaris*	3	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[17]等
赤红山椒鸟	*Pericrocotus speciosus*	3	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[17]等
山雀科 Paridae				
大山雀	*Parus minor*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
黄腹山雀	*Pardaliparus venustulus*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 从化区	[1], [2], [5], [7], [8], [17], [19]等

黄颊山雀	*Machlolophus spilonotus*	3	白云区, 从化区, 增城区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区	[1]–[5], [7], [8], [13], [16]等
黄眉林雀	*Sylviparus modestus*	3	广州市	[1], [2], [7], [8]
扇尾莺科 Cisticolidae				
黄腹山鹪莺	*Prinia flaviventris*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
灰胸山鹪莺	*Prinia hodgsonii*	3	从化区	[19]
纯色山鹪莺	*Prinia inornata*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [29], [36]等
暗冕山鹪莺	*Prinia rufescens*	3	白云区, 海珠区, 花都区, 番禺区, 天河区, 增城区, 从化区	[19], [144]
山鹪莺	*Prinia striata*	3	海珠区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [144], [145]
白喉山鹪莺	*Prinia superciliaris*		从化区, 黄埔区, 增城区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [15], [16]等
金头扇尾莺	*Cisticola exilis*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7]–[9], [16], [19]等
长尾缝叶莺	*Orthotomus sutorius*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
棕扇尾莺	*Cisticola juncidis*	3	白云区, 从化区, 花都区, 南沙区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5]–[8], [13], [14]等
树莺科 Cettiidae				
淡脚树莺	*Hemitesia pallidipes*	3	白云区, 从化区	[19], [74], [144]
栗头织叶莺	*Phyllergates cucullatus*	3	广州全境	[1], [2], [4], [7]–[9], [13], [15]等
鳞头树莺	*Urosphena squameiceps*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [16]等
远东树莺	*Horornis canturians*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [15]–[17]等

短翅树莺	*Horornis diphone*	3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[6], [7], [17], [20], [146], [148]
强脚树莺	*Horornis fortipes*	3	广州全境	[1]–[5], [7]–[9], [12]–[17]等
棕脸鹟莺	*Abroscopus albogularis*	3	白云区, 从化区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[3], [13], [16], [17], [19], [53]等
王鹟科 Monarchidae				
黑枕王鹟	*Hypothymis azurea*	3	广州全境	[1], [2], [6]–[8], [17], [19]等
寿带	*Terpsiphone incei*	S, 3	白云区, 从化区, 越秀区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
紫寿带	*Terpsiphone atrocaudata*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
苇莺科 Acrocephalidae				
黑眉苇莺	*Acrocephalus bistrigiceps*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [17]等
东方大苇莺	*Acrocephalus orientalis*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
远东苇莺	*Acrocephalus tangorum*	3	增城区	[19], [144]
厚嘴苇莺	*Arundinax aedon*	3	白云区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
绣眼鸟科 Zosteropidae				
暗绿绣眼鸟	*Zosterops simplex*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [36]等
红胁绣眼鸟	*Zosterops erythropleurus*	II	白云区, 从化区, 海珠区, 越秀区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7]–[9], [17], [19]等
栗颈凤鹛	*Staphida torqueola*		广州全境	[13], [17], [19], [53], [144]等
鸦科 Cordae				
红嘴蓝鹊	*Urocissa erythroryncha*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[20]等

白颈鸦	*Corvus pectoralis*	VU, S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [14], [17]等
大嘴乌鸦	*Corvus macrorhynchos*		广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[19]等
小嘴乌鸦	*Corvus corone*		白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区, 海珠区, 南沙区, 越秀区	[3], [12], [16], [19], [53], [74]等
家鸦	*Corvus splendens*		南沙区	[19], [145]
松鸦	*Garrulus glandarius*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7]–[9], [14], [16]等
灰树鹊	*Dendrocitta formosae*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 南沙区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [13]–[17]等
灰喜鹊	*Cyanopica cyanus*	3	白云区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1], [5], [7], [9], [13], [15]等
喜鹊	*Pica serica*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [29], [34]等
鸦雀科 Paradoxornithidae				
点胸鸦雀	*Paradoxornis guttaticollis*	3	从化区, 越秀区	[16], [148]
棕头鸦雀	*Sinosuthora webbiana*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [13], [19]等
燕鹎科 Artamidae				
灰燕鹎	*Artamus fuscus*	3	白云区, 从化区	[8], [19], [144]
燕科 Hirundinidae				
家燕	*Hirundo rustica*	3	广州全境	[1]–[9], [11]–[19], [21], [36]等
金腰燕	*Cecropis daurica*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[17], [19], [34]等
毛脚燕	*Delichon urbicum*	3	增城区	[143]
烟腹毛脚燕	*Delichon dasypus*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[3], [7], [19], [36], [144], [146]等

淡色崖沙燕	*Riparia diluta*	3	白云区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 增城区, 从化区	[19], [53], [144], [148]
燕雀科 Fringillidae				
黑头蜡嘴雀	*Eophona personata*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [5], [8], [16], [17]等
黑尾蜡嘴雀	*Eophona migratoria*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [5]–[8], [11]–[20]等
金翅雀	*Chloris sinica*	3	广州全境	[1]–[9], [13]–[19], [21], [29]等
普通朱雀	*Carpodacus erythrinus*	ii, 3	从化区, 番禺区, 黄埔区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [16], [19]等
燕雀	*Fringilla montifringilla*	3	从化区, 花都区, 黄埔区, 增城区	[4], [19], [144], [146]
铁爪鹀科 Calcariidae				
铁爪鹀	*Calcarius lapponicus*	3	从化区, 天河区	[16], [19]
叶鹎科 Chloropseidae				
橙腹叶鹎	*Chloropsis lazulin*a	3	白云区, 从化区, 增城区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5], [7]–[9], [13], [16]等
莺雀科 reonidae				
白腹凤鹛	*Erpornis zantholeuca*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5], [7], [8], [13], [16]等
幽鹛科 Pellorneidae				
褐顶雀鹛	*Schoeniparus brunneus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 黄埔区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
中华草鹛	*Graminicola striatus*	S, 3	越秀区, 从化区	[1], [2], [8], [19]
玉鹟科 Stenostiridae				
方尾鹟	*Culicicapa ceylonensis*		白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [6]–[9], [15]–[17]等
噪鹛科 Leiothrichidae				

黑喉噪鹛	*Pterorhinus chinensis*	II	白云区, 花都区, 天河区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7]–[9], [12]–[17]等
黑领噪鹛	*Pterorhinus pectoralis*	3	广州全境	[1]–[3], [7]–[9], [13]–[16]等
黑脸噪鹛	*Pterorhinus perspicillatus*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
白颊噪鹛	*Pterorhinus sannio*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 番禺区, 南沙区, 越秀区	[1]–[3], [5], [7]–[9], [13], [16]等
红嘴相思鸟	*Leiothrix lutea*	II, ii	白云区, 从化区, 黄埔区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 天河区, 越秀区	[1]–[5], [7], [8], [13]–[17]等
画眉	*Garrulax canorus*	II, ii	广州全境	[1]–[9], [11]–[20], [29], [34]等
小黑领噪鹛	*Garrulax monileger*	3	白云区, 从化区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [14], [16]等
莺鹛科 Syldae				
白喉林莺	*Curruca curruca*	ii, 3	荔湾区, 越秀区	[19], [99], [144], [148]
长尾山雀科 Aegithalidae				
红头长尾山雀	*Aegithalos concinnus*	3	广州全境	[1]–[4], [7]–[9], [12]–[19]等
啄花鸟科 Dicaeidae				
纯色啄花鸟	*Dicaeum minullum*	3	白云区, 从化区, 增城区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 黄埔区, 越秀区	[1]–[3], [6]–[9], [16], [17]等
红胸啄花鸟	*Dicaeum ignipectus*	3	广州全境	[1]–[3], [7]–[9], [13], [15]等
朱背啄花鸟	*Dicaeum cruentatum*	3	广州全境	[1], [2], [4], [7], [8], [13], [15]等
鹟科 Muscicapidae				
白额燕尾	*Enicurus leschenaulti*	3	白云区, 从化区, 增城区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [8], [9], [13], [14]等
斑背燕尾	*Enicurus maculatus*	3	从化区	[19], [146]

灰背燕尾	*Enicurus schistaceus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 荔湾区, 南沙区, 越秀区	[1]–[4], [7]–[9], [14], [16]等
小燕尾	*Enicurus scouleri*	3	从化区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
白腹蓝鹟	*Cyanoptila cyanomelana*	3	广州全境	[1]–[3], [7], [8], [17]–[19]等
白喉短翅鸫	*Brachypteryx leucophris*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 增城区, 海珠区, 南沙区, 越秀区	[1]–[3], [7]–[9], [12], [13]等
白喉林鹟	*Cyornis brunneatus*	II, VU	白云区, 从化区, 海珠区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
中华仙鹟	*Cyornis glaucicomans*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[3], [16], [17], [19], [144], [148]
海南蓝仙鹟	*Cyornis hainanus*	S, 3	广州全境	[1]–[3], [7]–[9], [12], [13]等
白尾蓝地鸲	*Myiomela leucura*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[2], [3], [13], [17], [19], [53]等
北红尾鸲	*Phoenicurus auroreus*	3	广州全境	[1]–[8], [11]–[19], [21], [36]等
红尾水鸲	*Phoenicurus fuliginosus*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[8], [13], [14], [16], [17]等
北灰鹟	*Muscicapa dauurica*	3	广州全境	[1]–[3], [5]–[9], [12], [16]等
棕尾褐鹟	*Muscicapa ferruginea*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [16]等
灰纹鹟	*Muscicapa griseisticta*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 黄埔区, 荔湾区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7]–[9], [13], [16]等
褐胸鹟	*Muscicapa muttui*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [13], [17]等
乌鹟	*Muscicapa sibirica*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [15]–[17]等
东亚石鹏	*Saxicola stejnegeri*		广州全境	[1]–[8], [11]–[17], [19], [36]等
红喉歌鸲	*Calliope calliope*	II	广州全境	[1]–[3], [7], [8], [14], [16]等
红喉姬鹟	*Ficedula albicilla*	3	广州全境	[1]–[3], [7], [8], [13], [15]等

绿背姬鹟	*Ficedula elisae*	S, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [8], [17], [19], [144]等
锈胸蓝姬鹟	*Ficedula erithacus*	3	白云区, 海珠区, 天河区	[19], [144]
棕胸蓝姬鹟	*Ficedula hyperythra*	3	海珠区	[17], [19], [148]
鸲姬鹟	*Ficedula mugimaki*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [17]等
黄眉姬鹟	*Ficedula narcissina*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [5], [7]–[9], [13], [16]等
红胸姬鹟	*Ficedula parva*	ii, 3	白云区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[19], [74], [144], [146], [148]
橙胸姬鹟	*Ficedula strophiata*	3	海珠区, 南沙区, 白云区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
白眉姬鹟	*Ficedula zanthopygia*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [17]等
红胁蓝尾鸲	*Tarsiger cyanurus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 南沙区	[1]–[8], [13], [14], [16]–[19]等
灰林鹏	*Saxicola ferreus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 荔湾区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
蓝喉歌鸲	*Luscinia svecica*	II, ii	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [17], [19]等
白喉矶鸫	*Monticola gularis*	3	白云区, 海珠区, 番禺区, 黄埔区, 天河区	[1], [2], [8], [17], [19], [144]等
栗腹矶鸫	*Monticola rufiventris*	3	从化区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]等
蓝矶鸫	*Monticola solitarius*	3	广州全境	[1]–[3], [6]–[8], [14], [16]等
鹊鸲	*Copsychus saularis*	3	广州全境	[1]–[9], [12]–[19], [21], [29]等
日本歌鸲	*Larvivora akahige*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 花都区, 荔湾区, 天河区, 增城区	[1], [2], [8], [13], [17], [19]等
蓝歌鸲	*Larvivora cyane*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等

红尾歌鸲	*Larvivora sibilans*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1], [2], [6]–[8], [17]–[20]等
铜蓝鹟	*Eumyias thalassinus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[4], [6], [8], [13], [16]等
紫啸鸫	*Myophonus caeruleus*	3	广州全境	[1]–[4], [6]–[9], [12]–[19]等
棕腹大仙鹟	*Niltava davidi*	II	白云区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [17], [19]等
小仙鹟	*Niltava macgrigoriae*	3	白云区, 从化区, 海珠区, 天河区, 增城区	[1], [2], [8], [17], [19], [74]等
棕腹仙鹟	*Niltava sundara*	3	海珠区, 天河区	[1], [2], [7], [8], [17], [148]
山蓝仙鹟	*Cyornis whitei*	3	海珠区	[1], [2], [8], [17], [144], [146]
鹀科 Emberizidae				
黄胸鹀	*Emberiza aureola*	I, CR	白云区, 南沙区, 从化区, 海珠区, 黄埔区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [17], [19]等
黄眉鹀	*Emberiza chrysophrys*	S, 3	从化区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1]–[3], [6]–[8], [19], [21]等
三道眉草鹀	*Emberiza cioides*	S, 3	从化区, 南沙区, 天河区	[4], [8], [144]
黄喉鹀	*Emberiza elegans*	S, 3	海珠区	[1], [2], [5], [8], [51], [72]
栗耳鹀	*Emberiza fucata*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[2]–[4], [8], [13], [16], [19]等
凤头鹀	*Emberiza lathami*	S, 3	从化区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [144]等
黑头鹀	*Emberiza melanocephala*	3	黄埔区, 增城区, 天河区	[2], [8], [19], [95], [98], [144]
小鹀	*Emberiza pusilla*	S, 3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[8], [13]–[17], [19], [20]等
田鹀	*Emberiza rustica*	S, 3	从化区, 黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [19]等
栗鹀	*Emberiza rutila*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [16], [17]等
芦鹀	*Emberiza schoeniclus*	S, 3	黄埔区, 南沙区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [19], [37]等

灰头鹀	*Emberiza spodocephala*	S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 增城区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[8], [12]–[14], [16], [19]等
白眉鹀	*Emberiza tristrami*	S, 3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 番禺区, 海珠区, 黄埔区, 南沙区, 天河区, 越秀区	[1]–[3], [5], [7], [8], [13], [16]等
红颈苇鹀	*Emberiza yessoensis*	3	从化区, 南沙区	[146]
哺乳纲 MAMMALIA				
灵长目 PRIMATES				
猴科 Cercopithecidae				
猕猴	*Macaca mulatta*	II, ii	从化区, 黄埔区	[2], [7], [8], [101], [146], [147]
兔形目 LAGOMORPHA				
兔科 Leporidae				
华南兔	*Lepus sinensis*	3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [36]
啮齿目 RODENTIA				
豪猪科 Hystricidae				
马来豪猪	*Hystrix brachyura*	3	白云区, 从化区, 花都区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [15], [36]
鼠科 Muridae				
板齿鼠	*Bandicota indica*		白云区, 番禺区, 花都区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [14]等
北社鼠	*Niviveer confucianus*		从化区, 增城区	[1]–[4], [8]
巢鼠	*Micromys minutus*		从化区, 增城区	[2], [3], [7], [8], [145]
大足鼠	*Rattus nitidus*		增城区	[1]–[3], [8]
褐家鼠	*Rattus norvegicus*		白云区, 从化区, 番禺区, 增城区, 海珠区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
黑家鼠	*Rattus rattus*		从化区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [14], [45]

黑缘齿鼠	*Rattus andamanensis*		番禺区, 海珠区, 增城区	[1]–[3], [8], [146]–[148]
黄毛鼠	*Rattus losea*		白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [13], [14], [45]
黄胸鼠	*Rattus tanezumi*		白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 增城区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12], [13]等
卡氏小鼠	*Mus caroli*		增城区	[1]–[3], [8], [45], [98]
青毛巨鼠	*Berylmys bowersi*		从化区	[2], [7], [8]
小家鼠	*Mus musculus*		白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 增城区, 海珠区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
小泡巨鼠	*Leopoldamys edwardsi*		从化区, 花都区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [14]
针毛鼠	*Niviveer fulvescens*		白云区, 从化区, 花都区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [13], [14]等
松鼠科 Sciuridae				
赤腹松鼠	*Callosciurus erythraeus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 花都区, 天河区, 增城区	[2], [3], [7], [8], [11]–[13]等
红背鼯鼠	*Petaurista petaurista*	S, 3	从化区	[7]
倭花鼠	*Tamiops maritimus*	3	白云区, 从化区, 番禺区, 海珠区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [11]–[15]等
鼹型鼠科 Spalacidae				
银星竹鼠	*Rhizomys pruinosus*	3	白云区, 从化区, 花都区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [11], [12]等
中华竹鼠	*Rhizomys sinensis*	3	白云区, 从化区, 增城区	[1], [2], [4], [7], [8], [14], [36]
劳亚食虫目 EULIPOTYPHLA				
鼩鼱科 Soricidae				
臭鼩	*Suncus murinus*		白云区, 从化区, 海珠区, 花都区, 番禺区, 增城区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [12]–[15]等
华南中麝鼩	*Crocidura rapax*	T	白云区	[2], [7], [8]
灰麝鼩	*Crocidura attenuata*		白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[2], [3], [7], [8], [12], [13], [15]
利安德水鼩	*Chimarrogale leander*		从化区	[100], [144]

猬科 Erinaceidae				
东北刺猬	*Erinaceus amurensis*	3	从化区，花都区	[2], [7], [8]
翼手目 CHIROPTERA				
蝙蝠科 Vespertilionidae				
斑蝠	*Scotomanes ornatus*		广州市区	[1]
彩蝠	*Kerivoula picta*	S	广州市	[1], [2], [7], [8], [58], [59]
大黄蝠	*Scotophilus heathii*		从化区	[1], [2], [7], [8], [58], [59]
大卫鼠耳蝠	*Myotis davidii*	T	广州市	[1]
大足鼠耳蝠	*Myotis pilosus*	VU	增城区	[2], [3], [8], [98]
东方棕蝠	*Eptesicus pachyomus*		花都区	[2], [8], [98]
东亚伏翼	*Pipistrellus abramus*		白云区，从化区，花都区，增城区，番禺区，海珠区，天河区	[1]–[3], [7], [8], [12], [13]等
华南扁颅蝠	*Tylonycteris fulvida*		白云区，增城区，花都区	[1]–[3], [7], [8], [13], [14]等
华南水鼠耳蝠	*Myotis laniger*		花都区	[1], [8]
灰伏翼	*Hypsugo pulveratus*		从化区，番禺区	[1], [2], [7], [8], [43], [47], [59]等
霍氏鼠耳蝠	*Myotis horsfieldii*		花都区	[1], [2], [8]
卡氏伏翼	*Hypsugo cadornae*		增城区	[2], [3], [8], [98]
尼泊尔鼠耳蝠	*Myotis nipalensis*		从化区	[2], [8], [98]
普通伏翼	*Pipistrellus pipistrellus*		白云区，番禺区，天河区，增城区	[1]–[3], [8], [12]–[15]
山地鼠耳蝠	*Myotis moivagus*		从化区，增城区	[2], [8], [98]
托京褐扁颅蝠	*Tylonycteris tonkinensis*		广州市	[2], [8]

小黄蝠	*Scotophilus kuhlii*		增城区, 花都区	[1]–[3], [7], [8], [14], [58], [59]
印度伏翼	*Pipistrellus coromandra*		广州市	[1]
圆耳管鼻蝠	*Murina cyclotis*		广州市	[1]
长指鼠耳蝠	*Myotis longipes*		增城区	[2], [3], [8], [98]
中华山蝠	*Nyctalus plancyi*	T	花都区	[1], [2], [7], [8], [58], [59]
中华鼠耳蝠	*Myotis chinensis*		番禺区, 天河区, 增城区	[2], [3], [8], [12], [15]
侏伏翼	*Pipistrellus tenuis*		花都区	[1], [2], [7], [8]
狐蝠科 Pteropodidae				
犬蝠	*Cynopterus sphinx*		白云区, 从化区, 增城区, 花都区, 黄埔区, 天河区, 越秀区	[1], [2], [7], [8], [13], [14]等
棕果蝠	*Rousettus leschenaultii*	3	增城区, 花都区	[1], [2], [7], [8], [14], [59]
菊头蝠科 Rhinolophidae				
大菊头蝠	*Rhinolophus luctus*	S	增城区	[1], [14]
皮氏菊头蝠	*Rhinolophus pearsonii*		从化区	[2], [8], [98]
清迈菊头蝠	*Rhinolophus siamensis*		广州市	[1]
小菊头蝠	*Rhinolophus pusillus*		番禺区, 天河区, 花都区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [12], [14]等
中华菊头蝠	*Rhinolophus sinicus*		从化区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [43], [47], [59]
中菊头蝠	*Rhinolophus affinis*		白云区, 增城区, 从化区	[1], [2], [7], [8], [13], [59]
鞘尾蝠科 Emballonuridae				
黑髯墓蝠	*Taphozous melanopogon*		广州市	[1]
蹄蝠科 Hipposideridae				
无尾蹄蝠	*Coelops frithii*		广州市	[1]

大帝蝠	*Hipposideros armiger*		广州市	[2], [8], [98]
小蹄蝠	*Hipposideros pomona*	EN	从化区, 花都区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [59]
中蹄蝠	*Hipposideros larvatus*		番禺区, 天河区, 增城区	[2], [3], [8], [12], [14], [15]等
长翼蝠科 Miniopteridae				
南长翼蝠	*Miniopterus pusillus*		增城区	[1]–[3], [8]
亚洲长翼蝠	*Miniopterus fuliginosus*	VU	番禺区, 增城区, 天河区	[1]–[3], [8], [12], [14], [15]
鲸偶蹄目 CETARTIODACTYLA				
鹿科 Cerdae				
赤鹿	*Muiacus vaginalis*	S, 3	白云区, 从化区, 花都区	[1], [2], [4], [7], [8], [13], [92]等
水鹿	*Rusa unicolor*	II, VU	从化区, 海珠区	[1], [2], [7], [8], [146]
小鹿	*Muiacus reevesi*	S, 3, T	从化区, 天河区, 增城区	[1]–[3], [7], [8], [14], [15]
牛科 Bodae				
中华鬣羚	*Capricornis milneedwardsii*	II, VU, i	从化区	[1], [2], [7], [8]
猪科 Suidae				
野猪	*Sus scrofa*		白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [11], [14]等
鳞甲目 PHOLIDOTA				
鲮鲤科 Manidae				
中华穿山甲	*Manis pentadactyla*	I, CR, i	白云区, 从化区, 花都区	[1], [2], [4], [7], [8], [36]等
食肉目 CARNIVORA				
林狸科 Prionodontidae				
斑林狸	*Prionodon pardicolor*	II, i	从化区, 增城区	[2]–[4], [7], [8], [98]

花面狸	*Paguma larvata*	ii, 3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区, 番禺区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [11]–[15]
灵猫科 verridae				
大灵猫	*Viverra zibetha*	I, ii	从化区, 花都区	[2], [7], [8]
小灵猫	*Viverricula indica*	I, ii	从化区	[1], [2], [7], [8], [101]
猫科 Felidae				
豹猫	*Prionailurus bengalensis*	II, ii	白云区, 从化区, 花都区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [11], [13]等
云豹	*Neofelis nebulosa*	I, VU, i	从化区	[1], [2], [7], [8]
獴科 Herpestidae				
红颊獴	*Herpestes javanicus*	ii, S, 3	白云区, 增城区	[1], [2], [7], [8], [14], [36]
食蟹獴	*Herpestes urva*	ii, S, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 黄埔区	[1], [2], [7], [8], [36]
犬科 Canidae				
赤狐	*Vulpes vulpes*	II	从化区, 花都区, 增城区	[1], [2], [7], [8]
貉	*Nyctereutes procyonoides*	II	从化区	[1], [2], [7], [8]
鼬科 Mustelidae				
黄腹鼬	*Mustela kathiah*	ii, 3	白云区, 从化区, 番禺区, 天河区, 增城区	[1]–[4], [7], [8], [11]–[15], [36]
黄喉貂	*Martes flavigula*	II, ii	从化区	[1], [2], [7], [8]
黄鼬	*Mustela sibirica*	ii, 3	白云区, 从化区, 花都区, 增城区	[1], [2], [4], [7], [8], [13]
欧亚水獭	*Lutra lutra*	II, i	广州市	[1], [2], [7], [8]
亚洲狗獾	*Meles leucurus*	3	从化区, 花都区	[1], [2], [7], [8]
鼬獾	*Melogale moschata*	3	白云区, 番禺区, 增城区, 从化区, 天河区	[1]–[4], [7], [8], [11]–[15]等
猪獾	*Arctonyx collaris*	VU, 3	从化区, 花都区	[1], [2], [7], [8]

I: 国家重点保护野生动物名录(2021)一级保护野生动物; II: 国家重点保护野生动物名录(2021)二级保护野生动物。CR: 世界自然保护联盟濒危物种红色名录极危物种(2025-2); EN:

世界自然保护联盟濒危物种红色名录濒危物种(2025-2); VU: IUCN 易危物种(2025-2)。i: 濒危野生动植物种国际贸易公约(2023)附录 I 物种; ii: 濒危野生动植物种国际贸易公约(2023)附录 II 物种; iii: 濒危野生动植物种国际贸易公约(2023)附录 III 物种。S: 广东省重点保护陆生野生动物名录(2021)物种。3: 有重要生态、科学、社会价值的陆生野生动物名录(2023)物种。数据来源详见附录 2。

附录4　用于MaxEnt物种分布模型的环境变量类别与数据来源

Appendix 4　Environmental variable categories and data sources for MaxEnt species distribution modeling

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	数据来源 Data source
气候变量	年均气温	美国国家气候数据中心(https://www.ncdc.noaa.gov/)
	气温年变化	美国国家气候数据中心(https://www.ncdc.noaa.gov/)
	年降水量	美国国家气候数据中心(https://www.ncdc.noaa.gov/)
	降水量季节变化	美国国家气候数据中心(https://www.ncdc.noaa.gov/)
	相对湿度	美国国家气候数据中心(https://www.ncdc.noaa.gov/)
生境变量	土地类型	欧洲航天局(ESA)的全球陆地覆盖数据集(1992–2020年) (https://www.esa.int/), 重分类为7类, 即耕地、林地、灌丛、草地、水体、湿地和城镇用地
	土地类型多样性	欧洲航天局(ESA)的全球陆地覆盖数据集(1992–2020年) (https://www.esa.int/), 重分类为7类, 即耕地、林地、灌丛、草地、水体、湿地和城镇用地
	湿地类型	全国湿地分布数据集(Li & Niu, 2022), 重分类为5类, 包括河流湖泊、浅海水域、水田养殖塘、内陆沼泽和无湿地分布
	植被类型	欧洲航天局的全球植物功能类型(PFT)数据集
	植被覆盖度	国家青藏高原科学数据中心的中国区域250米归一化植被指数数据集(2000–2022)
	水网密度	OpenStreetMap网站的水系矢量线数据(https://www.openstreetmap.org/), 通过GIS线密度分析工具计算
	水网深度	为解决河道形态、湖泊地形与海底地貌的数据融合问题, 实现水域三维连续表面的精确构建, 本研究采用三源数据协同处理方案: (1)全球河岸宽度和深度数据(Andreadis et al., 2013); (2)湖泊水深数据, 来源于GLOBathy数据集(https://earthengine.google.com/); (3)海底及陆地地形数据, 源自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的ETOPO 2022全球地形模型(https://www.ncei.noaa.gov/)。以上三者依次叠加进行空间叠加与栅格计算(100 m分辨率), 生成整合河流、湖泊和海域的复合水深栅格数据。
	高程	地理空间数据云平台的ASTER GDEMV3数据集(https://www.gscloud.cn/), 通过GIS表面分析工具计算
	坡度	地理空间数据云平台的ASTER GDEMV3数据集(https://www.gscloud.cn/), 通过GIS表面分析工具计算
干扰变量	建筑密度	欧盟委员会的全球人类住区层数据集
	建筑高度	中国建筑高度数据集(Wu et al., 2023)

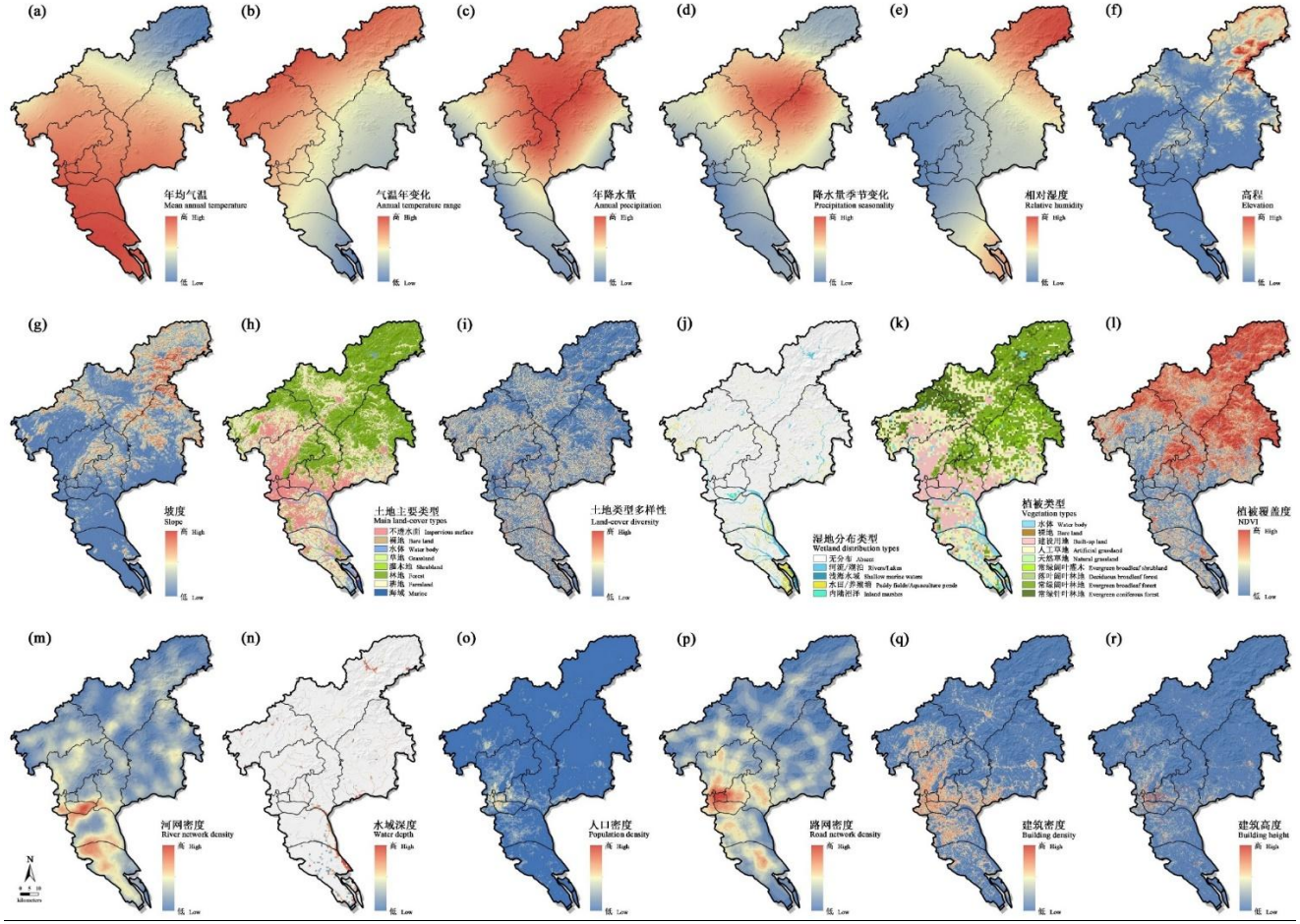
人口密度	欧盟委员会的全球人类住区层数据集的全球人口数据
路网密度	北京大学地理数据平台的全国主要道路数据集(http://geodata.pku.edu.cn), 通过GIS表面分析工具计算

Andreadis KM, Schumann GJ, Pavelsky T (2013) A simple global river bankfull width and depth database. Water Resources Research, 49, 7164–7168.

Li Y, Niu ZG (2022) Systematic method for mapping fine-resolution water cover types in China based on time series Sentinel-1 and 2 images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 106, 102656.

Wu WB, Ma J, Banzhaf E, Meadows ME, Yu ZW, Guo FX, Sengupta D, Cai XX, Zhao B (2023) A first Chinese building height estimate at 10 m resolution (CNBH-10 m) using multi-source earth observations and machine learning. Remote Sensing of Environment, 291, 113578.

梁健超, 陈淑甜, 何文祥, 熊春妮, 许镇洲, 黄源欣, 刘源志弘, 张浪, 胡慧建 (2026) 广州市陆生野生脊椎动物资源: 多样性、分布与保护空缺. 生物多样性, 34, 25422. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025422



附录5　广州市环境数据空间分布

Appendix 5　Spatial distribution of environmental data in Guangzhou

附录6　广州市陆生野生脊椎动物重要栖息地名录

Appendix 6　List of key habitats for wild terrestrial vertebrates in Guangzhou

序号 No.	名称 Name	行政区 District	面积 Area (km²)	主要分布物种 Main species	现有主要保护形式 Current primary protection designation
1	**海珠湿地**	海珠区	7.7	虎纹蛙(*Hoplobatrachus chinensis*), 中白鹭(*Ardea intermedia*), 苍鹰(*Accipiter gentilis*), 鸳鸯(*Aix galericulata*), 黑翅鸢(*Elanus caeruleus*), 画眉(*Garrulax canorus*), 领鸺鹠(*Glaucidium brodiei*), 赤腹鹰(*Accipiter soloensis*)等	广东海珠国家湿地公园
2	**白云山**	白云区	18.6	虎纹蛙, 三索锦蛇(*Coelognathus radiatus*), 领角鸮(*Otus lettia*), 黄嘴角鸮(*Otus spilocephalus*), 斑头鸺鹠(*Glaucidium cuculoides*), 蛇雕(*Spilornis cheela*), 凤头蜂鹰(*Pernis ptilorhynchus*), 豹猫(*Prionailurus bengalensis*)等	广东白云山国家级风景名胜区
3	**白云湖**	白云区	0.6	虎纹蛙, 凤头鹰(*Accipiter trivirgatus*), 普通鵟(*Buteo japonicus*), 褐翅鸦鹃(*Centropus sinensis*), 画眉, 斑头鸺鹠, 白胸翡翠(*Halcyon smyrnensis*)等	广州白云湖区级湿地公园
4	**帽峰山-凤凰山**	白云/天河区	81.0	虎纹蛙, 赤腹鹰, 普通鵟, 领角鸮, 斑头鸺鹠, 红嘴相思鸟(*Leiothrix lutea*), 白鹇(*Lophura nycthemera*), 豹猫等	广州帽峰山省级森林公园, 广州天河凤凰山地方级森林公园
5	**风云岭**	从化区	3.3	平胸龟(*Platysternon megacephalum*), 眼镜王蛇(*Ophiophagus hannah*), 蛇雕, 普通鵟, 红隼(*Falco tinnunculus*), 白胸翡翠, 黑鸢(*Milvus migrans*), 豹猫等	广州从化风云岭地方级森林公园
6	**流溪河-陈禾洞-石门**	从化区	550.8	平胸龟, 蟒(*Python bivittatus*), 蓝喉蜂虎(*Merops viridis*), 黄嘴角鸮, 中华穿山甲(*Manis pentadactyla*), 猕猴(*Macaca mulatta*), 豹猫, 斑林狸(*Prionodon pardicolor*)等	广东流溪河国家森林公园, 广州陈禾洞地方级自然保护区, 广东石门国家森林公园
7	**海鸥岛**	番禺区	4.5	虎纹蛙, 白胸翡翠, 中白鹭, 黑翅鸢, 黑鸢, 红隼, 松	广州番禺海鸥岛红树林地方级

序号 No.	名称 Name	行政区 District	面积 Area (km²)	主要分布物种 Main species	现有主要保护形式 Current primary protection designation
				雀鹰(*Accipiter virgatus*), 蒙古沙鸻(*Charadrius mongolus*)等	湿地公园
8	**莲花山**	番禺区	1.4	虎纹蛙, 普通鵟, 褐翅鸦鹃, 画眉, 黑鸢, 凤头蜂鹰, 中白鹭等	广州莲花山地方级风景名胜区
9	**大夫山-滴水岩**	番禺区	12.0	虎纹蛙, 红隼, 画眉, 褐翅鸦鹃, 斑头鸺鹠, 白鹇, 黑鸢, 黑喉噪鹛(*Pterorhinus chinensis*)等	广州番禺大夫山地方级森林公园, 广州番禺滴水岩地方级森林公园
10	**九龙潭-茂墩湖**	花都/从化区	69.5	虎纹蛙, 松雀鹰, 褐翅鸦鹃, 红隼, 画眉, 斑头鸺鹠, 白胸翡翠, 黑鸢等	广州花都九龙潭地方级森林公园, 广州从化茂墩湖地方级森林公园
11	**王子山-称砣顶**	花都区	45.1	眼镜王蛇, 蟒, 蛇雕, 日本松雀鹰(*Accipiter gularis*), 红嘴相思鸟, 小鸦鹃(*Centropus bengalensis*), 黑鸢, 豹猫等	广州王子山地方级森林公园, 广州花都称砣顶地方级森林公园
12	**丫髻岭**	花都区	7.3	虎纹蛙, 燕隼(*Falco subbuteo*), 红嘴相思鸟, 白鹇, 黑鸢, 凤头蜂鹰, 豹猫等	广州花都丫髻岭地方级森林公园
13	**花都湖**	花都区	0.7	虎纹蛙, 画眉, 普通鵟, 褐翅鸦鹃, 中白鹭, 领鸺鹠, 黑鸢等	广东花都湖国家湿地公园
14	**金坑-油麻山**	黄埔区	5.7	赤腹鹰, 凤头鹰, 领鸺鹠, 斑头鸺鹠, 白胸翡翠, 蓝喉蜂虎, 黑鸢, 蛇雕等	广州黄埔金坑地方级森林公园, 广州黄埔油麻山地方级森林公园
15	**龙头山**	黄埔区	2.5	凤头鹰, 普通鵟, 褐翅鸦鹃, 斑头鸺鹠, 白鹇, 黑鸢, 蛇雕等	广州黄埔龙头山地方级森林公园
16	**十八罗汉山**	南沙区	2.2	黑冠鹃隼(*Aviceda leuphotes*), 小鸦鹃, 褐翅鸦鹃, 红隼, 画眉, 黑喉噪鹛, 蛇雕, 豹猫等	广州南沙十八罗汉山地方级森林公园
17	**黄山鲁-大山�look**	南沙区	18.0	红隼, 凤头蜂鹰, 黑鸢, 普通鵟, 白腹鹞(*Circus spilonotus*), 斑头鸺鹠, 中白鹭, 豹猫等	广州南沙黄山鲁地方级森林公园, 广州南沙大山鳁地方级森林公园
18	**大虎山**	南沙区	1.5	白腹鹞, 松雀鹰, 黑翅鸢, 斑头鸺鹠, 白胸翡翠, 黑鸢, 凤头蜂鹰, 蛇雕等	广州南沙大虎山地方级地质公园
19	**南沙湿地**	南沙区	48.7	东方白鹳(*Ciconia boyciana*), 小青脚鹬(*Tringa guttifer*), 黑脸琵鹭(*Platalea minor*), 黄嘴白鹭(*Egretta eulophotes*), 白腹鹞, 黑翅鸢, 白琵鹭	广州南沙湿地地方级湿地公园

序号 No.	名称 Name	行政区 District	面积 Area (km²)	主要分布物种 Main species	现有主要保护形式 Current primary protection designation
				(*Platalea leucorodia*), 凤头蜂鹰等	
20	**沙溪-中新**	增城/从化区	46.6	虎纹蛙, 红喉歌鸲(*Calliope calliope*), 小鸦鹃, 黑翅鸢, 燕隼, 白鹇, 蓝喉蜂虎, 豹猫等	广州从化沙溪和外婆家地方级森林公园, 广州增城中新地方级森林公园
21	**太子兰溪**	增城区	78.5	眼镜王蛇, 蟒, 红角鸮(*Otus sunia*), 黄嘴角鸮, 赤腹鹰, 黑冠鹃隼, 蓝喉蜂虎, 豹猫等	广东太子兰溪地方级森林公园
22	**白水山**	增城区	69.0	虎纹蛙, 黄胸鹀(*Emberiza aureola*), 凤头鹰, 斑头鸺鹠, 凤头蜂鹰, 蛇雕, 黑翅鸢, 豹猫等	广州增城白水山地方级森林公园
23	**南香山**	增城区	8.9	虎纹蛙, 赤腹鹰, 松雀鹰, 普通鵟, 褐翅鸦鹃, 红隼, 白鹇, 黑鸢等	广州增城南香山地方级森林公园
24	**白水寨-大东坑**	增城区	215.4	眼镜王蛇, 蟒, 白眉山鹧鸪(*Arborophila gingica*), 领角鸮, 蓝喉歌鸲(*Luscinia svecica*), 仙八色鸫(*Pitta nympha*), 凤头蜂鹰, 豹猫等	广州增城白水寨地方级风景名胜区, 广州增城大东坑次生林地方级自然保护区

附录7　广州市陆生野生脊椎动物无效物种记录核减情况

Appendix 7　Review and removal of invalid species records of wild terrestrial vertebrates in Guangzhou

纲 Class	种 Species	删减的原因 Reason for deletion
两栖纲	棘腹蛙 *Quasipaa boulengeri*	该物种的已知自然分布区与广州地区不符, 缺乏其在该区域存在的生物地理学依据。现有记录极可能源于与近似物种“小棘蛙(*Quasipaa exilispinosa*)”的形态学误判。
爬行纲	黿 *Pelochelys cantorii*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
爬行纲	四眼斑水龟 *Sacalia quadriocellata*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
爬行纲	北草蜥 *Takydromus septentrionalis*	该物种的已知自然分布区最南缘位于北回归线以北, 与广州市的地理位置不符。且相关专家曾专程赴广州从化区进行针对性调查, 亦未发现其分布证据。
爬行纲	过树蛇 *Dendrelaphis pictus*	广州地区并非该物种的已知自然分布区, 缺乏其在此地建立种群的生态学与地理学依据。该记录极有可能源于调查过程中因方言俗称相似而导致的误记。例如, 灰鼠蛇(*Ptyas korros*)的粤语俗称“过树榕”在听记时易被误为“过树蛇”。
爬行纲	百花锦蛇 *Elaphe moellendorffi*	该物种为喀斯特地貌洞穴栖居型动物。广州地区缺乏喀斯特地貌, 不具备其自然生存的栖息地基础。疑似来源于野生动物非法贸易活动所致的个体逃逸或暂养, 而非本地自然起源的野外种群。
爬行纲	虎斑颈槽蛇 *Rhabdophis tigrinus*	该物种在广州地区并无自然种群分布。现有记录所涉个体, 实为人为放生所致, 并非本地原生或自然扩散形成的稳定种群。
鸟纲	白腹军舰鸟 *Fregata andrewsi*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
鸟纲	栗鸢 *Haliastur indus*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
鸟纲	灰背隼 *Falco columbarius*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
鸟纲	蓝胸鹑 *Synoicus chinensis*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑, 疑似逃逸物种。
鸟纲	姬鹬 *Lymnocryptes minimus*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。

鸟纲	白眉棕啄木鸟 *Sasia ochracea*	该物种在广州地区的记录在近几十年内始终缺失, 其历史数据的时效性与可靠性存疑。
鸟纲	家八哥 *Acridotheres tristis*	该物种为养殖逃逸物种。
鸟纲	纯蓝仙鹟 *Cyornis unicolor*	该物种的已知自然分布区与广州地区不符, 缺乏其在该区域存在的生物地理学依据。现有记录可能源于个体逃逸。
鸟纲	褐头雀鹛 *Fulvetta manipurensis*	该物种的已知自然分布区与广州地区不符, 缺乏在该区域分布的生物地理学依据; 同时, 广州地区近几十年来持续缺乏可靠记录, 因而其历史数据的时效性与可靠性均存疑。
鸟纲	蓝翅希鹛 *Actinodura cyanouroptera*	该物种为养殖逃逸物种。
鸟纲	绒额鸭 *Sitta frontalis*	该物种为养殖逃逸物种。
鸟纲	褐灰雀 *Pyrrhula nipalensis*	该物种在广州地区近几十年来持续缺乏可靠记录, 其很可能属于逃逸个体。
哺乳纲	短耳犬蝠 *Cynopterus sphinx*	该物种的已知分布区以南亚和东南亚为主, 在我国境内仅香港有历史记载。近年来在广州及周边地区多次观测并记录到的, 均为同科的犬蝠(短吻果蝠 *Cynopterus sphinx*)。
哺乳纲	红颊长吻松鼠 *Dremomys rufigenis*	该物种的历史分布区位于粤东。依据近年监测, 广州周边珠三角、粤北地区所记录到的均为外形高度相似的红腿长吻松鼠, 并未发现其可靠记录。因此, 此前广州地区的相关记录存在误记可能。

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 26028, pages 1–15
doi: 10.17520/biods.2026028
cstr: 32101.14.biods.2026028

•研究报告•

荒漠草原土壤丛枝菌根真菌群落对降水变化的响应

郭蓉[1,2], 吴旭东[3,4], 张雨[2], 康瑞红[2], 王一凡[2], 王占军[3,4], 蒋齐[3,4], 俞鸿千[3,4], 马琨[1,2,4*]

1. 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 3. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002; 4. 宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站, 宁夏盐池 751500

摘要: 丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是陆地生态系统中关键的植物共生体, 研究降水变化背景下AM真菌群落特征及其与植物和土壤因子之间的关系, 对维持荒漠草原生态系统稳定性具有重要的理论意义。本研究于2019–2021年在宁夏盐池县开展降水控制试验, 采用单因素完全随机设计, 设置D50 (自然降水–50%)、D25 (自然降水–25%)、CK (自然降水)、I25 (自然降水+25%)和I50 (自然降水+50%) 5种降水处理, 基于Illumina高通量测序技术, 并结合Mantel分析、随机森林分析和偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析, 探讨降水格局变化对荒漠草原土壤AM真菌群落多样性、丰富度和组成的影响及其驱动机制。研究结果表明, 荒漠草原植物盖度、生物量、Shannon多样性指数对降水变化较为敏感。与CK相比, D50处理下AM真菌Shannon多样性指数、Sobs指数、ACE指数和Chao1指数分别显著降低31.64%、53.32%、62.41%和58.77%; AM真菌优势属相对丰度在不同降水梯度下无显著差异。非度量多维尺度(NMDS)分析表明, 降水梯度显著影响AM真菌群落组成。随机森林分析显示, 植物群落多样性和盖度是决定AM真菌多样性的首要因素; AM真菌丰富度主要受pH调控; AM真菌群落组成主要受降水与硝态氮影响。PLS-PM进一步表明, 降水可以通过改变土壤水分对AM真菌群落组成产生间接效应, 通过调节植物群落对AM真菌多样性产生间接正效应, 并通过改变土壤pH对AM真菌丰富度产生间接正效应。综上, 荒漠草原降水变化通过影响植物与土壤因子的耦合关系, 进而驱动AM真菌群落结构与组成发生变化。研究揭示了菌根共生系统对降水变化的敏感响应特征, 为理解荒漠草原生态系统在气候变化背景下的调控机制提供了新的科学依据。

关键词: 丛枝菌根真菌; 降水梯度; 植物群落; 土壤性质; 荒漠草原; 全球气候变化

郭蓉, 吴旭东, 张雨, 康瑞红, 王一凡, 王占军, 蒋齐, 俞鸿千, 马琨 (2026) 荒漠草原土壤丛枝菌根真菌群落对降水变化的响应. 生物多样性, 34, 26028. doi: 10.17520/biods.2026028; cstr: 32101.14.biods.2026028.
Guo R, Wu XD, Zhang Y, Kang RH, Wang YF, Wang ZJ, Jiang Q, Yu HQ, Ma K (2026) Response of soil arbuscular mycorrhizal fungal communities to precipitation changes in the desert steppe. Biodiversity Science, 34, 26028. doi: 10.17520/biods.2026028; cstr: 32101.14.biods.2026028.

Response of soil arbuscular mycorrhizal fungal communities to precipitation changes in the desert steppe

Rong Guo[1,2], Xudong Wu[3,4], Yu Zhang[2], Ruihong Kang[2], Yifan Wang[2], Zhanjun Wang[3,4], Qi Jiang[3,4], Hongqian Yu[3,4], Kun Ma[1,2,4*]

1 *School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*
2 *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*
3 *Institute of Forests and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China*
4 *Observation and Research Station for Temperate Grassland Ecosystems in Agro-Pastoral Transitional Zone of Ningxia, Yanchi, Ningxia 751500, China*

ABSTRACT

Aims: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi are key plant symbionts in terrestrial ecosystems. Investigating the responses of AM fungal communities to precipitation changes and their relationships with vegetation and soil factors is of great theoretical importance for understanding the stability of desert steppe ecosystems.
Methods: A precipitation manipulation experiment was conducted in Yanchi County, Ningxia, China, from 2019 to

收稿日期 Received: 2026-01-22; 接受日期 Accepted: 2026-03-30
基金项目: 宁夏干旱半干旱区林草资源保育与生态生产功能提升关键技术研究与示范项目(NGSB-2021-14) Supported by the Key Technologies for Conservation of Forest and Grassland Resources and Enhancement of Ecological Functions in Arid and Semi-arid Regions of Ningxia (NGSB-2021-14)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: makun0411@163.com

2021 using a completely randomized design. Five precipitation treatments were established: D50 (natural precipitation –50%), D25 (natural precipitation –25%), CK (natural precipitation), I25 (natural precipitation +25%), and I50 (natural precipitation +50%). Based on Illumina high-throughput sequencing combined with Mantel analysis, random forest analysis, and partial least squares path modeling (PLS-PM), we examined the effects of altered precipitation regimes on the diversity, richness, and community composition of soil AM fungi in the desert steppe ecosystems and identified their main driving factors.

Results: Plant cover, biomass, and Shannon diversity index of the desert steppe were sensitive to precipitation changes. Compared with CK, the D50 treatment significantly reduced the Shannon index, Sobs index, ACE index and Chao1 index of AM fungi by 31.64%, 53.32%, 62.41% and 58.77%, respectively. However, the relative abundances of dominant AM fungal genera did not differ significantly among precipitation treatments. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis indicated that precipitation gradients significantly affected AM fungal community composition. Random forest analyses revealed that plant diversity and cover were the primary determinants of AM fungal diversity, AM fungal richness was mainly regulated by soil pH, and AM fungal community composition was primarily influenced by precipitation and NO_3^--N. The PLS-PM results further showed that precipitation indirectly affected AM fungal community composition by altering soil moisture, indirectly increased AM fungal diversity through plant communities, and indirectly increased AM fungal richness through changes in soil pH.

Conclusion: Precipitation changes regulate the coupling relationships between vegetation and soil factors, thereby driving shifts in the diversity, richness and composition of AM fungal communities in desert steppe ecosystems. These findings reveal that mycorrhizal symbiosis is highly sensitive to precipitation variation, offering new insights into how climate change regulates desert steppe ecosystems.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; precipitation gradient; plant communities; soil properties; desert steppe; global climate change

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 未来数十年全球降水格局将发生显著变化(IPCC, 2023)。已有研究表明, 中国地区极端干旱与强湿润事件的发生频率均呈增加趋势, 暖季累计极端降水量的增长速率已由2000–2010年的2.88 mm/10年加快至2010–2023年的22.88 mm/10年(王晨亮等, 2012; Zou et al., 2025)。水分作为限制荒漠草原生产力与物质循环的关键因子, 使该生态系统对降水格局变化高度敏感(连佳丽等, 2024)。这种由降水变化引发的生态扰动不仅会影响植物群落和土壤环境, 还会进一步波及微生物动态及生态系统关键过程(Zhang et al., 2016; Xu et al., 2017; 赵莹等, 2025)。丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌作为大多数陆生植物的重要共生体, 在植物生长调控及生态系统功能维持中发挥关键作用(Bowles et al., 2018)。AM真菌不仅能够促进植物对氮、磷等矿质养分的吸收并增强植物抗逆性, 还可通过根外菌丝在土壤中的延伸与融合, 将不同植物根系连接形成丛枝菌根网络, 促进碳、水分及养分在植物-土壤系统中的再分配(Giovannetti et al., 2004; Wang et al., 2016; 图纳热等, 2023)。这种地下资源整合与物质循环调节机制有助于缓冲降水波动带来的环境扰动, 从而在一定程度上维持生态系统结构与功能稳定。大量研究已证实, 降水变化会影响不同生态系统中的AM真菌群落(Zhang et al., 2019; Fu et al., 2022)。例如, 降水增加可降低半干旱草原AM真菌的丰度和α多样性并改变群落组成(Gao et al., 2016; Chen et al., 2017)。在温带草原中, 降水增加同样会引起AM真菌群落结构变化(Li et al., 2015)。进一步研究发现, AM真菌群落结构对干旱的响应比群落多样性更敏感(Deveautour et al., 2018)。土壤微生物群落组成的变化往往与生态功能变化密切相关(Canarini et al., 2021), 因此深入理解AM真菌群落对降水变化的响应, 对于预测生态系统在气候变化背景下的适应与反馈机制至关重要(Bowles et al., 2018)。

已有研究表明, 降水可通过调控植物生长、土壤水分与养分供应等生物与非生物因子, 间接影响土壤AM真菌群落结构与功能(Bomfim et al., 2021; Fu et al., 2022)。例如, 在青藏高原高寒草甸生态系统中, 降水变异可通过改变植物盖度影响AM真菌丰富度(Zhang et al., 2016)。最新研究发现, 降水增加还可以通过改变植物功能群的生长及其根系性状, 调控植物获取水分和养分的途径, 进而影响AM真菌群落组成(何堂庆等, 2026)。与此同时, 受降水调控的土壤水分、pH及氮磷有效性等环境条件, 同样会影响土壤微生物群落结构(Cregger, et al.,

2014; 郭蓉等, 2023)。其中, 土壤pH被广泛认为是塑造微生物群落结构的重要环境因子(Jiang et al., 2018), 其作用并非单一的直接调控, 而是通过整合土壤水分、养分供应等多种环境条件产生综合影响(Lauber et al., 2009)。这表明, 在降水驱动的生态过程变化中, pH可能作为关键的环境整合指标参与AM真菌群落的响应调控。已有研究发现, 土壤pH及其对磷素有效性的调节可显著影响AM真菌的生长、孢子形成及分布格局(蔡晓布等, 2005; Wang et al., 2021), 而适度增加土壤磷素含量可以提高AM真菌的丰度(Stevens et al., 2020), 此外, 土壤氮素也是驱动AM真菌群落变化的关键环境要素。Chen等(2017)研究发现, 土壤有效氮含量升高会显著降低AM真菌的α多样性; Qin等(2022)进一步指出, 氮添加可显著降低土壤中AM真菌α多样性, 但对根内AM真菌的影响并不显著。然而, 在不同降水格局下, AM真菌群落如何响应植物群落与土壤环境的综合变化, 仍有待进一步厘清。

宁夏盐池地区处于半湿润与半干旱温带季风气候过渡带, 降水量与蒸发量年际差异显著, 是研究生态系统对降水变异响应的理想区域。基于此, 本研究在该地区荒漠草原生态系统中开展AM真菌群落动态研究, 拟回答以下科学问题: (1)不同降水梯度下, 土壤AM真菌群落多样性、丰富度及群落组成如何响应? (2)在驱动AM真菌群落变化的因素中, 植物群落特征与土壤理化性质的作用路径有何差异? 据此, 本研究旨在阐明不同降水梯度下荒漠草原土壤AM真菌群落的变化特征及其驱动机制, 明确植物群落与土壤理化因子对AM真菌群落构建的相对贡献, 为理解气候变化背景下荒漠草原生态系统微生物群落的响应机制提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究样地位于宁夏盐池县农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站(37°24′ N, 106°58′ E), 平均海拔1,500 m, 地处毛乌素沙地南缘, 属干旱-半干旱过渡带, 为典型中温带大陆性气候。降雨集中在6–9月, 占总降雨量的80%以上; 近60年平均降雨量约为298.3 mm, 年蒸发量超过2,700 mm (吴旭东等, 2021a, b; 郭蓉等, 2023)。试验区土壤类型为淡灰钙土, 优势植物包括达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)。试验基地自2001年开始围封, 以避免人类和牲畜干扰。供试土壤基础理化性质为: 有效氮(available nitrogen, AN) 17.89 mg/kg、全氮(total nitrogen, TN) 0.36 g/kg、pH 8.21、全磷(total phosphorus, TP) 0.36 g/kg、全钾(total potassium, TK) 34.56 g/kg、速效钾(available potassium, AK) 73.18 mg/kg、速效磷(available phosphorus, AP) 4.22 mg/kg、有机碳(soil organic carbon, SOC) 4.92 g/kg。

1.2 试验设计

降水处理装置布设于2018年3月上旬, 根据近60年降水量水平和极端降水量, 试验采用单因素完全随机设计, 2019–2021年连续3年降水控制累计年平均降水量分别为289 mm、299 mm和218 mm, 年均降水控制量为268.67 mm (郭蓉等, 2023)。设置自然降水(CK, 观测期降水量268.67 mm)、自然降水–25% (D25, 201.50 mm, 为一般干旱处理)、自然降水–50% (D50, 134.34 mm, 为极端干旱处理)、自然降水+25% (I25, 335.84 mm, 为一般湿润处理)和自然降水+50% (I50, 403.01 mm, 为湿润处理)共5个处理, 各处理4个重复, 共20个小区, 各小区面积36 m^2。采用凹形聚碳酸酯塑料板(透光率 > 90%)和不锈钢拱架制成减雨装置(距离地面1.5–2.5 m, 对地面温度影响可以忽略不计), 减雨装置包括钢架、集雨槽和集雨罐3部分, 通过控制塑料板间隔宽度截留部分自然降雨实现减雨, 并将收集到的雨水储存于集雨罐中, 然后通过喷洒系统将水均匀分配到增雨处理的试验小区中。为避免小区周围水分扩散对试验结果产生影响, 利用宽度为1 m、厚度为0.5 mm的聚乙烯膜, 在各小区周围设置深度为1 m的隔水层, 小区之间设立宽度为3 m的缓冲带。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集与测定

增减雨试验持续进行3年后, 于2021年8月底利用土钻在每个小区内沿对角线采集深度为0–20 cm (直径为5 cm)的3个原状土芯组成混合样本, 共采集土样20个。土壤样品低温保存带回实验室后采用四分法均匀混合, 去除根系后立即过2 mm土筛以便于进行后续分析, 部分土样保存在4℃下(不超过3天)用于土壤铵态氮(ammonium nitrogen, NH_4^+-N)和

硝态氮(nitrate nitrogen, NO_3^--N)测定, 部分土样保存在–80℃下用于AM真菌群落高通量测序, 其余土样放置于室内, 待自然风干后进行酶学性状和基础理化指标测定。采用磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP); 采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶(urease, URE), 采用高锰酸钾滴定法进行测定过氧化氢酶(catalase, CAT) (关松荫, 1986)。土壤pH、SOC、TN、TP、AN、AP、AK、NH_4^+-N和NO_3^--N的测定方法参照郭蓉等(2023)。土壤性状的详细结果参见郭蓉等(2023)。

1.3.2 植物样品采集与群落特征计算

在进行土壤采样时, 同期对试验区域进行单次植被调查。每个小区随机设置2个1 m^2样方, 植被调查指标包括植物盖度、植物高度、植物频度、植物多度和植物地上生物量, 植物Shannon多样性指数(Shannon diversity index)、Pielou均匀度指数(Pielou evenness index)、Margalef丰富度指数(Margalef richness index)、Simpson指数(Simpson index)和植物重要值参照郭蓉等(2023), 各指标计算公式如下:

Shannon多样性指数: $H = -\Sigma P_i \times lnP_i$ (i = 1,2,3……, S) (1)

Pielou均匀度指数: $J = H/lnS$ (2)

Margalef丰富度指数: $R = (S-1)/lnN$ (3)

Simpson指数: $D = 1-\Sigma P_i^2$ (4)

物种重要值: (相对密度 + 相对盖度 + 相对高度 + 相对频度)/4 (5)

式中, S为群落中的总物种数, N为群落中全部种的总个体数, N_i为第i个物种的个体数, P_i为N_i占N的比例。

1.3.3 微生物高通量测序方法

称取0.5 g土壤样本, 采用E.Z.N.A.® Soil DNA Kit (Omega Bio-tek, Norcross, GA, USA)试剂盒提取土壤总DNA, 具体操作按照试剂盒说明书进行。提取的土壤DNA利用NanoDrop2000 (ThermoScientific, Wilmington, DE, USA)进行质量和浓度检测。AM真菌采用特异引物进行基因扩增, 第一轮扩增所用引物为AML1F (5′-ATCAACTTTCGATGGTAGGATAGA-3′)与AML2R (5'-GAACCCAAACACTTTGTTTTCC-3′); 第二轮扩增引物为AMV4-5NF (5′-AAGCTCGTAGTTGAATTTCG-3′)与AMDGR (5′-CCCAACTATCCCTATTAATCAT-3′) (Wu et al., 2020)。PCR反应体系总体积为20 μL, 包括: 5 × FastPfu Buffer 4 μL、2.5 mM dNTPs 2 μL、各引物(5 μM) 0.8 μL、TransStart FastPfu DNA聚合酶0.4 μL、模板DNA 10 ng, 并以ddH_2O补足至20 μL。扩增反应在ABI GeneAmp® 9700 PCR仪上进行。第一轮扩增条件为: 95℃预变性3 min; 32个循环(95℃ 30 s, 55℃ 30 s, 72℃ 45 s); 最终延伸72℃ 10 min。第一轮产物经10倍稀释后作为第二轮扩增模板。第二轮条件为: 95℃预变性3 min; 30个循环(95℃ 30 s, 55℃ 30 s, 72℃ 45 s); 最终延伸72℃ 10 min。扩增产物经2%琼脂糖凝胶电泳检测后, 利用AxyPrep DNA Gel Recovery Kit (Axygen Biosciences, Union City, CA, USA)进行回收纯化。测序文库制备采用Illumina TruSeq Nano DNA LT Library Prep Kit (Illumina, Shanghai, China), 并由上海美吉生物医药科技有限公司(中国)在Illumina NovaSeq PE250平台完成测序。

本研究共获得20个样品的525,128条18S rRNA序列。对原始测序数据初步筛选后, 采用fastp软件(version 0.19.6, https://github.com/OpenGene/fastp)进行双端序列质量控制(Chen et al., 2018)。随后, 利用FLASH软件(version 1.2.11, http://www.cbcb.umd.edu/software/flash)进行拼接(Magoč & Salzberg, 2011), 具体步骤如下: (1)对300 bp原始序列, 在50 bp滑动窗口内, 当任一位置质量值低于20时进行截断; 截断后长度不足50 bp的序列及含有模糊碱基的序列予以剔除; (2)仅保留重叠长度超过10 bp的序列进行拼接, 丢弃无法拼接的序列; (3)根据条形码和引物区分样品并调整序列方向, 其中条形码需完全匹配, 引物允许2个碱基错配。在完成质控与拼接后, 利用UPARSE软件(version 7.1, http://drive5.com/uparse)对序列进行操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)聚类, 并去除嵌合体。为减小测序深度差异的影响, 对所有样品按最低测序深度(每样品8,690条序列)进行抽平, 最终获得173,800条有效序列, Good's覆盖度平均达到99.99%。OTU代表序列采用RDP Classifier (version 2.11, http://rdp.cme.msu.edu)在MaarjAM数据库(https://maarjam.botany.ut.ee)中进行分类学注释, 置信度阈值设为70%。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010软件对基础数据进行整理和计算。高通量测序数据分析由上海美吉生物医药科技有限公司云平台完成(https://cloud.majorbio.com)。所有AM真菌群落数据均基于抽平后的序列进行分析。采用Mothur软件(http://www.mothur.org/wiki/Calculators)计算AM真菌群落的α多样性指数(Schloss et al., 2009)。在不同降水梯度处理下, 利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和Dunn-Sidak事后检验($P < 0.05$)比较植物、土壤及微生物的α多样性, 以及属水平群落相对丰度的差异, 通过DPS v9.50进行显著性检验。AM真菌群落组成采用基于Bray-Curtis距离的非度量多维尺度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析, 并使用R 4.4.1中vegan包的adonis2函数进行检验, 稳健性通过999次置换评估。采用R中vegan包进行Mantel分析, 以探究AM真菌群落与环境因子间的相关关系; 采用randomForest和rfPermute包进行随机森林分析, 以识别环境因子对AM真菌群落的预测作用; 采用plspm包构建偏最小二乘路径模型(partial least squares path modeling, PLS-PM), 以评估植物与土壤属性对AM真菌群落变化的直接与间接效应(Xu et al., 2023)。所有数据分析前均进行*Z*-score标准化处理。PLS-PM的初始模型基于研究假设与相关文献构建, 并通过逐步修正以优化模型拟合度, 从而确保模型能够真实反映潜在的生态过程。根据拟合优度(goodness of fit, GoF)阈值0.1、0.25和0.36, 可将模型拟合程度分别划分为弱、中等和强(Ochoa-Hueso et al., 2018)。图表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果

2.1 植物群落与土壤因子变化特征

植被调查结果显示, 试验样地共有17种植物, 隶属7科(表1)。不同降水处理显著改变了植物群落优势度格局。减雨处理(D50、D25)及CK处理下, 植物群落中以达乌里胡枝子和猪毛蒿为共优势种。增雨处理(I25、I50)下, 群落优势种逐渐转变为猪毛蒿和蒙古冰草, 其中I25处理下二者为共优势种(猪毛蒿: 0.25; 蒙古冰草: 0.23), I50处理则以蒙古冰草

表1 连续3年降水处理对荒漠草原植物群落物种重要值的影响

Table 1 Effects of three consecutive years of precipitation manipulation on importance values in the desert steppe plant species

物种 Species	科 Family	降水梯度 Precipitation gradient				
		D50	D25	CK	I25	I50
		134.34 mm	201.50 mm	268.67 mm	335.84 mm	403.01 mm
阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*	菊科 Asteraceae	0.01 ± 0.03^{a}	0.04 ± 0.04^{a}	0.03 ± 0.03^{a}	0.01 ± 0.02^{a}	–
草木樨状黄芪 *Astragalus melilotoides*	豆科 Fabaceae	–	0.12 ± 0.09^{a}	0.06 ± 0.05^{b}	0.07 ± 0.05^{b}	0.08 ± 0.07^{b}
糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*	禾本科 Gramineae	0.02 ± 0.02^{a}	0.01 ± 0.02^{a}	0.02 ± 0.03^{a}	0.02 ± 0.03^{a}	0.02 ± 0.02^{a}
叉枝鸦葱 *Scorzonera divaricata*	菊科 Asteraceae	0.01 ± 0.01^{a}	0.01 ± 0.02^{a}	0.01 ± 0.02^{a}	0.03 ± 0.04^{a}	–
达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica*	豆科 Fabaceae	0.33 ± 0.11^{a}	0.25 ± 0.13^{ab}	0.26 ± 0.04^{ab}	0.14 ± 0.05^{b}	0.13 ± 0.04^{b}
老瓜头 *Vincetoxicum mongolicum*	夹竹桃科 Apocynaceae	–	0.02 ± 0.05^{a}	0.02 ± 0.03^{a}	–	0.03 ± 0.05^{a}
猫头刺 *Oxytropis aciphylla*	豆科 Fabaceae	0.02 ± 0.05^{a}	–	–	–	–
蒙古冰草 *Agropyron mongolicum*	禾本科 Gramineae	–	0.04 ± 0.08^{d}	0.14 ± 0.03^{c}	0.23 ± 0.05^{b}	0.33 ± 0.05^{a}
砂珍棘豆 *Oxytropis racemosa*	豆科 Fabaceae	–	0.01 ± 0.02^{b}	0.03 ± 0.02^{ab}	0.05 ± 0.03^{a}	0.06 ± 0.03^{a}
远志 *Polygala tenuifolia*	远志科 Polygalaceae	0.08 ± 0.06^{a}	0.09 ± 0.03^{a}	0.08 ± 0.04^{a}	0.08 ± 0.02^{a}	0.05 ± 0.01^{a}
针茅 *Stipa capillata*	禾本科 Gramineae	0.15 ± 0.04^{a}	0.15 ± 0.05^{a}	0.05 ± 0.02^{c}	0.12 ± 0.04^{ab}	0.09 ± 0.04^{bc}
猪毛蒿 *Artemisia scoparia*	菊科 Asteraceae	0.32 ± 0.17^{a}	0.24 ± 0.04^{a}	0.30 ± 0.05^{a}	0.25 ± 0.03^{a}	0.21 ± 0.05^{a}
赖草 *Leymus secalinus*	禾本科 Gramineae	–	0.02 ± 0.03^{a}	–	–	0.02 ± 0.04^{a}
乳浆大戟 *Euphorbia esula*	大戟科 Euphorbiaceae	0.01 ± 0.02	–	–	–	–
猪毛菜 *Salsola collina*	苋科 Amaranthaceae	0.01 ± 0.03	–	–	–	–
虫实 *Corispermum hyssopifolium*	苋科 Amaranthaceae	0.03 ± 0.04	–	–	–	–
沙打旺 *Astragalus laxmannii*	豆科 Fabaceae	–	–	0.02 ± 0.04	–	–

D50: 自然降水–50%; D25: 自然降水–25%; CK: 自然降水; I25: 自然降水+25%; I50: 自然降水+50%。不同小写字母表示同一植物种重要值在不同处理间的显著性差异($P < 0.05$)。

D50, Natural precipitation –50%; D25, Natural precipitation –25%; CK, Natural precipitation; I25, Natural precipitation +25%; I50, Natural precipitation +50%. Different lowercase letters indicate significant differences in the importance value of the same plant species among treatments ($P < 0.05$).

(0.33)优势最为明显。随着降水增加, 达乌里胡枝子重要值由0.33 (D50)显著降低至0.13 (I50); 蒙古冰草重要值则显著上升, 与D25处理相比, I50处理下增加了7.25倍(P = 0.0001), 而各降水梯度间猪毛蒿重要值并无显著差异(P > 0.05)。植物盖度(P = 0.001)、地上生物量(P = 0.01)和Shannon多样性指数(P = 0.02)均受降水梯度显著影响, 而植物Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数和Simpson指数则差异不显著(P > 0.05)。整体上, 植物盖度随降水量减少而显著下降(P = 0.0001), 其中D50和D25处理较CK分别下降了59.33%和38.26% (P < 0.05); 植物地上生物量的变化趋势与盖度基本一致, I50处理下分别为D50、D25、CK和I25处理的2.14、1.43、1.81和1.64倍; D50处理下植物Shannon多样性指数较I25处理显著降低24.43% (图1)。

2.2 土壤AM真菌群落变化特征

高通量测序结果表明, AM真菌ACE指数(F = 6.612, P = 0.003)、Sobs指数(F = 14.325, P = 0.0001)、Shannon多样性指数(F = 6.938, P = 0.002)和Chao1指数(F = 10.711, P = 0.0003)均受到降水梯度的显著影响(图2)。与D25、CK和I50处理相比, D50处理下AM真菌ACE指数和Chao1指数分别显著降低了1.51–2.11倍和1.36–2.11倍; D50处理下AM真菌Sobs指数和Shannon多样性指数相较其他降水梯度分别显著降低了114.31%–206.35%和41.14%–67.82%。AM真菌群落的Sobs、Chao1和ACE指数均用于表征群落丰富度, 且三者沿降水梯度呈现出相似的变化趋势。因此, 后续分析中选取Sobs指数作为群落丰富度的代表指标; 同时选取Shannon多样性指数作为群落多样性的代表指标。

基于Bray-Curtis距离的分析结果表明, 不同降水梯度下荒漠草原土壤AM真菌群落组成存在差异(图3)。NMDS排序的应力值为0.174, 处于可接受范围内, 说明二维排序能够在一定程度上反映样点间群落结构差异。不同降水梯度处理样本在排序空间中呈现一定分离趋势, 其中D50、D25及I50处理在空间上明显分离, CK与I25处理间存在一定重叠, 但二者与D50、D25及I50处理在空间上明显分离。

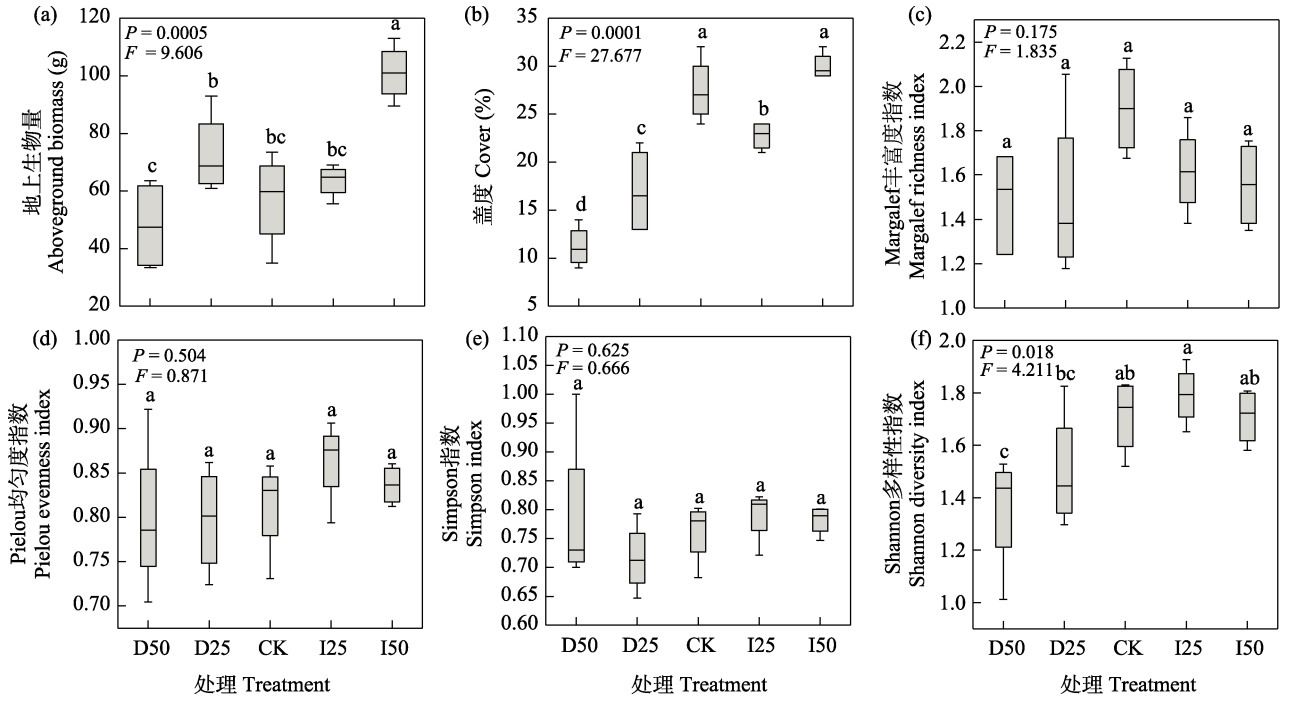


图1 不同降水处理对荒漠草原植物群落特征的影响。图中*P*为显著性水平, *F*为单因素方差分析的检验统计量, 不同小写字母表示处理间差异显著(*P* < 0.05)。D50: 自然降水–50%; D25: 自然降水–25%; CK: 自然降水; I25: 自然降水+25%; I50: 自然降水+50%。

Fig. 1 Effects of precipitation manipulation on plant community characteristics in the desert steppe. *P* represents the significance level, and *F* represents the test statistic of one-way ANOVA. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the figure (P < 0.05). D50, Natural precipitation –50%; D25, Natural precipitation –25%; CK, Natural precipitation; I25, Natural precipitation +25%; I50, Natural precipitation +50%.

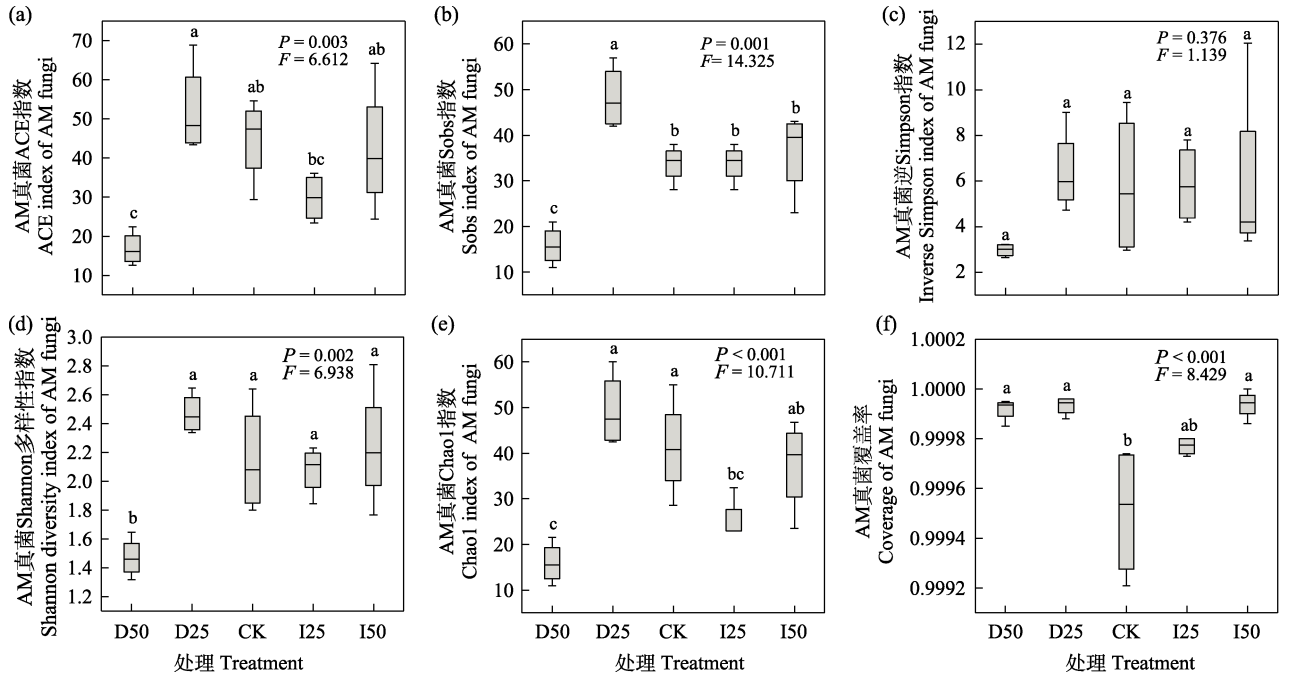


图2　不同降水处理下丛枝菌根(AM)真菌α多样性指数。图中*P*为显著性水平, *F*为单因素方差分析的检验统计量, 不同小写字母表示处理间差异显著(*P* < 0.05)。D50: 自然降水–50%; D25: 自然降水–25%; CK: 自然降水; I25: 自然降水+25%; I50: 自然降水+50%。

Fig. 2　α diversity indices of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi under different precipitation treatments. *P* represents the significance level, and *F* represents the test statistic of one-way ANOVA. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the figure (*P* < 0.05). D50, Natural precipitation –50%; D25, Natural precipitation –25%; CK, Natural precipitation; I25, Natural precipitation +25%; I50, Natural precipitation +50%.

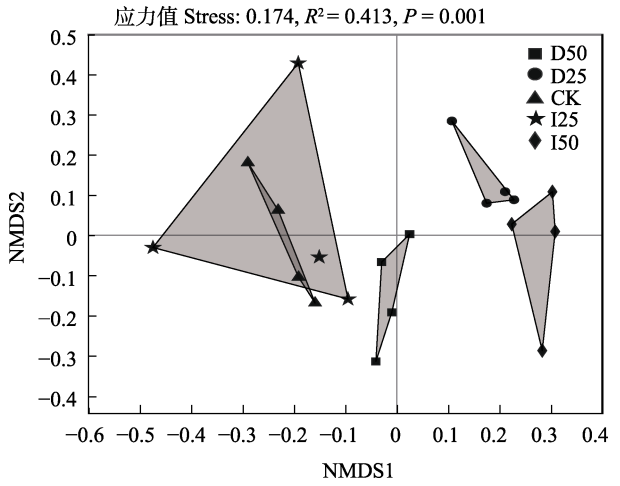


图3　不同降水处理下丛枝菌根(AM)真菌群落组成的非度量多维尺度(NMDS)分析。D50: 自然降水–50%; D25: 自然降水–25%; CK: 自然降水; I25: 自然降水+25%; I50: 自然降水+50%。

Fig. 3　Non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis of soil arbuscular mycorrhizal (AM) fungal community composition under different precipitation treatments. D50, Natural precipitation –50%; D25, Natural precipitation –25%; CK, Natural precipitation; I25, Natural precipitation +25%; I50, Natural precipitation +50%.

Adonis检验结果表明, 不同降水梯度处理间土壤AM真菌群落组成差异显著(R^2 = 0.413, P = 0.001)。

2.3　不同降水梯度对土壤AM真菌群落组成的影响

在荒漠草原土壤中共鉴定出1门、1纲、4目、5科和8属AM真菌。属水平类群包括球囊霉属(*Glomus*)、多孢囊霉属(*Diversispora*)、近球囊霉属(*Paraglomus*)、盾孢囊霉属(*Scutellospora*)、双型囊霉属(*Ambispora*)以及统称为“Others”的未分类AM真菌(其中包括未分类的多样孢囊霉目、未分类的多孢囊霉科和未分类的球囊菌纲) (图4)。其中, 球囊霉属为主要优势属, 在I50、I25、CK、D25和D50处理下的相对丰度分别为55.28%、59.80%、58.20%、61.67%和42.50%; 各处理下多孢囊霉属、近球囊霉属、盾孢囊霉属和双型囊霉属丰度之和分别为2.04%、4.06%、1.10%、1.00%和3.41% (图4a)。

2.4　环境因子与AM真菌群落间的相互关系

Mantel相关性分析结果显示, AM真菌群落多样性与部分环境因子之间存在显著相关关系(图5)。在α多样性方面, AM真菌Shannon多样性指数仅与植

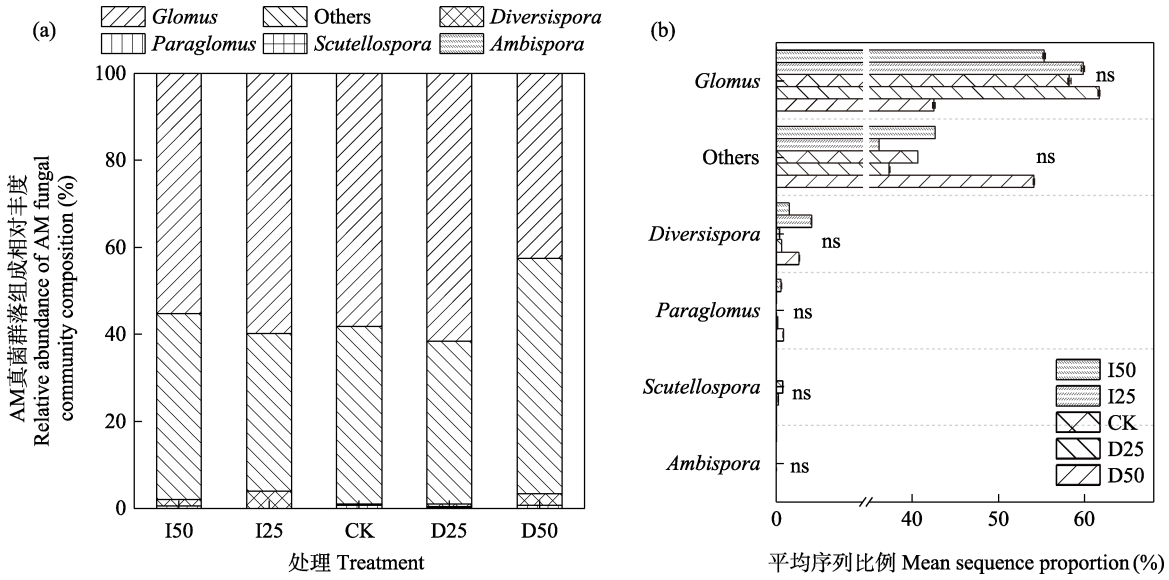


图4　不同降水处理下属水平丛枝菌根(AM)真菌的群落组成(a)及差异显著性检验(b)。*Glomus*: 球囊霉属; *Diversispora*: 多孢囊霉属; *Paraglomus*: 近球囊霉属; *Scutellospora*: 盾孢囊霉属; *Ambispora*: 双型囊霉属; 其他: Others。D50: 自然降水–50%; D25: 自然降水–25%; CK: 自然降水; I25: 自然降水+25%; I50: 自然降水+50%。ns表示各处理间无显著性差异。

Fig. 4　Genus-level community composition (a) and significance tests of differences (b) of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi under different precipitation treatments. D50, Natural precipitation –50%; D25, Natural precipitation –25%; CK, Natural precipitation; I25, Natural precipitation +25%; I50, Natural precipitation +50%. ns indicates no significant differences among treatments.

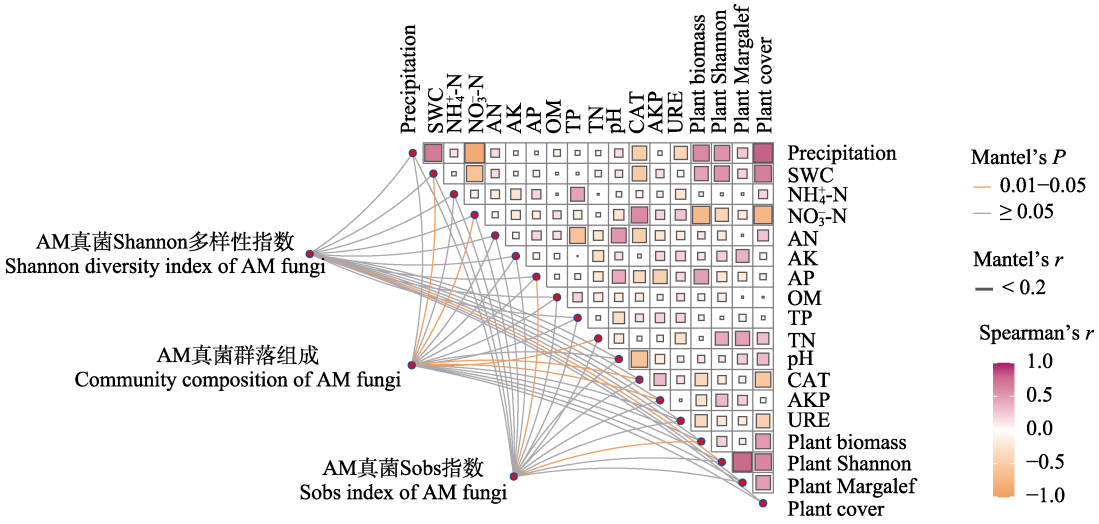


图5　丛枝菌根(AM)真菌群落多样性与环境因子的相关关系。Precipitation: 降水; SWC: 土壤水分含量; NH_4^+-N: 铵态氮; NO_3^--N: 硝态氮; AN: 土壤有效氮; AK: 土壤速效钾; AP: 土壤速效磷; OM: 土壤有机质; TP: 土壤全磷; TN: 土壤全氮; pH: 土壤pH; CAT: 过氧化氢酶; AKP: 碱性磷酸酶; URE: 脲酶; Plant biomass: 植物地上生物量; Plant Shannon: 植物Shannon多样性指数; Plant Margalef: 植物Margalef指数; Plant cover: 植物盖度。Mantel's *P*: Mantel检验的差异显著性; Mantel's *r*: Mantel检验的相关性系数; Spearman's *r*: Spearman相关性系数。

Fig. 5　Correlations between arbuscular mycorrhizal (AM) fungal community diversity and environmental factors. SWC, Soil water content; NH_4^+-N, Ammoniacal nitrogen; NO_3^--N, Nitrate nitrogen; AN, Available nitrogen; AK, Available potassium; AP, Available phosphorus; OM, Organic matter; TP, Total phosphorus; TN, Total nitrogen; pH, Soil pH; CAT, Catalase; AKP, Alkaline phosphatase; URE, Urease; Plant biomass, Plant aboveground biomass; Plant Shannon, Plant Shannon index; Plant Margalef, Plant Margalef index. Mantel's *P*, Mantel test statistical significance; Mantel's *r*, Mantel test correlation coefficient; Spearman's *r*, Spearman correlation coefficient.

物群落Shannon多样性指数呈显著正相关, 但相关性较弱(r = 0.175, P = 0.016), 与其余环境因子相关性均不显著。在群落组成方面, AM真菌群落组成与土壤含水量(r = 0.166, P = 0.021)、硝态氮(r = 0.158,

$P = 0.028$)、全氮($r = 0.168$, $P = 0.019$)、过氧化氢酶活性($r = 0.133$, $P = 0.049$)和碱性磷酸酶活性($r = 0.142$, $P = 0.047$)均呈显著正相关, 表明土壤水分、氮素与土壤酶活性与AM真菌群落结构存在一定的关联性。AM真菌的Sobs指数与速磷($r = 0.147$, $P = 0.041$)及植物地上生物量($r = 0.152$, $P = 0.044$)显著正相关, 而与其他因子相关性不显著。总体而言, 土壤水分、氮素养分、酶活性及植物特征是影响AM真菌群落的重要环境因子, 但各因子的解释力均较弱($r < 0.20$), 提示AM真菌群落可能受到多因子协同作用的影响, 或存在其他未测定的关键驱动因子。

分别以AM真菌Shannon多样性指数、Sobs指数与群落组作为响应变量, 计算各特征的置换重要性(均方误差增量, X.IncMSE)及其置换检验P值(图6)。随机森林分析结果显示, 植物Shannon多样性指数(X.IncMSE = 22.37, $P = 0.009$)和植物盖度(X.IncMSE = 11.07, $P = 0.020$)是预测AM真菌Shannon多样性指数的最重要因子, 其余因子的预测贡献较小(X.IncMSE < 10, $P > 0.05$)。对于AM真菌Sobs指数, pH (X.IncMSE: 8.08, $P = 0.059$)的预测程度最高, 接近但未达到显著性水平, 提示土壤酸碱度可能对AM真菌丰富度存在潜在影响。其余因子的预测贡献均较小(X.IncMSE < 8, $P > 0.05$)。对于AM真菌群落组成, 降水(X.IncMSE: 14.08, $P = 0.009$)与硝态氮(X.IncMSE: 13.07, $P = 0.020$)的预测程度最高, 其余因子的预测贡献较小(X.IncMSE < 10, $P > 0.05$)。

PLS-PM结果显示, 模型总体拟合良好(GoF = 0.73)。降水通过植物群落对AM真菌多样性产生显著间接效应(β: 1.01; $P < 0.001$),土壤pH也对AM真菌丰富度产生显著影响(β: 0.49; $P = 0.012$); 此外, 降水对AM真菌群落组成具有显著正向直接效应($\beta = 0.91$, $P = 0.009$), 土壤水分还可通过影响硝态氮含量对群落组成产生显著正效应($\beta = 0.64$, $P < 0.01$)(图7a)。模型总效应分析进一步表明, 植物群落对AM真菌多样性的总效应最大(总效应: 1.02, $P <$

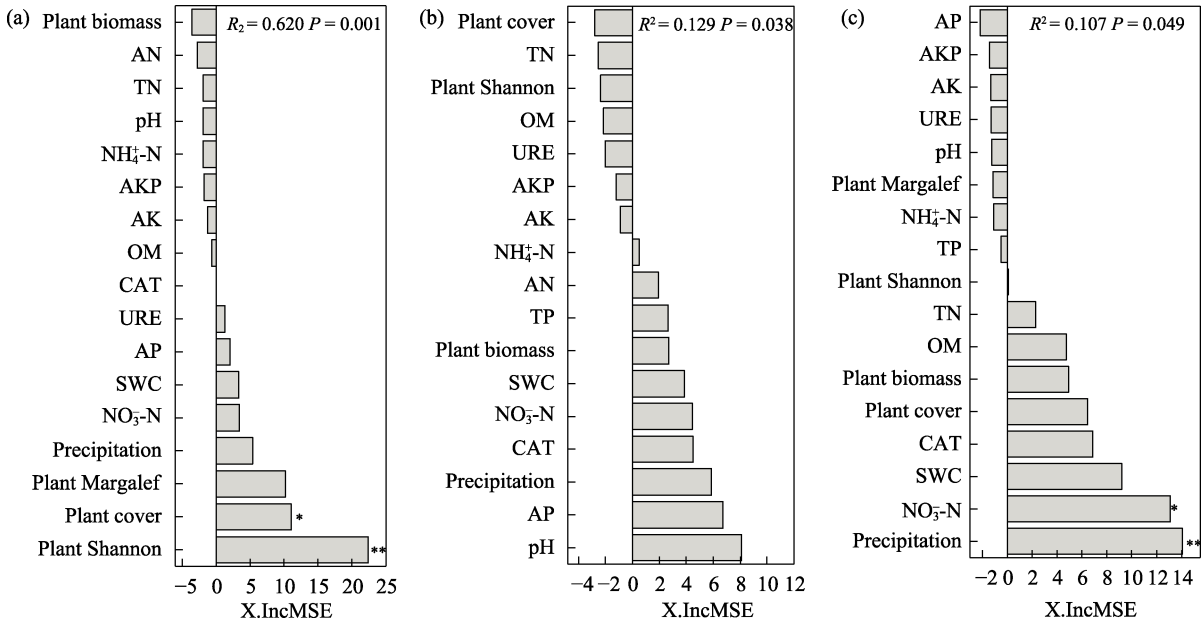


图6　驱动丛枝菌根(AM)真菌群落变化的随机森林分析。(a) Shannon多样性指数; (b) Sobs指数; (c)群落组成。Precipitation: 降水; **SWC**: 土壤水分含量; **NH_4^+-N**: 铵态氮; **NO_3^--N**: 硝态氮; **AN**: 土壤有效氮; **AK**: 土壤速效钾; **AP**: 土壤速效磷; **OM**: 土壤有机质; **TP**: 土壤全磷; **TN**: 土壤全氮; **pH**: 土壤pH; **CAT**: 过氧化氢酶; **AKP**: 碱性磷酸酶; **URE**: 脲酶; **Plant biomass**: 植物地上生物量; **Plant Shannon**: 植物Shannon多样性指数; **Plant Margalef**: 植物Margalef指数; **Plant cover**: 植物盖度。**X.IncMSE**: 均方误差增量。* ***P* < 0.05**; ** ***P* < 0.01**。

Fig. 6　Random forest analysis of the drivers of arbuscular mycorrhizal (AM) fungal community change. (a)Shannon diversity index; (b) Sobs index; (c) Community composition. SWC, Soil water content; NH_4^+-N, Ammoniacal nitrogen; NO_3^--N, Nitrate nitrogen; AN, Available nitrogen; AK, Available potassium; AP, Available phosphorus; OM, Organic matter; TP, Total phosphorus; TN, Total nitrogen; pH, Soil pH; CAT, Catalase; AKP, Alkaline phosphatase; URE, Urease; Plant biomass, Plant aboveground biomass; Plant Shannon, Plant Shannon diversity index; Plant Margalef, Plant Margalef index. X.IncMSE, Percentage increase in mean squared error. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

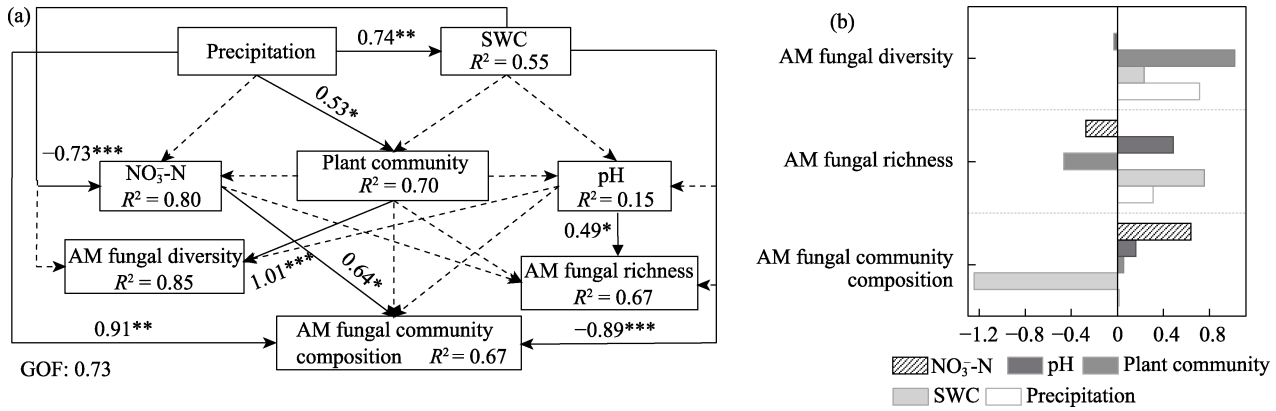


图7　荒漠草原土壤丛枝菌根(AM)真菌群落和土壤环境因子、植物群落的偏最小二乘模型。(a)路径关系; (b)总效应。Precipitation: 降水; SWC: 土壤水分; NO_3^--N: 土壤硝态氮; Plant community: 植物群落; AM fungal diversity: AM真菌多样性; AM fungal richness: AM真菌丰富度; AM fungal community composition: AM真菌群落组成。实线表示具有显著效应，虚线表示没有显著效应。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$。

Fig. 7　Partial least squares path model (PLS-PM) for the relationships among soil arbuscular mycorrhizal (AM) fungal community, soil environmental factors and the plant community in the desert steppe. (a) Path relationship; (b) Total effects. Precipitation; SWC, Soil water content; NO_3^--N, Nitrate nitrogen. Solid lines indicate significant effects, dashed lines indicate non-significant effects. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

0.05), 土壤水分对AM真菌丰富度的总效应最大(总效应: 0.49, $P < 0.05$), 土壤水分(总效应: –1.25, $P < 0.05$)和硝态氮(总效应: 0.64, $P < 0.05$)对AM真菌群落组成的总效应最大。相比之下，降水对群落组成的净效应较弱(总效应: 0.02, $P > 0.05$), 说明其直接正向作用被经由土壤水分产生的间接负向作用部分抵消(图7b)。总体而言，本研究区AM真菌多样性主要受植物群落驱动，丰富度主要由土壤水分与pH调控，而群落组成则以水分与硝态氮为核心驱动因子; 降水通过“降水-水分/植物-土壤化学”的级联效应间接塑造AM真菌群落格局，体现了多因子协同作用对AM真菌群落的复杂调控机制。

3　讨论

3.1　降水变化对荒漠草原植物群落与土壤性质的影响

既往研究表明，植物生长受水分供给调控，不同物种在资源利用策略上存在差异(Hutchings & Wijesinghe, 2008)。本研究发现，随着降水增加，群落优势种组合由达乌里胡枝子和猪毛蒿逐步转为猪毛蒿和蒙古冰草，最终由禾本科蒙古冰草成为优势种，这表明降水增加可能通过缓解水分限制，改变物种间的资源利用格局与竞争关系(张志南等, 2014; 胡海英等, 2019; 吴旭东等, 2021a)。这一变化可能与不同物种的水分获取策略和根系分布差异有关。相较于根系较深、主要利用深层土壤水分的达乌里胡枝子，蒙古冰草根系更多分布于浅层和中层土壤，对降水增加带来的表层土壤水分改善响应更为敏感，因此在较高降水条件下逐渐表现出更强的竞争优势(Hu et al., 2021; 邓强等, 2021)。研究指出，植物可沿降水梯度表现出对环境变化的显著可塑性，尤其体现在地上生物量等性状上(Hutchings & Wijesinghe, 2008)。与黄绪梅等(2022)的结果一致，我们发现降水增加显著提升了植物地上生物量与盖度，而干旱则降低了多样性与地上生物量。这些结果进一步佐证了水分在塑造荒漠草原植物群落中的关键作用，表明降水变化可能通过改变群落结构和功能群组成来影响生态系统的功能。

除植物群落外，土壤性质也对降水变化表现出敏感响应(郭蓉等, 2023)。如我们先前研究所述，极端干旱(D50)处理下土壤硝态氮含量相较于其他降水梯度显著升高了117.42%–346.00% (郭蓉等, 2023)，这可能是由于低土壤水分降低可利用氮的迁移性、同时提高无机氮累积的研究相一致(Evans & Burke, 2013; Cregger et al., 2014)。此外，干旱条件下可能抑制土壤氮素矿化速率降低与N_2O排放减少也可能导致硝态氮的相对富集(菊花等, 2016; Hu et al., 2020)。本研究先前发现，土壤pH随降水增加由8.34上升至8.42，这与部分研究报道的pH下降趋势不同(Li et al., 2021)。结合研究区背景，宁夏地区

蒸散量远高于降水量(约9 : 1)。相关研究指出, 在降水增加情景下, 入渗与剖面向下水通量增强, 可溶性盐分更易溶解并随渗漏水发生淋溶下移, 从而改变盐分在土壤剖面中的再分配; 而在高温强蒸散条件下, 表层蒸发增强并形成由下向上的水势梯度, 驱动毛细水上升, 溶解态盐分随水分向上迁移, 并在表层蒸发浓缩形成表层富集(Zhao et al., 2025), 因此, 研究区pH的变化可能与降水-蒸散控制下的水盐过程及其引起的盐基离子/碳酸盐体系的再分配有关(Abrol et al., 1988)。然而, 在中等程度干旱(D25)处理下土壤pH显著降低可能与该水分条件下植物群落的适应性调整及根际过程变化有关。本研究结果表明, D25处理下群落覆盖度明显下降, 但地上生物量及多数多样性指数未同步显著下降, 说明该处理下群落更可能表现为结构和资源分配的调整, 而非整体退化。已有研究表明, 水分胁迫可促使植物调整生物量分配, 增加对地下部分的投入或提高根系分配比例(Poorter et al., 2012)。同时, 根系离子吸收平衡的变化及根际分泌物输入可促进H^+释放和根际酸化, 从而导致土壤pH下降(Hinsinger et al., 2003; Jones et al., 2004; Preece & Peñuelas, 2016; Chen et al., 2022)。因此, 降水变化对pH的影响可能是水盐迁移(淋溶/富集)与植物–根际过程共同作用的结果, 然而, 这些复杂机制的相对贡献尚需进一步验证。

3.2 降水变化对土壤AM真菌群落的影响

国内外有关降水梯度变化对AM真菌群落组成和多样性的影响尚存在较大差异(Chen et al., 2017; Wang et al., 2021; Deveautour et al., 2018)。Deveautour等(2018)在温带草原中发现, 降水变化会影响AM真菌群落组成, 但对丰富度影响不显著; Wei等(2021)在高山草原中也发现, 降水变化对AM真菌α多样性无显著影响, 仅少数AM真菌类群的相对丰度发生变化。相比之下, 本研究在荒漠草原中发现, 极端干旱(D50)显著降低了AM真菌α多样性, 其中Shannon多样性指数、Sobs指数、ACE指数和Chao1指数分别下降31.64%、53.32%、62.41%和58.77% (图2)。这种响应差异可能归因于生态系统背景降水量的差异。温带草原(Deveautour et al., 2018)和高山草原(Wei et al., 2021)的背景降水量分别为806 mm和400 mm, AM真菌多样性未显著降低表明该区域降水控制变化幅度可能仍在AM真菌对水分波动的生态耐受范围内; 而本研究荒漠草原的背景降水量较低(268.67 mm), 极端干旱(D50)处理可能突破了部分AM真菌的生理耐受阈值, 从而导致群落多样性显著下降(Deveautour et al., 2018)。已有研究指出, 微生物群落对环境变化通常存在一定的耐受范围, 当驱动因子超过生态阈值时, 群落结构可能发生显著改变(Scheffer et al., 2001; Groffman et al., 2006)。

本研究还发现, 球囊霉属在各降水梯度下均为优势菌属(图4b)。考虑到优势AM真菌在维持生态系统稳定性中的重要作用(Taniguchi et al., 2022), 严重干旱可能削弱球囊霉属的定殖能力(Furze et al., 2017), 这在一定程度上能解释其相对丰度在极端干旱环境下的轻微下降。相比之下, 双型囊霉属和多孢囊霉科的菌根侵染及根系定殖能力相对较弱, 在极端干旱条件下可能更难存活(Sendek et al., 2019; 高志远等, 2021), 这可能是群落整体多样性下降的原因之一。需要指出的是, 本研究未对AM真菌稀有类群(通常定义为相对丰度 < 0.01%)进行专门分析, 但Sobs指数的显著下降提示稀有类群可能受到更强冲击。已有证据显示, 稀有类群虽然丰度低, 但贡献了大部分的物种多样性, 并在生态系统功能中发挥独特作用(Zhang et al., 2023)。因此, 本研究所观察到的α多样性降低而优势类群占比相对稳定的组合, 表明严重干旱可能对稀有、敏感类群的影响更强。上述结果进一步说明, AM真菌群落对干旱的韧性不仅取决于优势类群的耐受性, 也依赖群落内多类群的综合适应能力。未来研究应关注干旱对AM真菌稀有类群的影响及其生态学意义, 以及不同功能群AM真菌在生态系统功能维持中的作用。

3.3 降水变化对植物–土壤–AM真菌群落耦合关系的影响

本研究发现荒漠草原降水变化并非仅通过土壤水分单一路径作用于AM真菌, 而是通过植物特征–土壤理化条件的耦合作用, 共同塑造AM真菌群落结构与潜在功能。这一结果与其他草地生态系统中有关降水变化对微生物群落影响的研究结果相一致。例如, Fu等(2022)指出在极端干旱情境下, 土壤水分、植物丰富度与生产力共同影响AM真菌群落; Yang等(2021)则强调, 水分与pH是塑造土壤微

生物多样性的关键因子。结合Mantel分析(图5)、随机森林分析(图6)与PLS-PM结果(图7)的证据，本研究进一步厘清了干旱-半干旱生态系统中AM真菌群落响应降水梯度的主要调控路径。

植物群落多样性和盖度是决定AM真菌多样性的关键因子。植物群落对环境的适应策略能够调控土壤AM真菌对环境变化产生响应(Fu et al., 2022)。在极端干旱条件下，植物生物量与生产力下降可能降低宿主植物向AM真菌的同化碳分配，使部分竞争力较弱的AM真菌类群难以维持，从而导致多样性下降(Cappelli et al., 2022)。相反，在降水相对充足时，宿主对真菌的碳投入增加，碳-养分交换增强，互利共生关系得以强化(Fu et al., 2022)。其次，AM真菌丰富度主要受pH直接调控(β = 0.49, P = 0.012)。这一结果提示，在荒漠草原这类水分受限系统中，pH可能不仅是背景环境变量，还可能通过环境筛选直接重塑AM真菌丰富度格局。相关研究表明，单位pH变化最高可使微生物群落代谢活性降低50% (高志远等, 2021)，且不同AM真菌类群对pH的偏好存在差异，例如球囊霉属更倾向于弱碱性环境(Sun et al., 2016)。再次，AM真菌群落组成同时受到水分与硝态氮的影响，揭示降水变化可能通过改变氮素有效性与AM真菌营养需求匹配关系，驱动群落结构调整。AM真菌群落与土壤硝态氮之间的显著相关关系可能与AM真菌孢子细胞壁主要成分(几丁质和蛋白质)合成需求有关，AM真菌需要从土壤中吸收大量的氮素(如硝态氮、铵态氮)来合成相关物质(Guo et al., 2012)。在降水梯度下，水分对氮素迁移、矿化与可利用性的调控，可能进一步放大这一过程对群落组成的影响。

综上所述，降水通过改变水分条件，并联动调节植物结构与土壤化学属性，以多条路径共同驱动荒漠草原AM真菌群落变化；植物特征、土壤水分和氮素是驱动AM真菌群落变化的三类核心因子，其中植物因子更突出地关联多样性差异，而由水分牵动的pH与无机氮有效性则更直接关联丰富度与群落组成，三者通过复杂的耦合关系共同决定AM真菌群落在干旱梯度上的响应格局。

4 结论

连续3年降水处理显著影响了宁夏荒漠草原AM真菌群落的多样性、丰富度和群落组成。植物群落和土壤因子共同介导了AM真菌群落对极端气候的响应，其中AM真菌多样性主要受植物多样性与盖度主导，AM真菌丰富度主要受pH与土壤水分调控，AM真菌群落组成主要由土壤水分与硝态氮驱动。荒漠草原AM真菌对极端气候的响应并非单一水分限制作用的结果，而是植物变化与土壤环境共同作用的结果。因此，荒漠草原干旱区管理应以提升土壤保水能力和控制蒸散损失为重点，并通过提高宿主植物多样性与生产力促进AM真菌多样性与功能恢复。本研究仍存在实验周期较短、群落变化主要基于组成与多样性指标推断，尚缺乏对功能过程的直接验证。未来可开展更长期的降水监测，并结合原位接种实验及宏基因组学、代谢组学等手段，进一步解析AM真菌响应降水变化的机制与功能。

参考文献

Abrol IP, Yadav JSP, Massoud FI (1988) Salt-affected Soils and Their Management: FAO Soils Bulletin 39. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Bomfim F F, Lansac-Tôha FM, Bonecker CC, Lansac-Tôha FA (2021) Determinants of zooplankton functional dissimilarity during years of El Niño and La Niña in floodplain shallow lakes. Aquatic Sciences, 83, 41.

Bowles TM, Jackson LE, Cavagnaro TR (2018) Mycorrhizal fungi enhance plant nutrient acquisition and modulate nitrogen loss with variable water regimes. Global Change Biology, 24, e171–e182.

Cai XB, Qian C, Peng YL, Feng G, Gai JP (2005) Effects of environmental factors on AM fungi around steppe plant roots in Tibet Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 16, 859–864. (in Chinese with English abstract) [蔡晓布, 钱成, 彭岳林, 冯固, 盖京平 (2005) 环境因子对西藏高原草地植物丛枝菌根真菌的影响. 应用生态学报, 16, 859–864.]

Canarini A, Schmidt H, Fuchslueger L, Martin V, Herbold CW, Zezula D, Gündler P, Hasibeder R, Jecmenica M, Bahn M, Richter A (2021) Ecological memory of recurrent drought modifies soil processes via changes in soil microbial community. Nature Communications, 12, 5308.

Cappelli SL, Domeignoz-Horta LA, Loaiza V, Laine AL (2022) Plant biodiversity promotes sustainable agriculture directly and via belowground effects. Trends in Plant Science, 27, 674–687.

Chen SF, Zhou YQ, Chen YR, Gu J (2018) Fastp: An ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor. Bioinformatics, 34, i884–i890.

Chen YL, Xu ZW, Xu TL, Veresoglou SD, Yang GW, Chen BD (2017) Nitrogen deposition and precipitation induced phylogenetic clustering of arbuscular mycorrhizal fungal communities. Soil Biology and Biochemistry, 115, 233–242.

Chen YL, Yao ZM, Sun Y, Wang EZ, Tian CJ, Sun Y, Liu J, Sun CY, Tian L (2022) Current studies of the effects of drought stress on root exudates and rhizosphere microbiomes of crop plant species. International Journal of Molecular Sciences, 23, 2374.

Cregger MA, McDowell NG, Pangle RE, Pockman WT, Classen AT (2014) The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. Functional Ecology, 28, 1534–1544.

Deng Q, Liu D, Shi XR, Yuan ZY (2021) Effects of manipulative precipitation on plant species diversity in the understory of planted *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau, China. Research of Soil and Water Conservation, 28(1), 1–10. (in Chinese with English abstract) [邓强, 刘迪, 时新荣, 袁志友 (2021) 黄土高原刺槐人工林林下植物多样性对模拟降水变化的响应. 水土保持研究, 28(1), 1–10.]

Deveautour C, Donn S, Power SA, Bennett AE, Powell JR (2018) Experimentally altered rainfall regimes and host root traits affect grassland arbuscular mycorrhizal fungal communities. Molecular Ecology, 27, 2152–2163.

Evans SE, Burke IC (2013) Carbon and nitrogen decoupling under an 11-year drought in the shortgrass steppe. Ecosystems, 16, 20–33.

Fu W, Chen BD, Rillig MC, Jansa J, Ma W, Xu C, Luo WT, Wu HH, Hao ZP, Wu H, Zhao AH, Yu Q, Han XG (2022) Community response of arbuscular mycorrhizal fungi to extreme drought in a cold-temperate grassland. New Phytologist, 234, 2003–2017.

Furze JR, Martin AR, Nasielski J, Thevathasan NV, Gordon AM, Isaac ME (2017) Resistance and resilience of root fungal communities to water limitation in a temperate agroecosystem. Ecology and Evolution, 7, 3443–3454.

Gao C, Kim YC, Zheng Y, Yang W, Chen L, Ji NN, Wan SQ, Guo LD (2016) Increased precipitation, rather than warming, exerts a strong influence on arbuscular mycorrhizal fungal community in a semiarid steppe ecosystem. Botany, 94, 459–469.

Gao ZY, Yuan M, Yao HY, Ge CR (2021) Research progress on effects of extreme drought on soil microbial communities and their functions. Jiangsu Agricultural Sciences, 49(13), 35–45. (in Chinese with English abstract) [高志远, 袁鸣, 姚槐应, 葛超荣 (2021) 极端干旱对土壤微生物群落和功能的影响研究进展. 江苏农业科学, 49(13), 35–45.]

Giovannetti M, Sbrana C, Avio L, Strani P (2004) Patterns of below-ground plant interconnections established by means of arbuscular mycorrhizal networks. New Phytologist, 164, 175–181.

Groffman PM, Baron JS, Blett T, Gold AJ, Goodman I, Gunderson LH, Levinson BM, Palmer MA, Paerl HW, Peterson GD, Poff NL, Rejeski DW, Reynolds JF, Turner MG, Weathers KC, Wiens J (2006) Ecological thresholds: The key to successful environmental management or an important concept with no practical application? Ecosystems, 9, 1–13.

Guan SY (1986) Soil Enzyme and Its Research Methods. Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [关松荫 (1986) 土壤酶及其研究法. 农业出版社, 北京.]

Guo HJ, He XL, Li YP (2012) Spatial distribution of arbuscular mycorrhiza and glomalin in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* Kom. in the Otindag sandy land, China. African Journal of Microbiology Research, 6, 5745–5753.

Guo R, Wu XD, Wang ZJ, Jiang Q, Yu HQ, He J, Liu WJ, Ma K (2023) Responses of soil bacterial and fungal communities to altered precipitation in a desert steppe. Chinese Journal of Applied Ecology, 34, 1500–1508. (in Chinese with English abstract) [郭蓉, 吴旭东, 王占军, 蒋齐, 俞鸿千, 贺婧, 刘文娟, 马琨 (2023) 荒漠草原土壤细菌和真菌群落对降水变化的响应. 应用生态学报, 34, 1500–1508.]

He TQ, Wang BB, Cao XX, Zhang KC, Wang XD, Wang H, Bai TS, Zhao YX, Zhang Y, Wang Y, Qiu YP, Hu SJ (2026) Responses of plants and arbuscular mycorrhizal fungal communities to long-term precipitation increase in a semi-arid grassland. Chinese Journal of Plant Ecology, 50, 674–684. (in Chinese with English abstract) [何堂庆, 王变变, 曹鑫鑫, 张康成, 汪晓东, 王浩, 白彤硕, 赵叶新, 张艺, 王益, 仇云鹏, 胡水金 (2026) 半干旱草地植物和丛枝菌根真菌群落对长期降水增加的响应. 植物生态学报, 50, 674–684.]

Hinsinger P, Plassard C, Tang CX, Jaillard B (2003) Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. Plant and Soil, 248, 43–59.

Hu HY, Li HX, Ni B, Shi B, Xu DM, Xie YZ (2019) Characteristic of typical vegetation community and water use efficiency of dominant plants in desert steppe of Ningxia. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 45, 460–471. (in Chinese with English abstract) [胡海英, 李惠霞, 倪彪, 师斌, 许冬梅, 谢应忠 (2019) 宁夏荒漠草原典型群落的植被特征及其优势植物的水分利用效率. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 45, 460–471.]

Hu HY, Zhu L, Li HX, Xu DM, Xie YZ (2021) Seasonal changes in the water-use strategies of three herbaceous species in a native desert steppe of Ningxia, China. Journal of Arid Land, 13, 109–122.

Hu R, Wang XP, Xu JS, Zhang YF, Pan YX, Su X (2020) The mechanism of soil nitrogen transformation under different biocrusts to warming and reduced precipitation: From microbial functional genes to enzyme activity. Science of the Total Environment, 722, 137849.

Huang XM, Zhang Y, Li JP (2022) Responses of vegetation characteristics of Mu Us desert steppe to changes in precipitation. Acta Agrestia Sinica, 30, 178–187. (in Chinese with English abstract) [黄绪梅, 张翼, 李建平 (2022) 毛乌素荒漠草原植被特征对降水变化的响应. 草地学报, 30, 178–187.]

Hutchings MJ, Wijesinghe DK (2008) Performance of a clonal species in patchy environments: Effects of environmental context on yield at local and whole-plant scales. Evolutionary Ecology, 22, 313–324.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2023) The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Jiang YL, Lei YB, Yang Y, Korpelainen H, Niinemets Ü, Li CY (2018) Divergent assemblage patterns and driving forces for bacterial and fungal communities along a glacier forefield chronosequence. Soil Biology and Biochemistry, 118, 207–216.

Jones DL, Hodge A, Kuzyakov Y (2004) Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. New Phytologist, 163, 459–480.

Ju H, Shen GZ, Xu WT, Zhao CM, Su L, Wang Y, Xie ZQ, Zhang QL (2016) The emission of CH_4, CO_2, and N_2O in the typical forest soils of Shennongjia under the precipitation reduction. Acta Ecologica Sinica, 36, 6397–6408. (in Chinese with English abstract) [菊花, 申国珍, 徐文婷, 赵常明, 苏磊, 王杨, 谢宗强, 张秋良 (2016) 神农架主要森林土壤CH_4、CO_2和N_2O排放对降水减少的响应. 生态学报, 36, 6397–6408.]

Lauber CL, Hamady M, Knight R, Fierer N (2009) Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. Applied and Environmental Microbiology, 75, 5111–5120.

Li XL, Qi ZQ, Yu XL, Xu M, Liu ZH, Du GF, Yang Y (2021) Soil pH drives the phylogenetic clustering of the arbuscular mycorrhizal fungal community across subtropical and tropical pepper fields of China. Applied Soil Ecology, 165, 103978.

Li XL, Zhu TY, Peng F, Chen Q, Lin S, Christie P, Zhang JL (2015) Inner Mongolian steppe arbuscular mycorrhizal fungal communities respond more strongly to water availability than to nitrogen fertilization. Environmental Microbiology, 17, 3051–3068.

Lian JL, Chen J, Yang XQ, Zhao Y, Luo X, Han C, Zhao YX, Li JP (2024) Responses of desert steppe plant diversity and microbial diversity to precipitation change. Biodiversity Science, 32, 24044. (in Chinese with English abstract) [连佳丽, 陈婧, 杨雪琴, 赵莹, 罗叙, 韩翠, 赵雅欣, 李建平 (2024) 荒漠草原植物多样性和微生物多样性对降水变化的响应. 生物多样性, 32, 24044.]

Magoč T, Salzberg SL (2011) FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. Bioinformatics, 27, 2957–2963.

Ochoa-Hueso R, Collins SL, Delgado-Baquerizo M, Hamonts K, Pockman WT, Sinsabaugh RL, Smith MD, Knapp AK, Power SA (2018) Drought consistently alters the composition of soil fungal and bacterial communities in grasslands from two continents. Global Change Biology, 24, 2818–2827.

Poorter H, Niklas KJ, Reich PB, Oleksyn J, Poot P, Mommer L (2012) Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. New Phytologist, 193, 30–50.

Preece C, Peñuelas J (2016) Rhizodeposition under drought and consequences for soil communities and ecosystem resilience. Plant and Soil, 409, 1–17.

Qin SQ, Yang GJ, Zhang Y, Song MX, Sun L, Cui YZ, Dong JB, Wang N, Liu X, Zheng PM, Wang RQ (2022) Mowing did not alleviate the negative effect of nitrogen addition on the arbuscular mycorrhizal fungal community in a temperate meadow grassland. Frontiers in Plant Science, 13, 917645.

Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. Nature, 413, 591–596.

Schloss PD, Westcott SL, Ryabin T, Hall JR, Hartmann M, Hollister EB, Lesniewski RA, Oakley BB, Parks DH, Robinson CJ, Sahl JW, Stres B, Thallinger GG, Van Horn DJ, Weber CF (2009) Introducing mothur: Open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. Applied and Environmental Microbiology, 75, 7537–7541.

Sendek A, Karakoç C, Wagg C, Domínguez-Begines J, do Couto GM, van der Heijden MGA, Ahmad Naz A, Lochner A, Chatzinotas A, Klotz S, Gómez-Aparicio L, Eisenhauer N (2019) Drought modulates interactions between arbuscular mycorrhizal fungal diversity and barley genotype diversity. Scientific Reports, 9, 9650.

Stevens BM, Propster JR, Öpik M, Wilson GWT, Alloway SL, Mayemba E, Johnson NC (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi in roots and soil respond differently to biotic and abiotic factors in the Serengeti. Mycorrhiza, 30, 79–95.

Sun YQ, Zhang X, Wu ZX, Hu YJ, Wu SL, Chen BD (2016) The molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the arsenic mining impacted sites in Hunan Province of China. Journal of Environmental Sciences, 39, 110–118.

Taniguchi T, Akaji Y, Yamato M, Kusakabe R, Goomaral A, Undarmaa J, Yamanaka N (2022) Dominance of arbuscular mycorrhizal fungi is key for Mongolian steppe management under livestock grazing, as indicated by ecosystem multifunctionality. Ecological Indicators, 136, 108686.

Tu NR, Hong M, Ye H, Zhang YZ, He SL, Zhang YL, Zhao Y, Hu JY (2023) Effects of precipitation change and nitrogen deposition on soil arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) community structure in desert steppe. Soils, 55, 1251–1260. (in Chinese with English abstract) [图纳热, 红梅, 叶贺, 张耀宗, 贺世龙, 张雅玲, 赵宇, 呼吉亚 (2023) 降水变

化和氮沉降对荒漠草原土壤丛枝菌根真菌群落结构的影响. 土壤, 55, 1251–1260.]

Wang CL, Yue TX, Fan ZM, Zhao N, Sun XF (2012) High-precision surface modeling downscaling model for China climate. Journal of Geo-Information Science, 14, 599–610. (in Chinese with English abstract) [王晨亮, 岳天祥, 范泽孟, 赵娜, 孙晓芳 (2012) 高精度曲面建模的中国气候降尺度模型. 地球信息科学学报, 14, 599–610.]

Wang GH, Sheng LC, Zhao D, Sheng JD, Wang XR, Liao H (2016) Allocation of nitrogen and carbon is regulated by nodulation and mycorrhizal networks in soybean/maize intercropping system. Frontiers in Plant Science, 7, 1901.

Wang JL, Zhang JW, Wang CJ, Ren GL, Yang YR, Wang DL (2021) Precipitation exerts a strong influence on arbuscular mycorrhizal fungi community and network complexity in a semiarid steppe ecosystem. European Journal of Soil Biology, 102, 103268.

Wei XT, Shi YN, Qin FW, Zhou HK, Shao XQ (2021) Effects of experimental warming, precipitation increase and their interaction on AM fungal community in an Alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau. European Journal of Soil Biology, 102, 103272.

Wu SL, You F, Wu ZX, Bond P, Hall M, Huang LB (2020) Correction to: Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities across the gradient of alkaline Fe ore tailings, revegetated waste rock to natural soil sites. Environmental Science and Pollution Research, 27, 11980.

Wu XD, Ji B, He JL, Ren XB, Yu HQ, Wang ZJ (2021a) The effects of precipitation gradient control on the leaf functional traits and soil nutrients of the dominant plants in a desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 41, 2719–2727. (in Chinese with English abstract) [吴旭东, 季波, 何建龙, 任小玢, 俞鸿千, 王占军 (2021a) 控制降水梯度对荒漠草原优势植物叶功能性状及土壤养分的影响. 生态学报, 41, 2719–2727.]

Wu XD, Jiang Q, Ren XB, Yu HQ, Wang ZJ, He JL, Ji B, Du JM (2021b) Effects of precipitation on carbon, nitrogen and microbial characteristics of biological soil crusts in a desert steppe of Northern China. Acta Prataculturae Sinica, 30(7), 34–43. (in Chinese with English abstract) [吴旭东, 蒋齐, 任小玢, 俞鸿千, 王占军, 何建龙, 季波, 杜建民 (2021b) 降水水平对荒漠草原生物土壤结皮碳、氮和微生物的影响. 草业学报, 30(7), 34–43.]

Xu XH, Chen C, Zhang Z, Sun ZH, Chen YH, Jiang JD, Shen ZG (2017) The influence of environmental factors on communities of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Chenopodium ambrosioides* revealed by MiSeq sequencing investigation. Scientific Reports, 7, 45134.

Xu YC, Chen YZ, Dang P, Jiang XJ, Zheng W, Lei JJ, Yan WD (2023) Decay of fallen wood and elevation affects soil fungal community assembly and indirectly controls community diversity. Applied Soil Ecology, 182, 104683.

Yang XC, Zhu K, Loik ME, Sun W (2021) Differential responses of soil bacteria and fungi to altered precipitation in a meadow steppe. Geoderma, 384, 114812.

Zhang J, Wang F, Che RX, Wang P, Liu HK, Ji BM, Cui XY (2016) Precipitation shapes communities of arbuscular mycorrhizal fungi in Tibetan Alpine steppe. Scientific Reports, 6, 23488.

Zhang J, Wang P, Xue K, Hao YB, Wang YF, Cui XY (2019) Trait complementarity between fine roots of *Stipa purpurea* and their associated arbuscular mycorrhizal fungi along a precipitation gradient in Tibetan alpine steppe. Journal of Mountain Science, 16, 542–547.

Zhang XY, Zhao WQ, Kou YP, Fang K, Liu YJ, He HL, Liu Q (2023) The contrasting responses of abundant and rare microbial community structures and co-occurrence networks to secondary forest succession in the subalpine region. Frontiers in Microbiology, 14, 1177239.

Zhang ZN, Wu GL, Wang D, Deng L, Hao HM, Yang Z, Shangguan ZP (2014) Plant community structure and soil moisture in the semi-arid natural grassland of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 23(6), 313–319. (in Chinese with English abstract) [张志南, 武高林, 王冬, 邓蕾, 郝红敏, 杨政, 上官周平 (2014) 黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系. 草业学报, 23(6), 313–319.]

Zhao JH, Wu HQ, Gu HB, Fan YM, Zhao ZW, Wang PF, Li CL (2025) Climate surpasses soil texture in driving soil salinization alleviation in arid Xinjiang. Remote Sensing, 17, 3812.

Zhao Y, Li JP, Wang YT, Zhang Y, Zhao YX, Luo X (2025) Effects of short-term precipitation changes on soil microbial communities in desert grasslands. Acta Ecologica Sinica, 45, 64–79. (in Chinese with English abstract) [赵莹, 李建平, 王誉陶, 张翼, 赵雅欣, 罗叙 (2025) 短期降水变化对荒漠草原土壤微生物群落的影响. 生态学报, 45, 64–79.]

Zou AL, Yang Y, Wang HL, Wang PY, Liao H (2025) Aerosol decline accelerates the increasing extreme precipitation in China. Geophysical Research Letters, 52, e2024GL113887.

(责任编委: 高程　责任编辑: 李会丽)

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25468, pages 1–11
doi: 10.17520/biods.2025468
cstr: 32101.14.biods.2025468

•研究报告•

刈割后互花米草残体保留与覆膜对滨海湿地土壤细菌群落结构的影响

黄薇[1,2], 刘一凡[2], 方涛[2], 赵微[2], 王荣[3], 吴婷[2], 靳瑜[2], 罗芳丽[2,4*], 郭允倩[1*], 朱耀军[5,6*]

1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 3. 北京力科惠泽科技有限公司, 北京 100085; 4. 黄河流域生态系统保护修复国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 5. 广东湛江红树林湿地生态系统国家定位观测研究站, 广东湛江 524448; 6. 中国林业科学院研究生态保护与修复研究所, 北京 100091

摘要: 刈割与覆膜是控制滨海湿地入侵植物互花米草(*Spartina alterniflora*)的关键物理措施, 然而, 其长期治理对土壤理化性质及微生物群落的影响尚不明确。本研究以广东湛江滩涂互花米草入侵地土壤为研究对象, 通过设置刈割后互花米草在覆膜条件下残体清除与保留以及未覆膜条件下残体清除和保留4种处理组合, 测定其土壤理化指标并通过扩增子测序对土壤细菌群落特征进行研究, 分析土壤细菌群落组成与环境因子的相关性。研究发现, 保留互花米草残体显著提高土壤总氮、总碳、有机碳及速效钾的含量。长期覆膜显著降低土壤细菌α多样性、主要细菌的相对丰度并改变群落结构。去除残体覆膜处理下细菌的Pielou均匀度指数和Simpson多样性指数显著低于其余处理; 去除残体覆膜处理下弯曲菌门与硫卵菌属(*Sulfurovum*)相对丰度显著增加; 温度、总氮、总碳、有机碳、速效钾等共同影响弧菌属(*Vibrio*)、盐微菌属(*Salinimicrobium*)等优势细菌丰度, 共同解释74.6%的群落结构变异。综上, 刈割后覆膜是互花米草有效的物理治理措施, 但长期覆膜与残体去除会显著降低土壤细菌群落多样性并改变群落结构, 因此, 在刈割处理后, 应设置合理的覆膜时间并保留刈割后的植物残体, 以避免对土壤细菌群落多样性和结构产生较大负面影响。

关键词: 覆膜; 刈割; 滨海湿地; 互花米草; 土壤理化性质; 细菌群落

黄薇, 刘一凡, 方涛, 赵微, 王荣, 吴婷, 靳瑜, 罗芳丽, 郭允倩, 朱耀军 (2026) 刈割后互花米草残体保留与覆膜对滨海湿地土壤细菌群落结构的影响. 生物多样性, 34, 25468. doi: 10.17520/biods.2025468; cstr: 32101.14.biods.2025468.

Huang W, Liu YF, Fang T, Zhao W, Wang R, Wu T, Jin Y, Luo FL, Guo YQ, Zhu YJ (2026) Effects of mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching on soil bacterial community structure in coastal wetlands. Biodiversity Science, 34, 25468. doi: 10.17520/biods.2025468; cstr: 32101.14.biods.2025468.

Effects of mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching on soil bacterial community structure in coastal wetlands

Wei Huang[1,2], Yifan Liu[2], Tao Fang[2], Wei Zhao[2], Rong Wang[3], Ting Wu[2], Yu Jin[2], Fangli Luo[2,4*], Yunqian Guo[1*], Yaojun Zhu[5,6*]

1 *School of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
2 *School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
3 *Beijing Eco-mind Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China*
4 *Key Laboratory of Ecosystem Protection and Restoration of the Yellow River Basin, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China*
5 *National Positioning Observation and Research Station of Mangrove Wetland Ecosystem in Zhanjiang, Zhanjiang, Guangdong 524448, China*
6 *Institute of Ecological Conservation and Restoration, Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*

ABSTRACT

Aims: Mowing and mulching are key physical measures for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* in coastal wetlands. However, their long-term effects on soil physicochemical properties and microbial communities remain unclear.

收稿日期 Received: 2025-11-23; 接受日期 Accepted: 2026-03-04
基金项目: 国家自然科学基金(32371584; 32071525)和广东省林业局科技项目(2023KYXM09) Supported by the National Natural Science Foundation of China (32371584; 32071525), and the Science and Technology Project of Guangdong Forestry Administration (2023KYXM09)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: ecoluofangli@bjfu.edu.cn; guoyunqian@bjfu.edu.cn; zhuyaojun@caf.ac.cn

Methods: This study investigated soil from the *S. alterniflora*-invaded tidal flats in Zhanjiang, Guangdong Province. Four treatment combinations were established: removal versus retention of cut *S. alterniflora* residues under mulching conditions, and removal versus retention under non-mulching conditions. Soil physicochemical parameters were measured, and soil bacterial community characteristics were analyzed via amplicon sequencing to examine correlations between bacterial community composition and environmental factors.
Results: (1) Retaining *S. alterniflora* residues significantly increased soil total nitrogen, total carbon, organic carbon, and available potassium content. (2) Long-term mulching markedly reduced soil bacterial α diversity and the relative abundance of dominant bacterial taxa, and altered the community structure. Under the residue-removal mulching treatment, bacterial Pielou's evenness and Simpson's diversity indices were significantly lower than those in other treatments. The relative abundances of the Campylobacterota phylum and *Sulfurovum* genus significantly increased under residue-removal mulching. (3) Temperature, total nitrogen, total carbon, organic carbon, and available potassium jointly influenced the abundance of dominant bacteria such as *Vibrio* and *Salinimicrobium*, collectively explaining 74.6% of the variation in community structure.
Conclusion: Mulching after mowing is an effective physical control measure for *S. alterniflora*. However, long-term mulching combined with residue removal significantly reduces soil bacterial community diversity and alters community structure. Therefore, after mowing, a reasonable mulching duration should be established and mowed plant residues retained to avoid substantial negative impacts on soil bacterial community diversity and structure.
Key words: mulching; mowing; coastal wetlands; *Spartina alterniflora*; soil physicochemical properties; bacterial community

生物入侵是全球面临的重大生态问题, 它可改变原有生态系统的组成和结构, 削弱其生态功能, 威胁生物多样性稳定, 并造成显著的社会经济损失(李俊生等, 2024)。互花米草(*Spartina alterniflora*)原产于北美东海岸, 为米草属多年生海滩草本植物(Neira et al., 2007)。在我国滨海湿地广阔而适宜的生长环境下, 互花米草凭借其强大的繁殖能力迅速扩散并爆发式增长, 造成了严重的自然生态破坏和经济损失(许静和吕艳杰, 2024)。针对这一问题, 我国于2020年6月发布的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021–2035)》已将互花米草的除治列为海岸带生态保护和修复的重点任务(http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/12/5518982/files/ba61c7b9c2b3444a9765a248b0bc334f.pdf)。

当前互花米草的防治主要包括物理、化学、生物及综合方法(谢宝华和韩广轩, 2023)。其中, 以刈割、覆膜等为代表的物理措施因操作简便、环境友好且效果显著而广泛应用(谢宝华和韩广轩, 2018)。互花米草是一种典型的喜光植物, 因此刈割和覆膜胁迫能够显著抑制其光合产物积累, 从而有效控制其扩散(程蕊等, 2026)。研究表明, 不同遮光度的覆盖处理均对互花米草的光合能力产生显著的抑制作用, 其中全暗覆盖的效果最为显著, 75 d后植株全部死亡, 且未观察到对环境的不利影响(张炯森, 2016)。

刈割和覆膜等物理治理措施除了对植物的直接效应, 还可能产生间接的生态影响(Wang et al., 2022; Wang et al., 2025)。土壤细菌对环境变化的响应迅速, 且在养分循环、有机质分解等关键生态功能中占据主导地位(Li et al., 2023; Ma et al., 2023)。刈割后植物残体输入能显著提高土壤有机碳的含量和质量, 以及土壤细菌对硝酸盐的固定能力(Li et al., 2020; Cui et al., 2025)。覆膜可通过改变土壤温度、湿度及光照, 为厌氧和嗜热细菌创造更有利的生长条件(Li et al., 2025)。然而, 在滨海湿地缺氧与高盐环境下, 这两种物理治理措施的长期复合作用如何影响土壤细菌群落的结构与组成尚不清楚。

在我国互花米草重要入侵区广东, 刈割后长期覆膜已被广泛应用, 评估该措施的长期生态效应显得尤为迫切。当前对该物种覆膜治理的相关研究多聚焦于对植物生长生理特征的影响(张炯森, 2016; 程蕊等, 2026), 而刈割后植物残体与长期覆膜对入侵地土壤理化性质及微生物细菌群落结构的影响尚不明确。为此, 本研究选取广东省湛江市互花米草刈割覆膜防治区土壤为研究对象, 重点探究刈割后互花米草残体与长期覆膜对土壤理化性质和细菌群落特征的影响, 以期为科学评估互花米草刈割与覆膜治理措施的长期生态效应提供一定的科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于广东省湛江市廉江市高桥镇安铺港滨海滩涂(109°77′ E, 21°53′ N, 海拔0 m), 属典型的北部湾潮间带盐沼生态系统(徐惠民等, 2023), 且该区为热带北缘海洋性季风气候, 年平均气温23–24℃, 年降水量1,600–1,800 mm (雨季集中于4–9月)。2023年广东省互花米草的入侵面积高达1,267 hm^2, 湛江是主要入侵地市之一, 也是刈割与覆膜物理治理的核心实验区(杨华等, 2025)。全年平均受3–4次台风影响, 风暴潮频发, 导致显著的滩涂侵蚀与沉积物重组。原生植被呈典型带状分布: 低中潮区以红树林为主, 优势种为桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、秋茄(*Kandelia obovata*), 中高潮区为盐沼草甸, 优势种为芦苇(*Phragmites australis*)、茳芏(*Cyperus malaccensis*)、盐地鼠尾粟(*Sporobolus virginicus*) (沈鸿坤等, 2022)。

1.2 实验设计和样品采集

本研究采用双因素交叉实验设计, 设置覆膜(黑色地膜)处理(覆膜/不覆膜)与植物残体处理(保留/去除)两因素, 各2个水平, 形成4个处理组合: 保留残体 + 不覆膜、保留残体 + 覆膜、去除残体 + 不覆膜、去除残体 + 覆膜; 每个处理设置5个重复。实验周期为2021年3月至2024年3月, 期间开展持续覆膜和3次刈割处理。2021年3月, 对样地内互花米草的地上部分进行首次刈割, 保留或清除植物残体; 同年, 监测到有部分植株再生, 于2022年3月开展第二次刈割后, 立即覆膜。经过两年持续覆膜, 第三年样地内仅有极少数植株再生, 于2023年3月开展第三次刈割。第二次和第三次刈割在揭膜后进行, 每次刈割完成后立即覆膜。

揭膜后(2024年3月), 采集土壤样品。每个处理设置5个重复小区, 每个重复小区内按“S”形法布设采样点, 使用内径5 cm的不锈钢土钻采集10–20 cm深度土壤。所有土样均在同一剖面平行采集, 每个重复小区内采集的土芯混合为1份土壤样品, 因此每个处理共获得5份混合土样, 4个处理共获得20份土壤样品。采样后, 剔除土样中可见根系和砾石。每份土壤样品充分混匀后分装, 其中每个处理的5份土样用于土壤理化性质测定; 同时, 从每个处理中选取3份土样置于−80℃冰箱冷冻保存, 用于后续DNA提取和微生物群落分析。

1.3 土壤理化性质测定

使用便携式土壤参数测量仪(LK-200, Beijing Eco-mind Technology Co., China)原位测定土壤电导率和土壤温度。采用凯氏定氮法测定土壤总氮含量(鲁如坤, 2000)。高温燃烧-气相分离-热导检测法(Chatterjee & Lal, 2009)测定土壤总碳含量。用重铬酸盐氧化法(Mebius, 1960)测定土壤有机碳含量。使用索莱宝生化试剂盒BC1515和BC3045分别检测土壤铵态氮含量(陈丽华, 2021)、土壤速效钾含量(那淑芝和杨贵明, 1991)。土壤有效磷采用$NaHCO_3$萃取法(MacLean, 1965)进行测定。

1.4 土壤细菌群落结构分析

采用CTAB法提取土壤样本细菌DNA, 并通过0.8%琼脂糖凝胶电泳检测其纯度与浓度, 随后用无菌水将样品稀释至终浓度1 ng/μL。以稀释后的基因组DNA为模板, 使用带barcode的特异性引物(16S V4区引物: 515F-806R, 序列为F: 5′-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3′, R: 5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′)及Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer进行高保真PCR扩增。PCR产物经2%琼脂糖凝胶电泳检测后, 按等浓度混合并进行纯化(使用Thermo Scientific公司的GeneJET胶回收试剂盒)。纯化后, 使用NEB Next® Ultra™ DNA Library Prep Kit for Illumina试剂盒构建测序文库, 经质检合格后, 在Illumina MiSeq平台上进行测序。信息分析阶段, 首先根据barcode序列拆分下机数据并去除引物序列, 再通过FLASH V1.2.7对双端读段进行拼接, 获得原始tags数据(raw tags)。随后进行严格的质量过滤: 包括截除连续低质量(默认质量值 ≤ 3)碱基的区段, 并过滤掉连续高质量碱基长度小于tag长度75%的序列, 最终获得高质量tags数据(clean tags)。最后, 利用UCHIME算法比对嵌合体检测参考数据库Gold database (http://drive5.com/uchime/uchime_download.html)以去除嵌合体序列, 得到最终的有效数据(effective tags)。使用Uparse v7.0.1001软件对所有样品的有效数据以97%的一致性阈值进行操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)聚类, 选取OTU代表序列后, 采用RDP Classifier

v2.2与GreenGene数据库(http://greengenes.lbl.gov/cgi-bin/nph-index.cgi)进行物种注释分析(置信度阈值设为0.8–1.0)。注释结果在各分类水平上进行统计。其中参照更新的细菌门级分类体系(Oren & Garrity, 2021)对门水平类群进行归类与命名。本研究的样品DNA抽提、PCR扩增、测序文库构建及高通量测序工作均由北京诺禾致源科技股份有限公司完成。

1.5 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法, 比较不同处理土壤理化性质差异、α多样性的组间差异, 找出不同组间具有统计学差异的细菌门和属, 并使用Tukey检验各处理之间的差异($P < 0.05$)。使用QIIME软件计算α多样性的Shannon多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数。采用基于加权UniFrac距离(weighted_unifrac)的非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS)和β多样性指数, 以可视化组间差异并评估其显著性。同时, 采用相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)检验进一步量化组间差异的显著性。采用线性判别分析(LDA)效应大小分析(linear discriminant analysis effect size, LEfSe), LDA得分 > 4.0且$P < 0.05$为阈值, 鉴定不同分组样本间在微生物群落结构上的显著差异生物标志物。使用Spearman相关系数来评估土壤细菌优势菌与土壤理化性质之间的关联。使用基于距离的冗余分析(distance-based redundancy analysis, bd-RDA)探讨环境因子对细菌群落的影响程度。使用R 4.2.2软件完成以上分析, 采用Origin 2021和R 4.2.2软件作图绘制柱状图、NMDS图、RDA图及相关性热图。

2 结果

2.1 不同处理下土壤的理化性质差异

不同处理间土壤理化性质差异显著(表1)。保留残体处理的土壤电导率显著高于去除残体处理; 而温度随着增加覆膜处理时显著升高, 但随着残体增加而显著降低; 在去除残体 + 覆膜处理中达到峰值($P < 0.05$)。保留残体处理下, 土壤总氮、总碳、有机碳和速效钾含量均为所有处理中最高, 且显著高于保留残体 + 覆膜处理; 而有效磷含量则在去除残体 + 覆膜处理中达到最高水平, 显著高于其他处理($P < 0.05$)。

2.2 不同处理下土壤细菌群落组成差异

细菌群落组成在门和属水平上均表现出显著差异(图1)。在门水平上, 相对丰度前10的菌门包括变形菌门、弯曲菌门、厚壁菌门、绿弯菌门、拟杆菌门、泉古菌门、脱硫杆菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、放线菌门及未鉴定细菌(图1A)。变形菌门占据主导地位(45.99%–74.51%), 在保留残体处理中最高, 而保留残体 + 覆膜处理则削弱了这一优势; 弯曲菌门在去除残体 + 覆膜处理中显著富集(34.2%), 为其他处理的6–12倍; 绿弯菌门、厚壁菌门和泉古菌门则在保留残体 + 覆膜处理中同时达到峰值(9.7%、8.2%、4.8%)。

表1 刈割后互花米草残体保留与覆膜处理对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic-film mulching on soil physicochemical properties

指标 Indicators	保留残体 Residue retention	保留残体 + 覆膜 Residue retention + film mulching	去除残体 Residue removal	去除残体 + 覆膜 Residue removal + film mulching
EC (μs/cm)	0.34 ± 0.01^{a}	0.35 ± 0.02^{a}	0.28 ± 0.01^{b}	0.24 ± 0.01^{b}
Temperature (℃)	15.34 ± 0.11^{d}	18.32 ± 0.10^{c}	22.20 ± 0.17^{b}	25.74 ± 0.49^{a}
TN (g/kg)	1.58 ± 0.06^{a}	0.99 ± 0.17^{b}	1.24 ± 0.17^{ab}	1.32 ± 0.09^{ab}
TC (g/kg)	17.22 ± 0.46^{a}	11.58 ± 1.27^{b}	13.96 ± 1.03^{ab}	15.38 ± 1.01^{ab}
SOC (g/kg)	16.66 ± 0.40^{a}	11.07 ± 1.26^{b}	13.62 ± 0.97^{ab}	14.64 ± 1.18^{ab}
NH_4^+-N (mg/kg)	18.45 ± 0.58^{a}	17.93 ± 1.00^{a}	17.16 ± 0.60^{a}	19.48 ± 0.85^{a}
AK (mg/kg)	737.63 ± 21.46^{a}	537.40 ± 29.03^{b}	655.10 ± 54.88^{ab}	685.40 ± 19.57^{a}
AP (mg/kg)	58.50 ± 4.92^{b}	50.72 ± 5.62^{b}	66.56 ± 4.30^{b}	90.40 ± 5.89^{a}

数据表示为平均值 ± 标准差。同一行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。EC: 土壤电导率; Temperature: 温度; TN: 总氮; TC: 总碳; SOC: 土壤有机碳; NH_4^+-N: 铵态氮; AK: 速效钾; AP: 有效磷。

Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). EC, Soil electrical conductivity; TN, Total nitrogen; TC, Total carbon; SOC, Soil organic carbon; NH_4^+-N, Ammonium nitrogen; AK, Available potassium; AP, Available phosphorus.

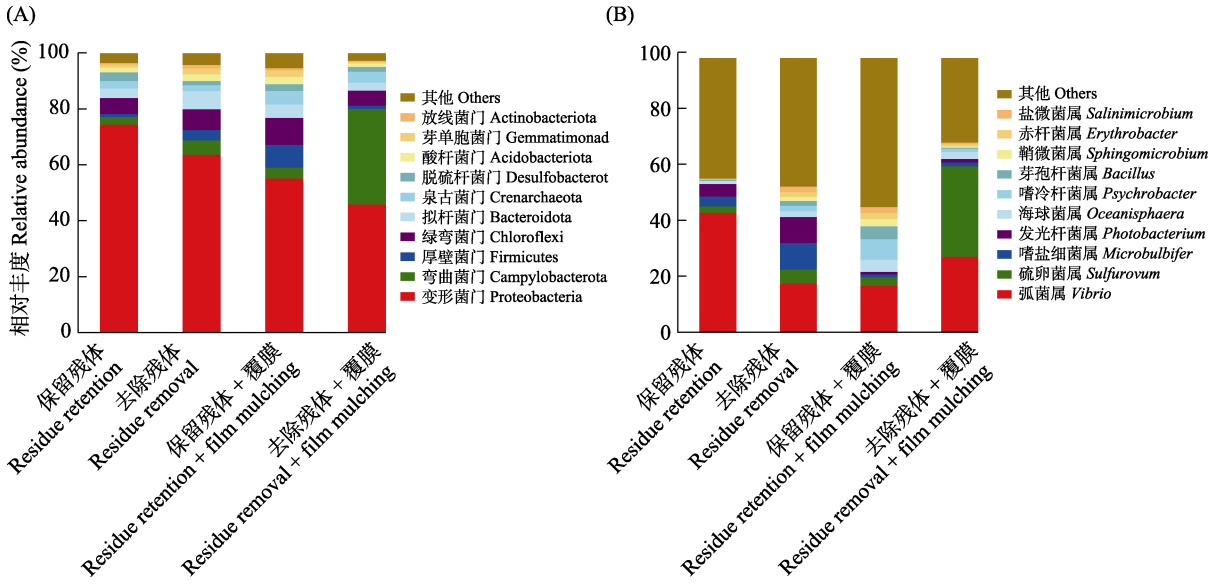


图1　刈割后互花米草残体保留与覆膜处理下土壤细菌门水平(A)和属水平(B)的相对丰度

Fig. 1　Relative abundance of soil bacteria at the phylum level (A) and genus level (B) under mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching treatments

在属水平上, 相对丰度前10的菌属包括弧菌属(*Vibrio*)、硫卵菌属(*Sulfurovum*)、嗜盐细菌属(*Microbulbifer*)、发光杆菌属(*Photobacterium*)、海球菌属(*Oceanisphaera*)、嗜冷杆菌属(*Psychrobacter*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、鞘微菌属(*Sphingomicrobium*)、赤杆菌属(*Erythrobacter*)、盐微菌属(*Salinimicrobium*)及未鉴定细菌(图1B)。弧菌属在各处理中均为优势菌属(16.94%–43.61%), 且在保留残体处理中达到最高; 覆膜或去除残体均显著降低其丰度约60%。硫卵菌属在去除残体 + 覆膜处理中显著富集(32.94%), 为其他处理的6–14倍。覆膜总体抑制了嗜盐细菌属与发光杆菌属, 而保留残体 + 覆膜处理则促进了海球菌属、嗜冷杆菌属和芽孢杆菌属的增加。

2.3　不同处理下互花米草入侵地土壤细菌群落的α多样性

去除残体 + 覆膜处理的土壤细菌α多样性总体低于其他处理, 其中Pielou均匀度指数和Simpson多样性指数显著低于去除残体处理和保留残体 + 覆膜处理($P < 0.05$; 图2A, C); Shannon多样性指数显著低于保留残体 + 覆膜处理($P < 0.05$; 图2B), 其他处理间3种α多样性指数差异不显著。

2.4　不同处理下互花米草入侵地土壤细菌群落的β多样性

基于加权UniFrac距离的NMDS分析与ANOSIM检验表明, 不同处理组的土壤细菌群落结构存在显著差异($P = 0.001$, 图3), 去除残体 + 覆膜处理组在排序空间中与其他处理组显著分离。组间差异检验进一步证实了该处理组与所有其他处理组均存在显著差异(表2)。

LEfSe分析揭示了各处理下的特异性生物标志物: 涵盖1个门、3个纲、1个目、3个科和6个属(图4)。其中, 保留残体处理组富集变形菌门、γ-变形菌纲以及弧菌属等富营养型细菌种类。去除残体处理组主要富集兼性厌氧的海洋细菌发光杆菌属。保留残体 + 覆膜处理组富集芽孢杆菌纲、芽孢杆菌目、芽孢杆菌属, 以及嗜冷杆菌属等多种耐压型细菌; 去除残体 + 覆膜处理组则富集典型厌氧型寡营养菌深古菌纲。

2.5　不同处理下土壤细菌群落与环境因子的关系

Spearman相关性分析结果表明, 关键环境因子与优势菌属之间存在显著联系(图5A)。总氮和速效钾与弧菌属、鞘微菌属、赤杆菌属及盐微菌属均呈显著负相关, 总碳和有机碳与弧菌属呈正相关, 但与赤杆菌属和盐微菌属呈负相关; 硫卵菌属的相对丰度与温度显著正相关, 却与电导率呈负相关, 而有效磷则与发光杆菌属呈显著负相关。bd-RDA冗余分析进一步验证了Spearman相关性结果(图5B)。第一主坐标轴的解释度为43.3%, 第二主坐标轴的

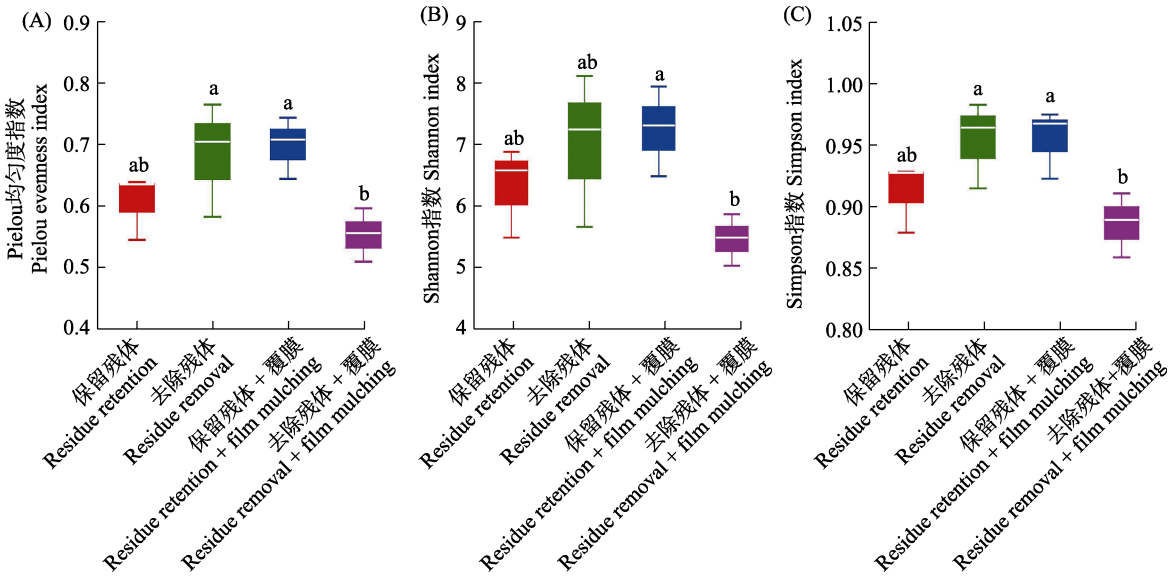


图2　刈割后互花米草残体保留与覆膜处理下根际土壤细菌群落的α多样性指数。不同小写字母表示不同处理之间多样性指数差异显著, $P < 0.05$。

Fig. 2　α diversity indices of rhizosphere soil bacterial communities under mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching treatments. Different lowercase letters indicate significant differences in diversity indices among treatments ($P < 0.05$).

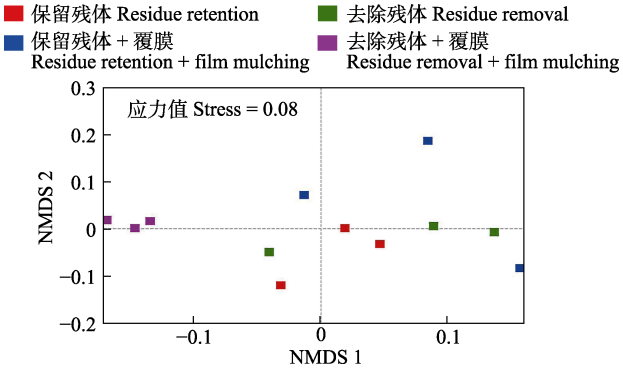


图3　刈割后互花米草残体保留与覆膜处理下土壤细菌群落结构基于加权UniFrac距离的非度量多维尺度(NMDS)排序分析

Fig. 3　Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination analysis of soil bacterial community structure based on weighted UniFrac distances under mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching treatments

解释度为31.3%, 前两轴共解释74.6%的群落变异。其中, 温度、总氮、总碳、有机碳、速效钾显著影响了优势土壤细菌属群落的组成($P < 0.05$)。

3　讨论

3.1　刈割后互花米草残体保留与覆膜处理对土壤理化性质的影响

本研究中, 保留残体与覆膜处理显著影响土壤碳、氮、钾等关键养分含量及温度(表1, 图1, 图3)。这表明物理管理措施通过调控土壤化学环境, 间接驱动了微生物群落的演变。已有研究发现了不同覆膜材料和减少耕作保留小麦残留物对土壤物理和化学性质的明显影响(Alskaf et al., 2021; Pavlů et al., 2021)。本研究发现覆膜处理显著提高了土壤有效磷

表2　基于加权UniFrac距离的β多样性指数组间差异显著性检验表

Table 2　Significance test for β diversity index differences between groups based on weighted UniFrac distance

两两组别 Pairwise groups	差值 Difference	*P*值 *P* value	置信下限 LCL	置信上限 UCL
保留残体/去除残体 Residue retention/residue removal	–0.667	0.735	–5.049	3.715
保留残体/保留残体 + 覆膜 Residue retention/residue retention + film mulching	–3.33	0.118	–7.715	1.049
保留残体/去除残体 + 覆膜 Residue retention/residue removal + film mulching	4.667	0.040	0.285	9.049
去除残体/保留残体 + 覆膜 Residue removal/residue retention + film mulching	–2.667	0.198	–7.049	1.715
去除残体/去除残体 + 覆膜 Residue removal/residue removal + film mulching	5.333	0.023	0.951	9.715
保留残体+覆膜/去除残体 + 覆膜 Residue retention + film mulching/residue removal + film mulching	8.000	0.003	3.618	12.382

表中所列*P*值表示基于加权UniFrac距离的β多样性组间差异显著性。LCL为置信下限, UCL为置信上限。

The *P* values listed in the table indicate the significance of differences in β diversity among groups based on the weighted UniFrac distance. LCL, Lower confidence limit; UCL, Upper confidence limit.

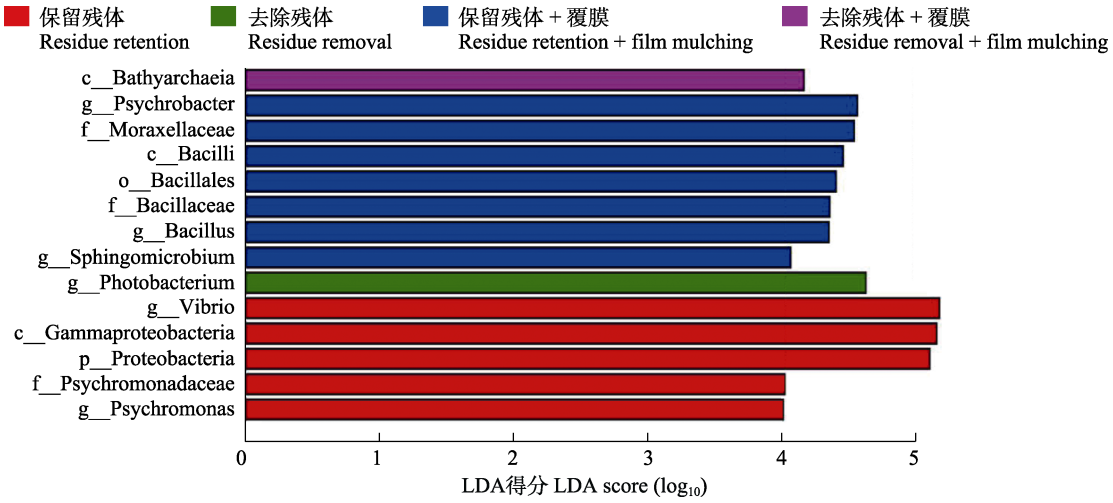


图4　刈割后互花米草残体保留与覆膜处理下土壤多级物种水平上细菌群落线性判别分析(LDA)值分布柱状图(LDA得分(log_{10}) > 4, $P < 0.05$)

Fig. 4　Distribution of linear discriminant analysis (LDA) scores for soil bacterial taxa at multiple taxonomic levels under mowed *Spartina alterniflora* residue retention and plastic film mulching treatments (LDA score (log_{10}) > 4, $P < 0.05$)

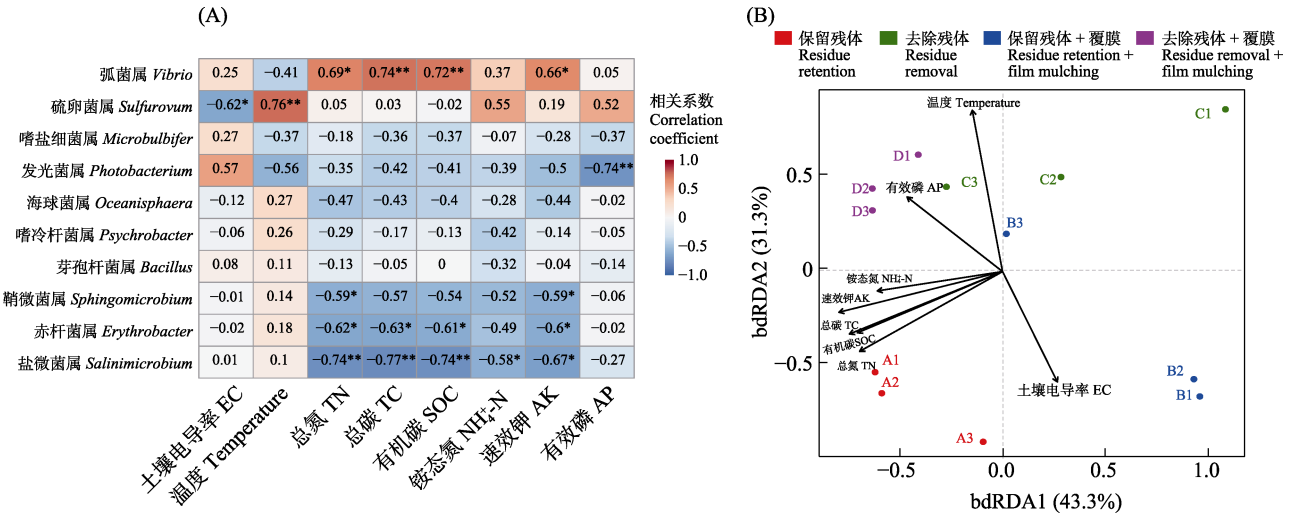


图5　细菌优势属群落与土壤理化因子的相关性分析。(A) Spearman相关性分析; (B)基于距离的冗余(bd-RDA)分析。图A中, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$。EC: 土壤电导率; Temperature: 温度; TN: 总氮; TC: 总碳; SOC: 土壤有机碳; NH_4^+-N: 铵态氮; AK: 速效钾; AP: 有效磷。图B中, A–D分别对应4个处理组, 编号1–3表示每个处理组的重复样品。

Fig. 5　Correlation analysis between dominant bacterial genera and soil physicochemical factors. (A) Spearman correlation analysis; (B) Distance-based redundancy bd-RDA analysis. In Fig. A, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. EC, Soil electrical conductivity; TN, Total nitrogen; TC, Total carbon; SOC, Soil organic carbon; NH_4^+-N, Ammonium nitrogen; AK, Available potassium; AP, Available phosphorus. In Fig. B, A–D correspond to the four treatment groups, and the numbers 1–3 represent the replicates of each treatment group.

含量而降低了土壤电导率。这可能是因为覆膜提升了土壤水分含量, 从而促进磷的活化与盐分的淋溶(Zhang et al., 2022; 牛婷婷等, 2024)。另一方面, 保留植物残体显著提升了土壤总碳、有机碳、总氮和速效钾含量, 推断是因为植物残体分解释放了有机质与养分从而补充了土壤中的总碳、总氮和速效钾含量(Liu ZG et al., 2024; Wang D et al., 2024; Xu et al., 2025)。

3.2　刈割后互花米草残体保留与覆膜对土壤细菌群落特征的影响

土壤微生物群落作为环境变化的敏感指示者, 其组成与多样性深刻影响生态系统的功能与稳定

性(Bucher & Lanyon, 2005)。在门水平上, 尽管各处理组的优势菌门组成相似, 但其相对丰度对处理的响应模式揭示了不同的生态策略。变形菌门的丰度随覆膜与植物残体的去除而梯度下降, 表明二者对该富营养型菌门存在协同抑制效应, 这与覆膜降低相关功能基因丰度的发现一致(Li et al., 2024)。本研究中, 覆膜处理下弯曲菌门丰度富集, 很可能源于物理阻隔导致土壤缺氧, 从而为专性厌氧菌创造了优势条件; 绿弯菌门和泉古菌门在保留残体 + 覆膜组丰度最高, 处理促进耐胁迫菌群丰度增加, 这与Liu MJ等(2024)观察到有植物存在时覆膜可富集特定菌门的结果相符, 表明有植物残体进行覆膜可能激活碳氮循环功能菌。而且绿弯菌门通常被认为参与有机质降解过程, 并能利用难分解有机物(Fu et al., 2023)。因此, 我们推测互花米草植物残体的输入可能为其提供了更丰富的底物, 从而可能促进了该菌门在保留残体处理中的生长与富集。

本研究中, 在属水平上的土壤细菌群落结构差异更为显著, 去除残体 + 覆膜组中硫卵菌属爆发性增长, 表明该处理可能创造强还原微环境, 激活了硫氧化/厌氧代谢菌的核心功能, 这也与门水平弯曲菌门富集直接呼应(Nagarajan et al., 2023; Xiang et al., 2023), 共同印证缺氧是驱动该处理群落构建的核心力量。此外, 单独移除植物残体则显著提升了嗜盐细菌属和发光杆菌属的丰度, 表明植物残体缺失可能通过改变盐度或有机质有效性, 促进了这些特殊类群的繁殖。与之相对, 保留残体 + 覆膜处理则驱动了嗜冷杆菌属和芽孢杆菌属的增殖, 表明在覆膜胁迫下保留残体有助于招募耐逆菌群以维持微生态稳定, 这与以往研究结果一致(Fu et al., 2020); 值得注意的是, 保留残体组中占绝对优势的弧菌属在覆膜或互花米草残体去除后丰度下降超60%, 证实该菌群对原生植物–环境互作具有高度依赖性。

较高的微生物多样性通常与生态系统的稳定性及功能冗余度提升相关联, 通常认为, 土壤细菌多样性越高则表示土壤生态系统越健康和稳定(Zhao et al., 2022)。本研究去除残体 + 覆膜处理土壤的Pielou均匀度指数和Shannon多样性指数均低于其他处理指数, 这与前人研究结果一致(杨艺帅等, 2023), 但保留植物残体再进行覆膜土壤细菌微生物α多样性与不覆膜状态下变化不显著。以往研究发现有机物料输入可提高覆膜环境下微生物多样性(王艮梅等, 2022), 该发现也支持我们的结果。因此, 研究结果表明对互花米草残体覆盖处理能够有效调节覆膜对土壤细菌群落的负面效应, 缓解长期覆膜导致的细菌群落多样性下降。

3.3 土壤细菌群落特征与环境因子间的相关关系

本研究的相关性与冗余分析表明, 总氮、总碳、有机碳和速效钾是驱动细菌群落结构变异的关键环境因子(图5)。研究表明, 水分梯度、pH波动及养分有效性对细菌群落组成和多样性具有显著调控作用(Philippot et al., 2024; 许爱云等, 2025)。从本研究相关性分析结果看出温度、总氮、总碳、有机碳、速效钾和有效磷对土壤细菌群落的优势类群具有显著的影响。尤其是总氮、总碳和有机碳, 它们与多个细菌属的丰度呈正相关关系, 表明丰富的有机养分对微生物群落具有普遍的促进作用(Wu et al., 2022; Wang et al., 2023)。此外, 温度是影响硫卵菌属丰度的关键因子, 表明温暖环境有利于该菌属的生长。硫卵菌属在深海热液喷口或其他高温化学环境中较为常见(Giovannelli et al., 2013), 本研究也印证了这一点。特别值得注意的是, 这些养分是富集弧菌属、抑制盐微菌属的关键因子(Li et al., 2021; 方海瑞等, 2024; Riedinger et al., 2024), 揭示了不同菌属对同一环境因子的差异化生态策略。此外, 有效磷与发光杆菌属的负相关关系, 表明高磷含量可能对该类群的生长存在抑制作用(Wang SS et al., 2024)。细菌群落的丰度与土壤理化因子之间的紧密关联, 反映了微生物在复杂土壤环境中对养分的利用和适应机制(Zhu et al., 2022)。

4 结论

本研究揭示了“刈割–覆膜”联合措施对互花米草入侵地土壤理化性质与微生物群落结构的显著影响。研究发现, 保留植物刈割残体能够显著提升土壤碳、氮等关键养分量, 维持较高的细菌多样性; 而在去除残体条件下长期覆膜会降低微生物多样性并诱导耐胁迫菌群富集。Spearman与bd-RDA相关分析进一步显示, 总氮、总碳、有机碳和速效钾等是影响细菌群落特征的关键因子, 共同促进了弧菌属等富营养类群的生长。综上, 采用残体保留的

覆膜方式, 在实现互花米草有效治理的同时, 能减轻对土壤理化性质和微生物群落的负面生态干扰, 为滨海湿地入侵植物的可持续管控提供了理论依据和实践路径。

参考文献

Alskaf K, Mooney SJ, Sparkes DL, Wilson P, Sjögersten S (2021) Short-term impacts of different tillage practices and plant residue retention on soil physical properties and greenhouse gas emissions. Soil and Tillage Research, 206, 104803.

Bucher AE, Lanyon LE (2005) Evaluating soil management with microbial community-level physiological profiles. Applied Soil Ecology, 29, 59–71.

Chatterjee A, Lal R (2009) On farm assessment of tillage impact on soil carbon and associated soil quality parameters. Soil and Tillage Research, 104, 270–277.

Chen LH (2021) Improvement of NH_4^+-N determination in water by indophenol blue. Fujian Analysis & Testing, 30(6), 52–55. (in Chinese with English abstract) [陈丽华 (2021) 靛酚蓝法测定水中氨氮的方法改进. 福建分析测试, 30(6), 52–55.]

Cheng R, A Siha, Cai JF, Yang LJ, Wang DZ, Yang XL, Li HL (2026) The effects of physical prevention and control on the growth of *Spartina alterniflora* and macrobenthos in coastal wetlands: A case study from Dongtai, Tiaozini Wetland, Yancheng City, Jiangsu Province. Wetland Science, 24, 144–154. (in Chinese with English abstract) [程蕊, 阿斯哈, 蔡竟芳, 杨丽娟, 王大郅, 杨小立, 李红丽 (2026) 物理防控对滨海湿地互花米草及大型底栖动物的影响——以江苏省盐城市东台条子泥湿地为例. 湿地科学, 24, 144–154.]

Cui YX, Ren FR, Wu YP, Liu H, Sun ZJ, Wang YZ, Peter-Contesse H, Han SJ, Wan SQ, Zheng JQ (2025) Impact of plant carbon inputs on soil bacterial communities and nitrogen cycle functions in temperate steppe. Plant and Soil, 513, 435–452.

Fang HR, Liu JJ, Chen XL, Jiang Y, Liu ZX, Gu HD, Wan SM, Xiao Y (2024) Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on bacterial community characteristics and soybean yields. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 32, 804–815. (in Chinese with English abstract) [方海瑞, 刘俊杰, 陈雪丽, 姜宇, 刘株秀, 顾海东, 万书明, 肖洋 (2024) 长期有机肥和化肥配施对黑土细菌群落特征和大豆产量的影响. 中国生态农业学报(中英文), 32, 804–815.]

Fu HR, Chen H, Ma QX, Han KF, Wu SF, Wu LH (2023) Effect of planting and mowing cover crops as livestock feed on soil quality and pear production. Frontiers in Plant Science, 13, 1105308.

Fu JJ, Luo YL, Sun PY, Gao JZ, Zhao DH, Yang PZ, Hu TM (2020) Effects of shade stress on turfgrasses morphophysiology and rhizosphere soil bacterial communities. BMC Plant Biology, 20, 92.

Giovannelli D, D'Errico G, Manini E, Yakimov M, Vetriani C (2013) Diversity and phylogenetic analyses of bacteria from a shallow-water hydrothermal vent in Milos Island (Greece). Frontiers in Microbiology, 4, 184.

Li JS, Yu FH, Zhao CY (2024) Biological invasions: Invasive alien species and biodiversity conservation. Biodiversity Science, 32, 24582. (in Chinese with English abstract) [李俊生, 于飞海, 赵彩云 (2024) 生物入侵: 外来入侵物种与生物多样性保护. 生物多样性, 32, 24582.]

Li JW, Zhao LY, Song CT, He CG, Bian HF, Sheng LX (2023) Forest swamp succession alters organic carbon composition and survival strategies of soil microbial communities. Science of the Total Environment, 904, 166742.

Li X, Wang AC, Wan WJ, Luo XS, Zheng LX, He GW, Huang DQ, Chen WL, Huang QY (2021) High salinity inhibits soil bacterial community mediating nitrogen cycling. Applied and Environmental Microbiology, 87, e01366-21.

Li XB, Li ZA, Zhang XD, Xia LL, Zhang WX, Ma QQ, He HB (2020) Disentangling immobilization of nitrate by fungi and bacteria in soil to plant residue amendment. Geoderma, 374, 114450.

Li Y, Zhang XC, Yang N, Hao HY, Bilyera N, Zhang XC, Li TL, Yue SC, Zhai BN, Zamanian K, Li ZY, Razavi BS (2024) Long-term straw and plastic film mulching have divergent effects on maize rhizosphere enzyme activity and bacterial community structure. Agriculture, Ecosystems & Environment, 364, 108894.

Li YJ, Zhang L, Wang M, Li Q, Sun B, Qin YB, Ning W, Li CL, Zhang JJ, Liu H (2025) Different film-mulching strategies alter soil biological characteristics and fungal and archaeal community structures under a drip fertigation system. Environmental Technology & Innovation, 38, 104110.

Liu MJ, Zheng JL, Li QS, Liang F, Mu XG, Pei DJ, Jia HT, Wang ZH (2024) Effects of film mulching on soil microbial diversity and community structure in the maize root zone under drip irrigation in northwest China. Agronomy, 14, 1139.

Liu ZG, Dai YH, Wen TY, Wei PL, Fu YL, Qiao MJ (2024) Study on the effect of magnesium chloride-modified straw waste biochar on acidic soil properties. Molecules, 29, 3268.

Lu RK (2000) Methods for Agrochemical Analysis of Soils. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [鲁如坤 (2000) 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]

Ma S, Geng HH, Yan CC, Han XM, Xu D, Zhao FR, Blake RE, Zhou BH, Chen HL, Yuan RF, Jin BS, Liu HJ, Wang F (2023) Nutrient dynamics and microbial community response in macrophyte-dominated lakes: Implications for improved restoration strategies. Journal of Environmental

Management, 325, 116372.
MacLean AA (1965) Extraction of organic phosphorus from soils with sodium bicarbonate. Canadian Journal of Soil Science, 45, 165–170.
Mebius LJ (1960) A rapid method for the determination of organic carbon in soil. Analytica Chimica Acta, 22, 120–124.
Na SZ, Yang GM (1991) Improvement of turbidimetric conditions for determination of soil available potassium by sodium tetraphenylborate. Soils and Fertilizers, (4), 41–42. (in Chinese) [那淑芝, 杨贵明 (1991) 四苯硼钠测定土壤速效钾比浊条件的改进. 土壤肥料, (4), 41–42.]
Nagarajan V, Tsai HC, Chen JS, Koner S, Kumar RS, Chao HC, Hsu BM (2023) Systematic assessment of mineral distribution and diversity of microbial communities and its interactions in the Taiwan subduction zone of mud volcanoes. Environmental Research, 216, 114536.
Neira C, Levin LA, Grosholz ED, Mendoza G (2007) Influence of invasive *Spartina* growth stages on associated macrofaunal communities. Biological Invasions, 9, 975–993.
Niu TT, Ma MS, Zhang JG (2024) Effects of straw returning and plastic film mulching on soil physical and chemical properties and spring maize yield in rain-fed upland farmland. Xinjiang Agricultural Sciences, 61, 1896–1906. (in Chinese with English abstract) [牛婷婷, 马明生, 张军高 (2024) 秸秆还田和覆膜对旱作雨养农田土壤理化性质及春玉米产量的影响. 新疆农业科学, 61, 1896–1906.]
Oren A, Garrity GM (2021) Valid publication of the names of forty-two phyla of prokaryotes. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 71, 005056.
Pavlů L, Kodešová R, Fér M, Nikodem A, Němec F, Prokeš R (2021) The impact of various mulch types on soil properties controlling water regime of the Haplic Fluvisol. Soil and Tillage Research, 205, 104748.
Philippot L, Chenu C, Kappler A, Rillig MC, Fierer N (2024) The interplay between microbial communities and soil properties. Nature Reviews Microbiology, 22, 226–239.
Riedinger DJ, Fernández-Juárez V, Delgado LF, Sperlea T, Hassenrück C, Herlemann DPR, Pansch C, Kataržytė M, Bruck F, Ahrens A, Rakowski M, Piwosz K, Stevenson A, Reusch TBH, Gyraitė G, Schulz-Bull D, Benterbusch-Brockmöller H, Kube S, Dupke S, Andersson AF, Riemann L, Labrenz M (2024) Control of *Vibrio vulnificus* proliferation in the Baltic Sea through eutrophication and algal bloom management. Communications Earth & Environment, 5, 246.
Shen HK, Zhao BY, Chen MY, Huang RY, Yu KF, Liang W (2022) Changes of the area of *Spartina alterniflora* and mangroves in Guangxi Shankou Mangrove National Nature Reserve from 1995 to 2019. Chinese Journal of Applied Ecology, 33, 397–404. (in Chinese with English abstract) [沈鸿坤, 赵博义, 陈铭洋, 黄荣永, 余克服, 梁文 (2022) 1995–2019年广西山口红树林国家级自然保护区互花米草和红树林面积变化. 应用生态学报, 33, 397–404.]
Wang D, Li SY, Sun XY, Hao D, Li YL, Wang H (2024) Effects of compost application of green waste on soil properties: A meta-analysis. Sustainability, 16, 8877.
Wang GM, Chen J, Fan ZX, Zhang HC, Xiang J (2022) The Shift of Bacterial Community Structure in Coastal Saline-alkaline Soil upon Addition of Different Organic Materials. Journal of Ecology and Rural Environment, 38, 85–95. (in Chinese with English abstract) [王艮梅, 陈捷, 范之馨, 张焕朝, 项剑 (2022) 外源有机物添加对滨海盐碱土细菌群落结构的影响. 生态与农村环境学报, 38, 85–95.]
Wang JG, Wei K, Li ZY, Wang YL, Tang JL, Zhu B (2025) Effects of mowing on root biomass, soil properties, microbial biomass, and microbial diversity in grasslands: A meta-analysis. Land Degradation & Development, 36, 1483–1491.
Wang JY, Li HQ, Cheng ZB, Yin FT, Yang L, Wang ZH (2023) Changes in soil bacterial and fungal community characteristics in response to long-term mulched drip irrigation in oasis agroecosystems. Agricultural Water Management, 279, 108178.
Wang SS, Rana S, Zhang T, Wang YM, Liu Z, Cai QF, Geng XD, Yuan QP, Yang Y, Miao C, Zhou HN, Dai L, Peng HW, Li Z (2024) Influence of varied phosphorus fertilizer ratios on the rhizosphere soil microbial community in *Idesia polycarpa* seedlings. Forests, 15, 1686.
Wang YJ, Liu L, Zhang JT, Li DM, Yu J, Gao H, Li HK, Zhao ZY (2022) Soil phytoremediation reveals alteration in soil microbial metabolic activities along time gradient of cover crop mulching. Environmental Research, 209, 112884.
Wu BH, Luo HY, Wang XT, Liu HK, Peng H, Sheng MP, Xu F, Xu H (2022) Effects of environmental factors on soil bacterial community structure and diversity in different contaminated districts of Southwest China mine tailings. Science of the Total Environment, 802, 149899.
Xiang ZZ, Chen X, Bai J, Rong HM, Li H, Zhao YG, Huang X (2023) A novel anaerobic/aerobic-moving bed-dynamic membrane combined biofilm reactor (A/O-MB-DMBR) treating mariculture wastewater with chitosan (CTS): Performance, control and microbial community. Environmental Technology & Innovation, 29, 103009.
Xie BH, Han GX (2018) Control of invasive *Spartina alterniflora*: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 29, 3464–3476. (in Chinese with English Abstract) [谢宝华, 韩广轩 (2018) 外来入侵种互花米草防治研究进展. 应用生态学报, 29, 3464–3476.]
Xie BH, Han GX (2023) Control of invasive plant *Spartina alterniflora*: Concept, technology and practice. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 38, 1924–1938. (in Chinese with English abstract) [谢宝华, 韩广轩 (2023) 入侵植物互花米草防治: 理念、技术与实践. 中国科学院院刊, 38, 1924–1938.]
Xu AY, Li T, Men XP, Ren PR, Zhang QX, Sun Z, Zhang XY,

Li XL (2025) Effects of different mulching patterns on physical and chemical soil properties and bacterial communities in cherry orchards in the drought area of eastern Gansu. Pratacultural Science, 42, 1642–1652. (in Chinese with English abstract) [许爱云, 李甜, 门小鹏, 任盼荣, 张庆霞, 孙震, 张晓燕, 李小龙 (2025) 不同覆盖模式对陇东旱塬区樱桃园土壤理化性质及细菌群落的影响. 草业科学, 42, 1642–1652.]

Xu HM, Zhang Y, Wang XP, Huang X, Wang G (2023) Spatial distribution characteristics of soil organic carbon in *Spartina alterniflora* salt marsh in different invasive years along Beibu Gulf, Guangxi. Marine Environmental Science, 42, 405–409. (in Chinese with English abstract) [徐惠民, 张燕, 王薛平, 黄星, 王耕 (2023) 广西北部湾不同入侵年份互花米草盐沼湿地土壤有机碳空间分布. 海洋环境科学, 42, 405–409.]

Xu J, Lü YJ (2024) Current situation and suggestions on the control of *Spartina alterniflora* in Beidagang Wetland Nature Reserve. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, (2), 38–40. (in Chinese with English Abstract) [许静, 吕艳杰 (2024) 北大港湿地自然保护区互花米草的治理现状及建议. 天津农林科技, (2), 38–40.]

Xu Q, Zhang L, Zhao YD, Tang CX, Li YJ, Xu ML, Wang XZ (2025) Microbial mechanism and CO_2 emission from coastal saline soil: The role of corn stover and nutrient additions. Environmental Research, 275, 121423.

Yang H, Ling SQ, Tian LY, Qiu HL, Qin CS, Xu JZ (2025) Current status of mangrove pests in Guangdong Province and suggestions for their control management. Wetland Science, 23, 262–273. (in Chinese with English abstract) [杨华, 凌斯全, 田龙艳, 邱华龙, 秦长生, 徐金柱 (2025) 广东省红树林有害生物调查与防治建议. 湿地科学, 23, 262–273.]

Yang YS, Li QH, Zhang ZB, Chen YH, Yang P, Yang XY, Tan L (2023) Effects of plastic film mulching on the rhizosphere soil bacterial community of *Allium chinense*. Journal of Agro-Environment Science, 42, 2519–2530. (in Chinese) [杨艺帅, 李清昊, 张政兵, 陈越华, 杨平, 杨学宇, 谭琳 (2023) 覆膜处理对藠头根际土壤细菌群落的影响. 农业环境科学学报, 42, 2519–2530.]

Zhang JS (2016) Effect of different coverage measures on physiological characteristics and growth of *Spartina alterniflora*. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 43, 72–75. (in Chinese with English abstract) [张炯森 (2016) 覆盖对互花米草生理特性和生长的影响. 福建林业科技, 43, 72–75.]

Zhang JS, Bian QQ, Miao Q, Jiang XL, Wang YH, Wang HY, Cui ZL (2022) Maize productivity response to combined tillage and mulching in coastal saline zones. Agronomy Journal, 114, 784–794.

Zhao YM, Zhang FY, Li L, Yang XJ, Zhang FW, Zhao WY, He Q (2022) Substitution experiment of biodegradable paper mulching film and white plastic mulching film in Hexi oasis irrigation area. Coatings, 12, 1225.

Zhu KY, Wang QC, Zhang Y, Zarif N, Ma SJ, Xu LQ (2022) Variation in soil bacterial and fungal community composition at different successional stages of a broad-leaved Korean pine forest in the lesser Hinggan Mountains. Forests, 13, 625.

(责任编委: 东秀珠　责任编辑: 李会丽)

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25475, pages 1–17
doi: 10.17520/biods.2025475
cstr: 32101.14.biods.2025475

•遗传多样性及保护专题•

基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究：以枫杨属为例

王姗姗[1,2], 刘琦[2,3], 李玉[2], 王天瑞[2], 戴锡玲[3], Gregor Kozlowski[2,4,5], 许瑾[1*], 宋以刚[2*]

1. 上海应用技术大学城市建设与生态技术学部, 上海 201418, 中国; 2. 上海辰山植物园华东植物迁地保护与利用国家林业和草原局重点实验室, 上海 201602, 中国; 3. 上海师范大学生命科学学院, 上海 200234, 中国; 4. Department of Biology and Botanic Garden, University of Fribourg, Fribourg 1700, Switzerland; 5. Natural History Museum Fribourg, Fribourg 1700, Switzerland

摘要: 叶绿体基因组因其结构保守、母系单亲遗传以及拷贝数高等特点, 曾被广泛应用于植物物种的识别、界定以及系统发育关系的重建。然而, 叶绿体基因组无法有效反映花粉介导的基因流, 对遗传漂变较为敏感, 且容易受到不完全谱系分选和杂交事件的影响。因此, 在植物鉴定和种群演化历史研究中, 如果仅依赖叶绿体基因组证据, 可能导致结论存在偏差或不够全面。本研究对枫杨属(*Pterocarya*)的7个个体进行了叶绿体全基因组测序、组装与注释, 并结合已发表数据开展了比较基因组与系统发育分析。结果显示, 叶绿体基因组长度介于160,176–160,318 bp, 均具典型四分体结构, 编码131个基因(86个蛋白编码基因、8个rRNA和37个tRNA)。简单重复序列(SSRs)位点数量为87–96个, 以单核苷酸重复为主。比较基因组分析结果表明, 枫杨属物种间的叶绿体基因组整体呈现高度保守性, 其中, 反向重复区和编码区的序列保守性高于单拷贝区和非编码区。值得注意的是, 在编码区中, *ndhF*基因的序列变异程度显著高于其他蛋白编码基因。系统发育分析结果显示, 基于不同数据分区(全基因组、蛋白质编码序列、高变区与滑窗)构建的系统树呈现2–5分支的多种拓扑结构。枫杨(*P. stenoptera*)、甘肃枫杨(*P. macroptera* var. *macroptera*)和华西枫杨(*P. insignis*)等物种个体在不同分析中均出现谱系混杂与跨分支分布现象。这些结果表明, 叶绿体基因组在解析枫杨属物种鉴定及生物地理历史方面存在明显局限, 单纯依赖其数据易导致系统性偏差。因此, 未来的植物系统发育研究有必要整合核基因组数据并采用多物种溯祖分析方法, 以实现更准确的物种鉴定与演化关系重建。

关键词: 叶绿体基因组; 枫杨属; 系统发育分析; 生物地理学

王姗姗, 刘琦, 李玉, 王天瑞, 戴锡玲, Gregor Kozlowski, 许瑾, 宋以刚 (2026) 基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究: 以枫杨属为例. 生物多样性, 34, 25475. doi: 10.17520/biods.2025475; cstr: 32101.14.biods.2025475.
Wang SS, Liu Q, Li Y, Wang TR, Dai XL, Kozlowski G, Xu J, Song YG (2026) Cautions on using chloroplast genome-based phylogeny for species identification and biogeography: A case study of *Pterocarya*. Biodiversity Science, 34, 25475. doi: 10.17520/biods.2025475; cstr: 32101.14.biods.2025475.

Cautions on using chloroplast genome-based phylogeny for species identification and biogeography: A case study of *Pterocarya*

Shanshan Wang[1,2], Qi Liu[2,3], Yu Li[2], Tianrui Wang[2], Xiling Dai[3], Gregor Kozlowski[2,4,5], Jin Xu[1*], Yigang Song[2*]

1 *School of Urban Construction and Ecological Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China*
2 *Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on East China Plant Conservation and Utilization, Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China*
3 *College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China*
4 *Department of Biology and Botanic Garden, University of Fribourg, Fribourg 1700, Switzerland*
5 *Natural History Museum Fribourg, Fribourg 1700, Switzerland*

ABSTRACT

Aim: The chloroplast genome has been widely used for plant species identification, delimitation, and phylogenetic

收稿日期 Received: 2025-12-12; 接受日期 Accepted: 2026-03-12
基金项目: 上海市绿化和市容管理局科研专项(G212406; G242414; G242416)和上海应用技术大学中青年教师科技人才发展基金(ZQ2022-17)
Supported by the Scientific Research Special Project of Shanghai Landscaping & City Appearance Administrative Bureau (G212406; G242414; G242416) and Science and Technology Talent Development Fund for Young and Middle-aged Teachers of Shanghai Institute of Technology (ZQ2022-17)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: ygsong@cemps.ac.cn; xujin@sit.edu.cn

reconstruction due to its structural conservation, maternal uniparental inheritance, and high copy number. However, the chloroplast genome cannot effectively reflect pollen-mediated gene flow, is sensitive to genetic drift, and is susceptible to incomplete lineage sorting and hybridization events. Therefore, in plant identification and population evolutionary history studies, relying solely on chloroplast genome evidence may lead to biased or incomplete conclusions.
Methods: This study performed whole-chloroplast genome sequencing, assembly, and annotation for seven *Pterocarya* individuals, and conducted comparative genomic and phylogenetic analyses incorporating published data.
Results: The chloroplast genome ranged in length from 160,176 to 160,318 bp and exhibited a typical quadripartite structure, encoding 131 genes (86 protein-coding genes, 8 rRNAs, and 37 tRNAs). The number of simple sequence repeats (SSRs) loci ranged from 87 to 96, dominated by mononucleotide repeats. Comparative genomic analysis indicated that chloroplast genomes among *Pterocarya* species were highly conserved overall. The sequence conservation of the inverted repeat regions and coding regions was higher than that of the single-copy regions and non-coding regions. Notably, within the coding regions, the *ndhF* gene exhibited significantly higher sequence variation than other protein-coding genes. The results of phylogenetic analysis showed that the phylogenetic trees constructed based on different data partitions (whole genome, protein-coding sequence, hypervariable regions, and sliding windows) exhibited various topological structures with two to five major clades. Individuals of species such as *P. stenoptera*, *P. macroptera* var. *macroptera*, and *P. insignis* consistently showed lineage admixture and cross-clade distribution across different analyses.
Conclusion: The chloroplast genome exhibits significant limitations in resolving species identification and biogeographic history within the genus *Pterocarya*, and relying solely on its data may lead to systematic bias. Therefore, future studies on plant phylogenetics should integrate nuclear genomic data and employ multispecies coalescent methods to achieve more accurate species identification and evolutionary relationship reconstruction.
Key words: chloroplast genome; *Pterocarya*; phylogenetic analysis; biogeography

叶绿体基因组凭借其结构高度保守、通常呈母系单亲遗传、细胞内拷贝数极高且易于获取等独特优势, 无可争议地成为重建植物生命之树, 尤其是解决属及以上阶元系统发育关系的经典工具(Zhang et al., 2022)。在物种鉴定领域, 叶绿体基因组中的多个质体区域(如*trnH-psbA*、*matK*、*rbcL*等)已被确立为核心植物DNA条形码, 为物种, 特别是近缘种和隐存种的快速、准确鉴别提供了关键分子证据(Chase et al., 2007; Kress & Erickson, 2007; Zhang et al., 2012)。基于叶绿体基因组的系统发育与谱系地理分析, 为追溯类群起源中心、推断大陆扩散路线等宏观进化历史研究提供了关键证据(Chen et al., 2025; Li PW et al., 2025)。

随着植物系统学与生物地理学研究焦点逐渐从宏观历史格局下移至物种内部的种群动态与近期分化过程(Cao et al., 2022; Dong et al., 2024), 叶绿体基因组的应用场景也发生了深刻变化。在过去二三十年间, 利用叶绿体片段或完整基因组开展种群水平的遗传学研究已成为一种广泛范式(Avise, 2000; Yan et al., 2023)。这类研究试图通过母系遗传的叶绿体谱系来描绘种群的遗传结构、历史动态和基因流模式(刘家奇等, 2021; 张健和张宏祥, 2024; Liu et al., 2025)。这种研究范式的广泛应用在本质上预设了一个关键前提: 即适用于解析长期、深度分化历史的叶绿体基因组, 其进化历史同样能够准确反映近期分化且可能存在复杂基因流的种群整体历史。

然而, 将叶绿体基因组谱系简单等同于种群历史的研究方法正面临日益增多的理论质疑与实证挑战(Wu et al., 2014; Arredondo et al., 2021)。叶绿体基因组因其固有的生物学特性, 在揭示物种进化历史方面存在本质性局限: 首先, 在被子植物中叶绿体基因组大多呈现母系遗传特性, 其基因流仅能通过种子传播实现, 无法捕获由花粉介导的父系基因流(胡颖等, 2019; Xu et al., 2020), 导致基于叶绿体基因组推断的基因流格局和地理隔离模式存在严重偏差, 往往显著低估种群间的实际遗传连通性(Petit et al., 2005)。其次, 叶绿体基因组的单倍体与非重组性质使其有效种群大小(effective population size, Ne)理论上仅为核基因组的1/4, 这一特征使叶绿体基因组更容易受遗传漂变影响, 因此其显示出的种群结构可能只是遗传漂变造成的假象, 而非真实的进化历史(付涛等, 2018; 胡颖等, 2019)。此外, 在近期经历快速分化的类群中, 叶绿体基因组与核基因组谱系之间常因不完全谱系分选(incomplete lineage sorting, ILS)而出现不一致(O'Donnell et al.,

2025; Shen et al., 2025), 这不仅会影响系统发育关系的重建, 也会增加单纯依赖叶绿体基因组进行物种鉴定的误判风险(Wu et al., 2025)。而叶绿体基因组通过杂交导致的跨物种水平转移(即“细胞质捕获”)更可能进一步引入误差, 从而得出误导性的系统发育关系与生物地理推论(王茜等, 2019; Shen et al., 2025)。

枫杨属(*Pterocarya*)是胡桃科中阐释上述叶绿体基因组局限性与推断偏差的经典范例。该属包含8个分类群, 其现代地理分布呈现出典型的东亚至地中海东缘的间断性格局(匡可任等, 1979)。其中, 东亚地区有枫杨(*P. stenoptera*)、越南枫杨(*P. tonkinensis*)、甘肃枫杨(*P. macroptera* var. *macroptera*)、华西枫杨(*P. macroptera* var. *insignis*)、云南枫杨(*P. macroptera* var. *delavayi*)、湖北枫杨(*P. hupehensis*)和水胡桃(*P. rhoifolia*), 而地中海东缘(以高加索地区为核心)仅有高加索枫杨(*P. fraxinifolia*) 1个物种(Kozlowski et al., 2018)。化石记录表明枫杨属在新生代曾经广泛分布在北半球, 但随着气候变冷(尤其是第四纪末次冰盛期的到来), 枫杨属在北美、西伯利亚和欧洲大陆地区陆续消失, 最终形成了当前这一新生代孑遗植物属的间断性分布格局(Song et al., 2020, 2021)。早期研究多依赖少数叶绿体片段(如*trnH-psbA*), 导致部分节点支持率较低(Song et al., 2020)。近期研究通过整合化石校准与转录组数据, 将枫杨属的起源时间推至始新世早期, 并揭示其现存东亚–地中海间断分布格局与渐新世气候变冷和青藏高原隆升相关(Yan et al., 2024)。近年来, 随着枫杨、湖北枫杨、甘肃枫杨、华西枫杨、云南枫杨、越南枫杨以及高加索枫杨的叶绿体基因组相继发表(Mu et al., 2020; Yan et al., 2021; Zhou et al., 2021), 该属的系统发育研究取得了新进展。然而枫杨属是一类典型的风媒异花授粉植物(Lu et al., 2024), 这意味着单独使用叶绿体基因组构建的系统发育树可能无法准确揭示其演化历史与分布格局的成因。

本研究基于高通量测序技术, 对采自不同种群的水胡桃、甘肃枫杨、华西枫杨和云南枫杨的多个个体进行了叶绿体全基因组测序, 旨在通过获取枫杨属代表性物种的完整叶绿体基因组, 达成以下两个目的: 首先, 在方法学层面, 系统评估叶绿体基因组数据在枫杨属物种水平上的系统发育分辨率及其应用局限; 其次, 在进化生物学层面, 基于所获数据深入探讨可能造成其谱系历史复杂性的关键进化机制。具体而言, 本研究将依次解决以下3个关键科学问题: (1)解析枫杨属叶绿体基因组的结构与序列变异特征; (2)揭示基于叶绿体基因组的枫杨属系统发育拓扑结构, 并评估其与现有分类框架和核基因系统发育的异同; (3)探讨上述发现对理解枫杨属物种分化模式与演化历史复杂性的启示。

1 材料与方法

1.1 植物样品采集、DNA提取与测序

分别从野外自然分布区域内采集水胡桃、甘肃枫杨、华西枫杨和云南枫杨的个体标本与叶片材料(表1)。在每个个体样本上采集完整的新鲜成熟叶片, 用硅胶迅速干燥后带回实验室储存备用, 凭证标本存放于上海辰山植物园标本馆(CSH)。

利用改良的CTAB法(Doyle & Doyle, 1987)提取植物叶片的总DNA, 检测合格后进行机械打断和纯化处理。将纯化后的DNA片段进行末端修饰、接头连接、连接产物片段分选纯化和PCR扩增。然后, 利用全基因组鸟枪法(Pachter et al., 1999)构建平均长度为350 bp的DNA文库。最终, 在武汉贝纳科技有限公司使用Illumina NovaSeq6000 (Illumina, San Diego)平台进行定量DNA的双端测序, reads长度为150 bp, 样本数据量为5 GB。

1.2 叶绿体基因组组装、注释与获取

高通量测序得到的原始图像数据文件经碱基识别(base calling)分析(Ewing & Green, 1998)转化为原始数据(raw data), 使用过滤软件SOAPnuke Toolkit v.1.3.0进行低质量数据过滤以获得有效数据(clean data) (Chen et al., 2018)。基于有效数据, 使用GetOrganelle v.1.7.6.1软件进行叶绿体基因组组装(Jin et al., 2020)。使用美国国家生物技术信息中心(National Center for Biotechnology Information, NCBI)的BLAST+ v.2.13.0在线软件(https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi)比对组装序列, 获得相似度最高的基因组序列。以此为参考基因组, 利用专门针对叶绿体基因组的在线注释软件CPGAVAS2 (http://47.96.249.172:16019/analyzer/annotate)进行叶

表1 枫杨属植物材料野外采样的基本信息
Table 1 Basic information on field sampling of plant materials of *Pterocarya*

物种 Species	采集地 Location	缩写 Abbreviation	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)	标本号 Specimen no.	登录号 GenBank no.	来源 Source
水胡桃 *P. rhoifolia*	Niigata University Forest, Sado City, Niigata, Japan	PR_NS	38.23° N	138.40° E	370	NUF3	PV130126	自测 This study
甘肃枫杨 *P. macroptera* var. *macroptera*	甘肃省天水市党川乡 Dangchuan Township, Tianshui City, Gansu Province, China	PMM_TS	34.27° N	106.06° E	1,503	DM15793-2	PV130121	自测 This study
甘肃枫杨 *P. macroptera* var. *macroptera*	四川省冕宁县森荣乡 Senrong Township, Mianning County, Sichuan Province, China	PMM_MN	28.35° N	101.98° E	2,620	DM17327	PV130122	自测 This study
甘肃枫杨 *P. macroptera* var. *macroptera*	四川省峨眉山景区 Emei Mountain Scenic Area, Sichuan Province, China	PMM_EM	29.54° N	103.34° E	2,055	LXC00013	PV130125	自测 This study
华西枫杨 *P. macroptera* var. *insignis*	浙江省西天目山 West Tianmu Mountain, Zhejiang Province, China	PMI_TM	28.35° N	118.87° E	950	SYG00006-3	PV130127	自测 This study
云南枫杨 *P. macroptera* var. *delavayi*	云南省迪庆藏族自治州维西傈僳族自治县 Weixi Lisu Autonomous County, Diqing Tibetan Autonomous Prefecture, Yunnan Province, China	PMD_DQ	27.76° N	99.02° E	2,240	DM21298	PV130123	自测 This study
云南枫杨 *P. macroptera* var. *delavayi*	云南省怒江傈僳族自治州贡山独龙族怒族自治县 Gongshan Derung and Nu Autonomous County, Nujiang Lisu Autonomous Prefecture, Yunnan Province, China	PMD_NJ	28.07° N	98.74° E	2,899	DM21322	PV130124	自测 This study

表格中的“缩写”由物种和地名缩写组成, 例如, PR_NS中的“PR”代表物种, “NS”代表地名。
Abbreviations in the table consist of species and place name. For example, in PR_NS, ‘PR’ represents the species and ‘NS’ represents a place name.

绿体基因注释(Shi et al., 2019)。随后, 使用OrganellarGenomeDRAW (OGDRAW) v1.3.1 (https://chlorobox.mpimp-golm.mpg.de/OGDraw.html)绘制叶绿体基因组谱图(Lohse et al., 2013)。组装注释好的7个叶绿体基因组序列信息已上传至NCBI数据库, GenBank登录号为PV130121–PV130127。

1.3 重复序列与SSRs分析

从在线软件MIcroSAtellite (MISA, https://webblast.ipk-gatersleben.de/misa/) (Beier et al., 2017)下载其本地运行脚本, 并在适当修改后对17个叶绿体基因组中的简单重复序列(simple sequence repeats, SSRs)进行批量分析。MISA配置文件中的参数设置为: 单核苷酸重复不少于10次, 二核苷酸不少于5次, 三核苷酸不少于4次, 四、五和六核苷酸重复均不少于3次(即1-10、2-5、3-4、4-3、5-3和6-3) (Zhao et al., 2019)。

利用在线工具Tandem Repeats Finder (TRF, https://tandem.bu.edu/trf/trf.html) (Benson, 1999)检测17个枫杨属叶绿体基因组中长度不少于10 bp的串联重复序列(tandem repeat sequences)。Match、Mismatch和Indel 3个对齐参数分别设置为2、7、7, 最低对齐分数和最大周期分别设置为80和500。

利用Vmatch v2.3.1软件(http://www.vmatch.de/)预测叶绿体基因组的散在重复序列(dispersed repeat sequences), 包括正向重复序列(direct repeat sequences, D)和回文重复序列(palindromic repeat sequences, P) (Kurtz, 2003)。在分析过程中, 最小重复长度阈值设定为30 bp (-l 30), 允许的最大汉明距离为3 (-h 3) (Liang et al., 2019)。此外, 保留每个重复序列的最佳匹配结果(-best 50), 并输出其在基因组中的绝对位置信息(-absolute), 以便后续统计与可视化分析。

1.4 叶绿体基因组结构比较与序列差异分析

从NCBI数据库下载10个已发表的枫杨属物种个体的叶绿体基因组序列, 包括枫杨(MN262640.1)、湖北枫杨(MH188293.1)、高加索枫杨(MH188291.1)和越南枫杨(MH188288.1) 4个物种(附录1)。结合本研究测序并组装的4个物种(水胡

桃、甘肃枫杨、华西枫杨和云南枫杨), 共8个分类群, 对整个枫杨属进行比较基因组学分析, 探讨其物种间叶绿体基因组的变异关系。

使用在线工具IRscope (https://irscope.shinyapps.io/irapp/) (Amiryousefi et al., 2018)可视化叶绿体基因组连接位点边界上的基因, 分析4个边界区域IRa (反向重复区a, inverted repeat a)/LSC (大单拷贝区, large single copy) (JLA)、LSC/IRb (反向重复区b, inverted repeat b) (JLB)、IRb/SSC (小单拷贝区, small single copy) (JSB)和SSC/IRa (JSA)的基因分布, 观察IR的扩张与收缩情况, 比较叶绿体基因组结构的差异性。

利用比较基因组学工具mVISTA (https://genome.lbl.gov/vista/mvista/submit.shtml) (Frazer et al., 2004), 以枫杨的叶绿体基因组为参考序列, 采用Shuffle-LAGAN模型进行对齐, 与其余几个物种的叶绿体全基因组序列进行可视化比对分析, 评估各基因组序列之间的整体相似性和差异性。

通过MAFFT v7.487软件(Katoh & Standley, 2013)对所有物种的叶绿体全基因组序列进行多序列比对, 然后使用DnaSP v.6.12.03软件(Rozas et al., 2017)计算其单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)和插入/删除(insertion/deletion, indel)位点。再进一步进行滑动窗口分析(窗口长度为800 bp, 步长为200 bp), 计算叶绿体基因组之间的核苷酸多样性(nucleotide diversity, Pi), 综合研究物种之间的高变异热点区域(Gou et al., 2020)。

1.5 系统发育分析

为探究枫杨属植物的系统亲缘关系, 本研究整合了所有已公布的枫杨属叶绿体基因组(附录1)及新测序数据。基于4类数据集——全基因组、蛋白质编码序列(coding sequence, CDS)、高变区及滑动窗口分析数据——采用最大似然法(maximum likelihood method, ML)构建系统发育树。使用马尾树(*Rhoiptelea chiliantha*)和杨梅(*Morella rubra*)作为外类群为该系统发育树定根。CDS数据集通过自定义Python脚本(基于Biopython库)构建, 该脚本从GenBank格式文件中提取所有CDS特征的核苷酸序列并记录基因名称, 确保数据提取的标准化。利用IQtree v.2.1.3软件构建系统发育树, 碱基替换模型选择K3Pu + F + I + G4, bootstrap抽样重复1,000次(Nguyen et al., 2015)。最后用FigTree v.1.4.3软件对系统发育树进行可视化绘图。

2 结果

2.1 枫杨属叶绿体基因组基本特征

对高通量测序得到的序列进行低质量数据过滤后获得有效数据, 然后对每个叶绿体基因组进行组装注释, 获得水胡桃(PR_NS)、甘肃枫杨(PMM_TS、PMM_MN、PMM_EM)、华西枫杨(PMI_TM)和云南枫杨(PMD_DQ、PMD_NJ) 7个个体的叶绿体全基因组。与典型被子植物叶绿体基因组相似, 这7个个体的叶绿体基因组均为闭合环状的四分体结构, 由1个LSC、1个SSC和2个IR (IRa和IRb)构成(图1)。枫杨属这7个个体的叶绿体基因组高度保守, 总长度相差较小, 介于160,176 bp (PMD_DQ)到160,318 bp (PMM_EM)之间, 仅相差142 bp。其中LSC长度在89,701–89,810 bp之间; SSC长度在18,412–18,459 bp之间; IR长度在26,014–26,031 bp之间(表2)。除PMM_EM叶绿体基因组的GC含量为36.10%外, 其他个体的叶绿体基因组GC含量均为36.20%。其IR的GC含量在42.54%–42.57%之间, 均显著高于LSC (最高为33.79%)和SSC (最高为29.89%) (表2)。

本研究中, 这7个个体的叶绿体基因组注释到的基因总数均为131个, 包括86个蛋白质编码基因(protein-coding genes, PCGs)、37个转运RNA基因(tRNAs)和8个核糖体RNA基因(rRNAs) (图1, 附录2)。其中有20个基因存在两个拷贝, 包括8个蛋白质编码基因(*rps*7、*rps*8、*rps*12、*ndhB*、*rpl*2、*rpl*23、*ycf*1和*ycf*2)、8个tRNA基因(*trnA-UGC*、*trnI-CAU*、*trnI-GAU*、*trnL-CAA*、*trnN-GUU*、*trnR-ACG*、*trnS-GCU*和*trnV-GAC*)和4个rRNA基因(*rrn*4.5*S*、*rrn*5*S*、*rrn*16*S*和*rrn*23*S*) (附录2)。此外, 有17个基因含有内含子, 其中14个只含有1个内含子, 包括8个蛋白质编码基因(*rps*16、*rpl*2、*rpl*16、*atpF*、*petB*、*petD*、*ndhA*和*ndhB*)和6个tRNA基因(*trnA-UGC*、*trnG-GCC*、*trnI-GAU*、*trnK-UUU*、*trnL-UAA*和*trnV-UAC*); 而其余3个含有2个内含子(*rps*12、*clpP*和*ycf*3)。

2.2 重复序列

利用MISA软件在这17个叶绿体基因组中检测

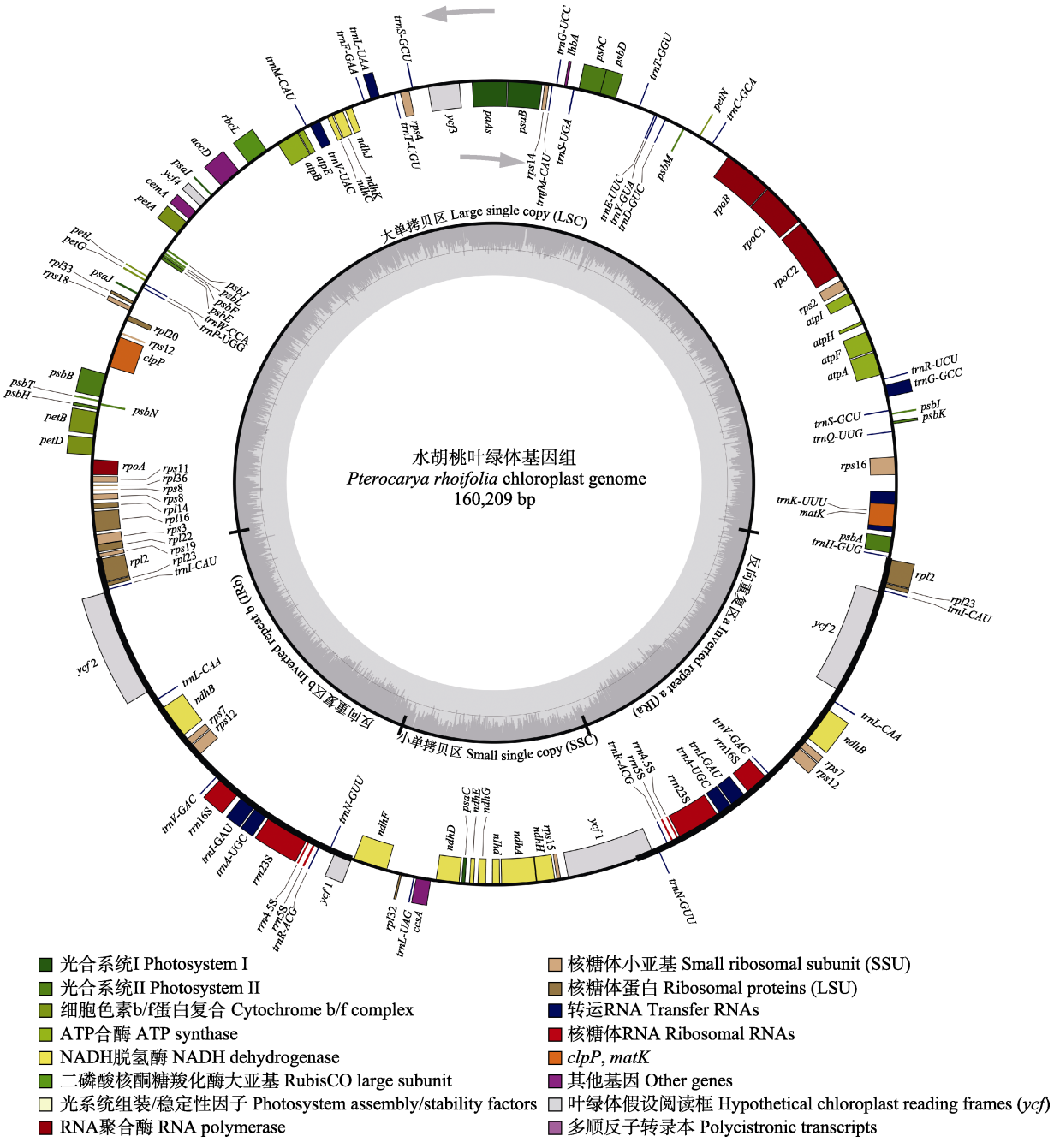


图1　以水胡桃为例展示枫杨属植物叶绿体基因组的基因组图谱(其他6个个体的叶绿体基因组图谱相似)。外圈显示质体上的基因结构。圆圈外的基因是逆时针转录，而圆圈内的基因是顺时针转录。基因功能分类由不同颜色区分。

Fig. 1　Genomic map of the *Pterocarya rhoifolia* chloroplast genome (the chloroplast genome maps of other six individuals are similar). The outer circle shows the gene structure on the plastome. Genes outside the circle are transcribed counterclockwise, while genes inside the circle are transcribed clockwise. Genes are color-coded according to their functional categories.

到87–96个SSRs位点，其中枫杨和华西枫杨的SSRs位点数最多(均为96个)，而湖北枫杨的SSRs位点数最少(87个)。在所有的SSRs位点中，均包括单核苷酸(数量最多)、二核苷酸、三核苷酸、四核苷酸类型，而五核苷酸和六核苷酸类型仅在个别物种中出现(图2A)。SSRs绝大部分由腺嘌呤(A)和胸腺嘧啶(T)两种碱基构成，具有较强的A/T碱基偏向性。SSRs位点主要分布于LSC（占总数的

表2　本研究新测序的7个个体的叶绿体基因组特征比较

Table 2　Comparison of chloroplast genomic characteristics of seven newly sequenced individuals in this study

基因组特征 Genome characteristics	水胡桃 PR_NS	甘肃枫杨 PMM_TS	甘肃枫杨 PMM_MN	甘肃枫杨 PMM_EM	华西枫杨 PMI_TM	云南枫杨 PMD_DQ	云南枫杨 PMD_NJ
序列全长 Genome size (bp)	160,209	160,210	160,238	160,318	160,236	160,176	160,232
大单拷贝区长度 Large single copy (LSC) length (bp)	89,708	89,731	89,770	89,810	89,768	89,701	89,757
小单拷贝区长度 Small single copy (SSC) length (bp)	18,459	18,451	18,412	18,446	18,412	18,443	18,443
反向重复区长度 Inverted repeat (IR) length (bp)	26,021	26,014	26,028	26,031	26,028	26,016	26,016
GC含量 GC content (%)	36.20	36.20	36.20	36.10	36.20	36.20	36.20
大单拷贝区GC含量 GC content of LSC (%)	33.77	33.77	33.78	33.72	33.72	33.77	33.79
小单拷贝区GC含量 GC content of SSC (%)	29.86	29.86	29.86	29.85	29.85	29.89	29.87
反向重复区GC含量 GC content of IR (%)	42.57	42.57	42.56	42.57	42.57	42.54	42.55
A碱基占比 A base content (%)	31.60	31.50	31.60	31.60	31.60	31.50	31.60
T碱基占比 T base content (%)	32.30	32.30	32.30	32.30	32.30	32.30	32.30
C碱基占比 C base content (%)	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
G碱基占比 G base content (%)	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80
基因总数 No. of total genes	131	131	131	131	131	131	131
蛋白质编码基因数 No. of protein coding genes	86	86	86	86	86	86	86
tRNA基因数 No. of tRNA genes	37	37	37	37	37	37	37
rRNA基因数 No. of rRNA genes	8	8	8	8	8	8	8

物种缩写含义见表1。The abbreviations of species see Table 1.

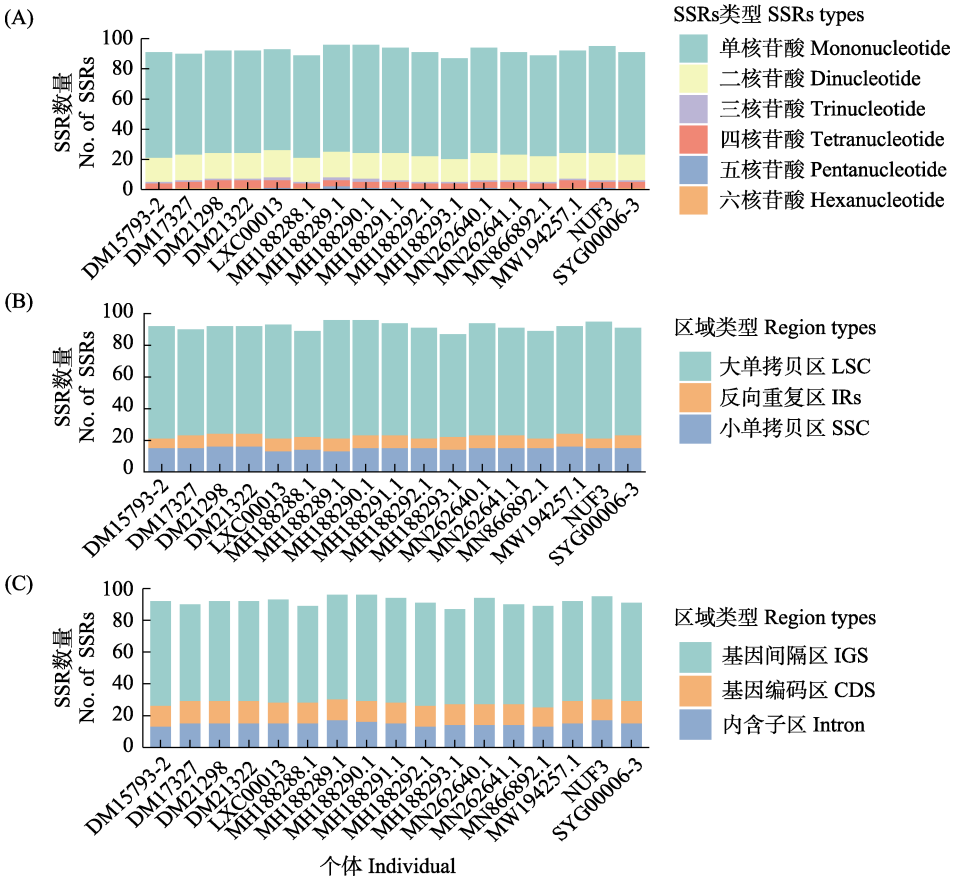


图2　17个个体的叶绿体基因组简单重复序列(SSRs)分析。(A)不同SSRs类型的数量; (B)大单拷贝区(LSC)、反向重复区(IRs)和小单拷贝区(SSC)的SSRs数量; (C)基因间隔区(IGS)、基因编码区(CDS)及内含子区的SSRs数量。

Fig. 2　Simple sequence repeat (SSRs) analysis of the chloroplast genomes of 17 individuals. (A) Number of SSRs in different types; (B) Number of SSRs in the large single copy (LSC), inverted repeats (IRs) and small single copy (SSC); (C) Number of SSRs in the intergenic spacer (IGS), coding sequence (CDS) and intron regions.

76%), 其次为SSC (占16%), IR最少(占8%) (图2B)。另外, SSRs位点大部分分布于叶绿体基因组的非编码区上, 且基因间隔区(intergenic spacer, IGS)分布最多(占70%), 其次为内含子(占16%), 而在基因编码区分布最少(占14%) (图2C)。

通过Tandem Repeats Finder软件鉴定的串联重复序列在6–13个(图3A), 长度在5–47 bp之间, 主要集中在20–30 bp (图3B)。17个个体的叶绿体基因组的串联重复序列绝大多数都分布于基因间隔区, 占总数的70%以上, 而其余串联重复序列都分布在*ycf*2基因区中。

利用Vmatch v2.3.1软件鉴定出的散在重复序列在32–47个, 其中回文重复数量最多(17–27个), 正向重复其次(13–20个) (图3A)。散在重复序列长度在30–54 bp之间, 且主要分布于30–45 bp (图3C)。

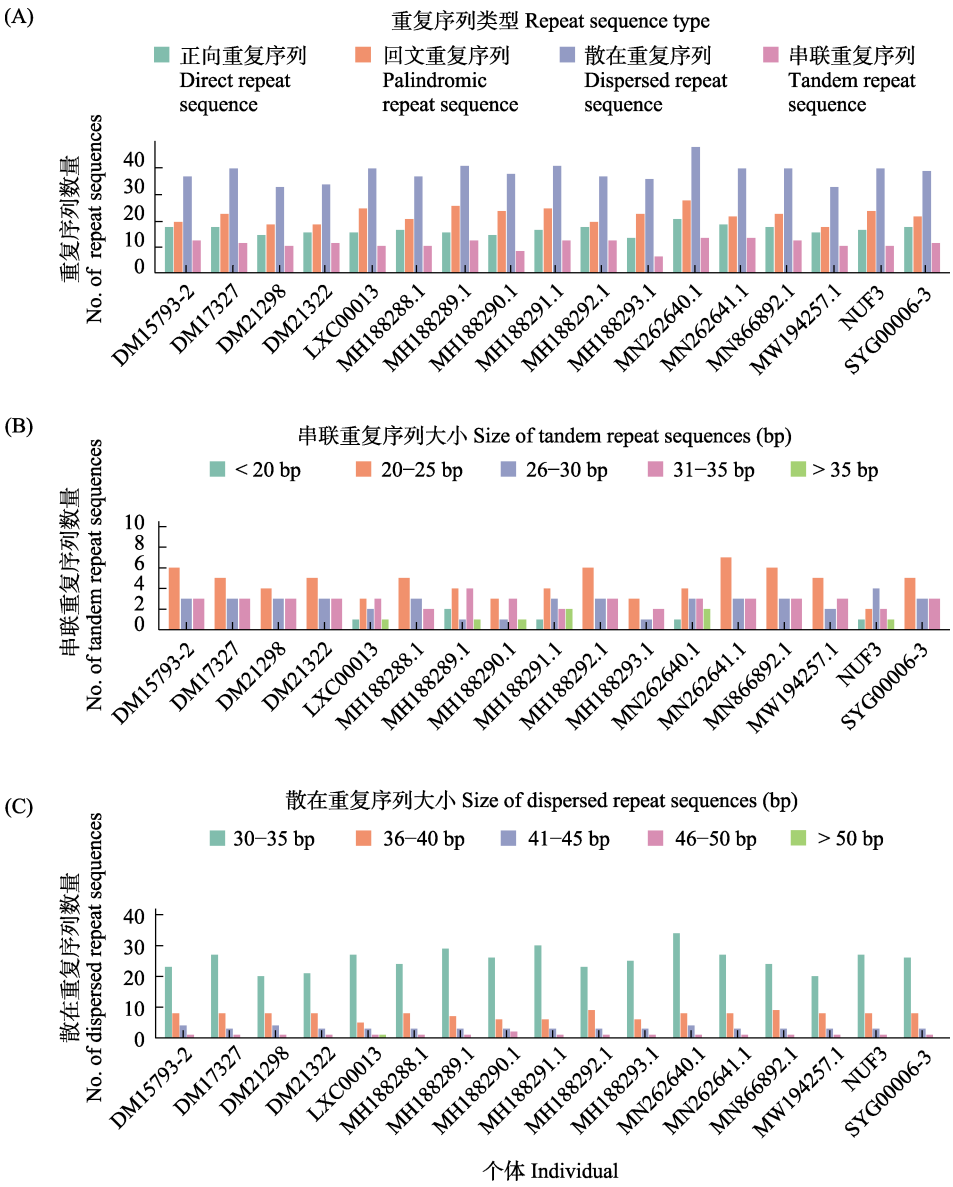


图3　17个个体的叶绿体基因组重复序列分析(包括串联重复和散在重复)。(A)不同重复序列类型的分布数量; (B)不同长度分布范围内串联重复序列的数量; (C)不同长度分布范围内散在重复序列的数量。

Fig. 3　Analysis of repeat sequences in the chloroplast genomes of 17 individuals, including tandem and dispersed repeats. (A) Distribution and counts of different repeat sequence types; (B) Counts of tandem repeats across different length ranges; (C) Counts of dispersed repeats across different length ranges.

2.3 枫杨属叶绿体基因组的结构比较与序列差异

2.3.1 IR的扩张与收缩

使用在线软件IRscope比较枫杨属8个分类群的叶绿体基因组IR的扩张与收缩情况(图4)。在8个分类群的叶绿体基因组中, 分布于各边界附近的基因基本一致, 但距边界的距离存在差异。其中*rps*19基因位于JLB附近, 在水胡桃、甘肃枫杨、华西枫杨和云南枫杨中距边界均收缩1 bp, 在枫杨中收缩7 bp, 而在高加索枫杨、湖北枫杨和越南枫杨中距边界扩张了3 bp。*trnH*基因在JLA附近, 除甘肃枫杨距边界的距离为47 bp以外, 其余物种均为41 bp。*ndhF*基因在枫杨、高加索枫杨和越南枫杨的JSB附近被检测到; 而湖北枫杨、云南枫杨、华西枫杨、甘肃枫杨及水胡桃未在JSB附近检测到*ndhF*基因。值得注意的是, 在越南枫杨中, *ndhF*基因跨越了IRb和SSC两个区域。高等植物叶绿体基因组中的重复基因*ycf*1横跨SSC和IRa、IRb (图1)。在枫杨属中, *ycf*1基因位于IRa和IRb的重复序列长度在1,137–1,443 bp之间, 但在JSB附近的*ycf*1基因剩余3–27 bp, 而在JSA附近的*ycf*1基因剩余4,206–4,512 bp。

2.3.2 叶绿体基因组序列差异可视化

选取枫杨的叶绿体基因组作为参考序列, 利用mVISTA对枫杨属8个分类群的叶绿体全基因组序列进行可视化比较分析(图5)。结果表明, 枫杨属植物的叶绿体基因组拥有高度的序列相似性, 具有高度保守性。非编码区相比于编码区具有更高的分化变异水平; 单拷贝区的分化变异水平显著高于反向重复区。4个rRNA基因最为保守, 几乎没有发生变异。编码区中*ndhF*基因发生了较大变异, 而非编码区变异较大的主要有*ndhC–trnV-UAC*和*petA–psbJ*等基因间隔区。这些区域具有高度可变性, 为枫杨属的遗传进化分析提供了有用的数据信息。

2.3.3 叶绿体基因组高变区

利用软件DnaSP计算枫杨属8个分类群叶绿体基因组序列之间的核苷酸多态性并进行统计分析

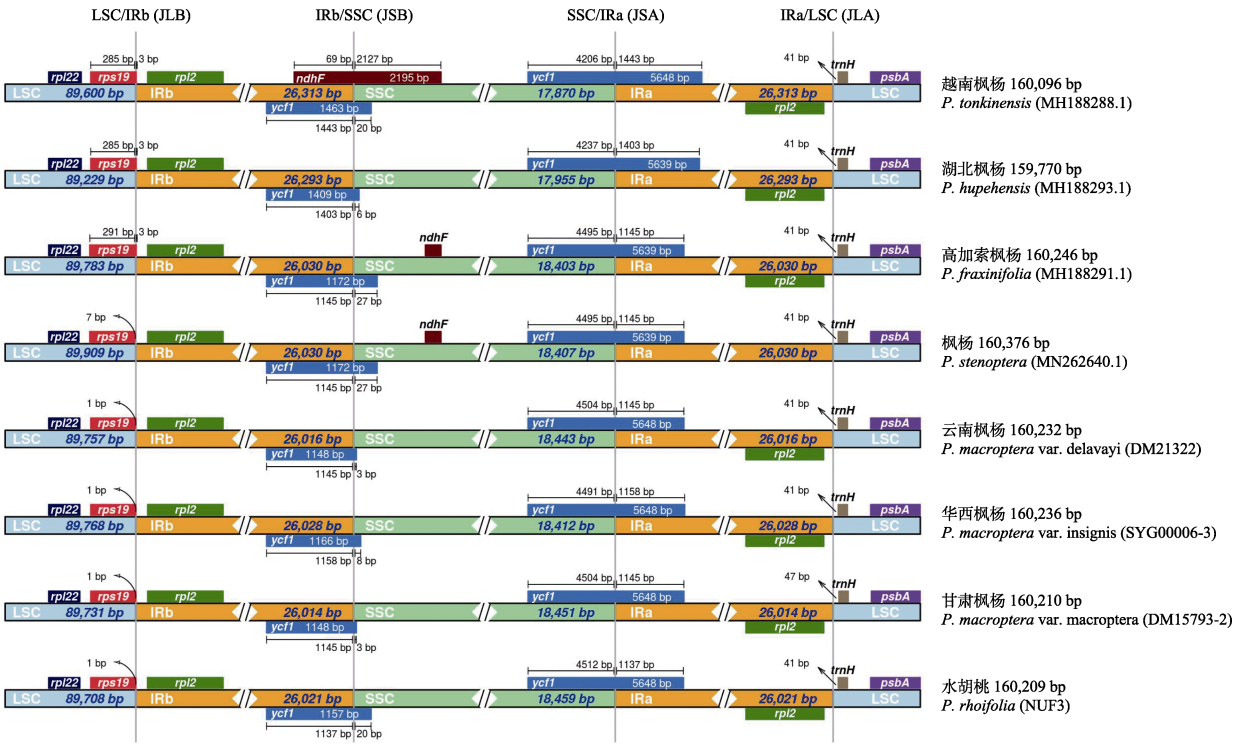


图4 枫杨属叶绿体基因组反向重复区(IR)边界的扩张与收缩分析: IRa/LSC (JLA)、LSC/IRb (JLB)、IRb/SSC (JSB)和SSC/IRa (JSA)。LSC: 大单拷贝区; SSC: 小单拷贝区; IRa: 反向重复区a; IRb: 反向重复区b。

Fig. 4 Analysis of the contraction and expansion of the inverted repeat (IR) region boundaries in the chloroplast genomes of *Pterocarya* species: IRa/LSC (JLA), LSC/IRb (JLB), IRb/SSC (JSB), SSC/IRa (JSA). LSC, Large single copy; SSC, Small single copy; IRa, Inverted repeat a; IRb, Inverted repeat b.

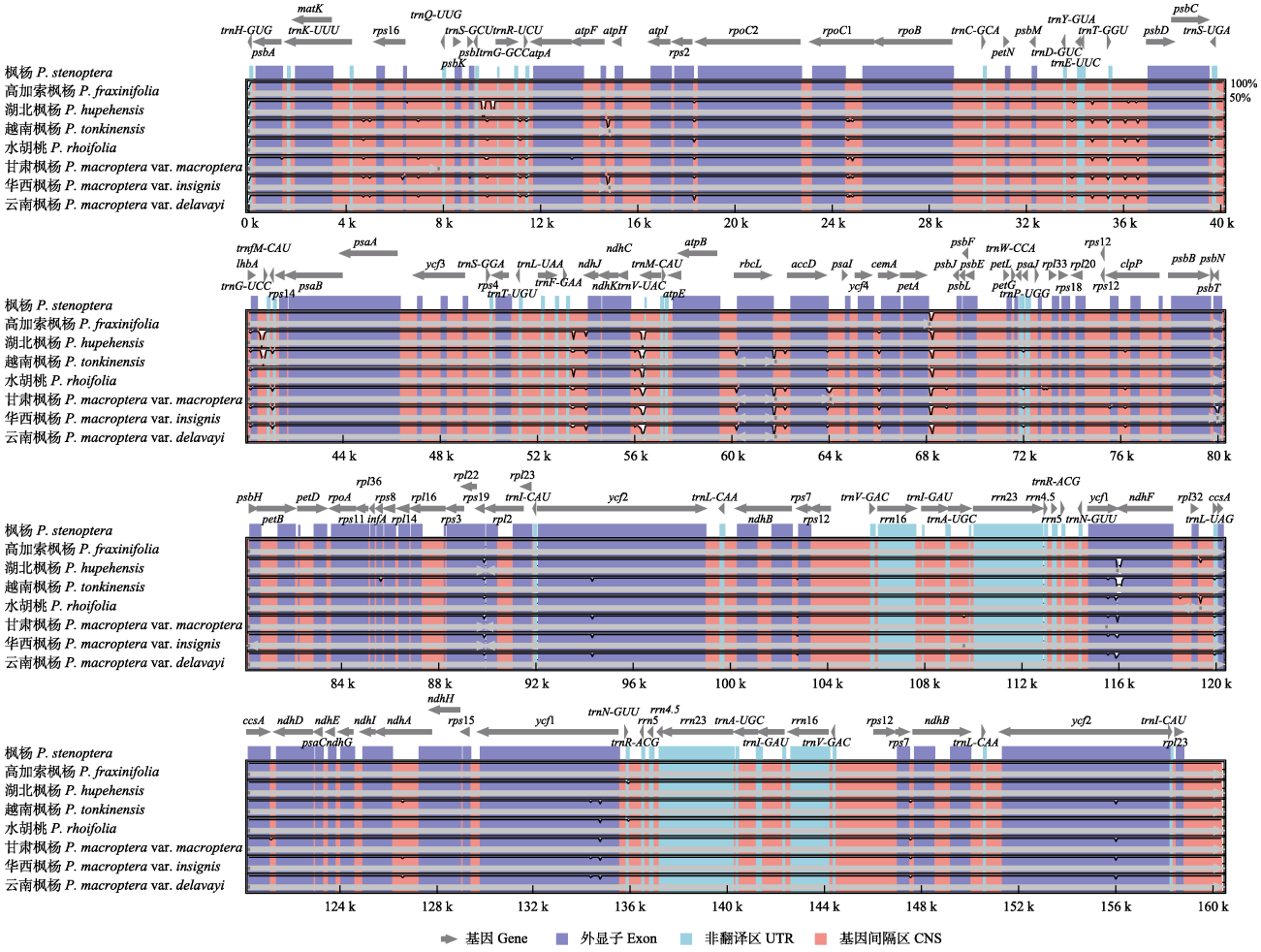


图5　以枫杨(*Pterocarya stenoptera*)为参考序列的枫杨属(*Pterocarya*) 8个分类群的叶绿体基因组序列差异可视化比对。上面的灰色箭头显示了参考序列基因的位置，方向为正向或反向。对齐相似度百分比显示在图的右侧(垂直轴)。

Fig. 5　Visualization of the eight chloroplast genomes of *Pterocarya* with *Pterocarya stenoptera* as a reference using mVISTA. The gray arrows above show the position of the reference sequence genes, in either the forward or reverse direction. Alignment similarity percentages are shown on the right side of the figure (vertical axis).

发现，全基因组序列中共检测到467个变异多态性位点(variable polymorphic sites)，包括202个单核苷酸多态性位点和265个简约信息位点(parsimony informative sites)，还检测到120个indels事件。基因组IR的核苷酸多态性显著低于LSC和SSC。对叶绿体基因组序列进一步进行滑动窗口分析，发现枫杨属叶绿体基因组核苷酸多样性值(Pi值)为0–0.04196，平均值为0.00120。通过将基因的分布位置与滑动窗口分析的结果进行匹配，筛选出一个具有较大Pi值的蛋白质编码基因，为位于SSC区域的*ndhF*基因(Pi > 0.01) (图6，附录3)。

2.4　叶绿体基因组系统发育分析

基于枫杨属17个个体的叶绿体全基因组、CDS、高变区(*ndhF*)及10 kb滑动窗口的系统发育分析表明，各分支节点均具有较高的分辨率(图7，附录4)。这些系统发育树主要呈现4种拓扑结构: (1)叶绿体全基因组、CDS及14个滑动窗口(Window_2–4、6–12、14–17)的分析结果将全部个体划分为两个明显支系; (2)高变区(*ndhF*)和Window_13的分析结果呈现3个支系; (3)滑动窗口Window_5的分析结果显示出4个支系; (4)滑动窗口Window_1的分析结果则形成5个支系。在系统发育关系中，云南枫杨的3个个体在多数分析中(除CDS、*ndhF*及Window_2、3、6、8、11、14、16外)能稳定聚为一个单系群。相比之下，采自不同种群的3个枫杨、3个甘肃枫杨和4个华西枫杨个体都没有形成一个单系，同一物种的

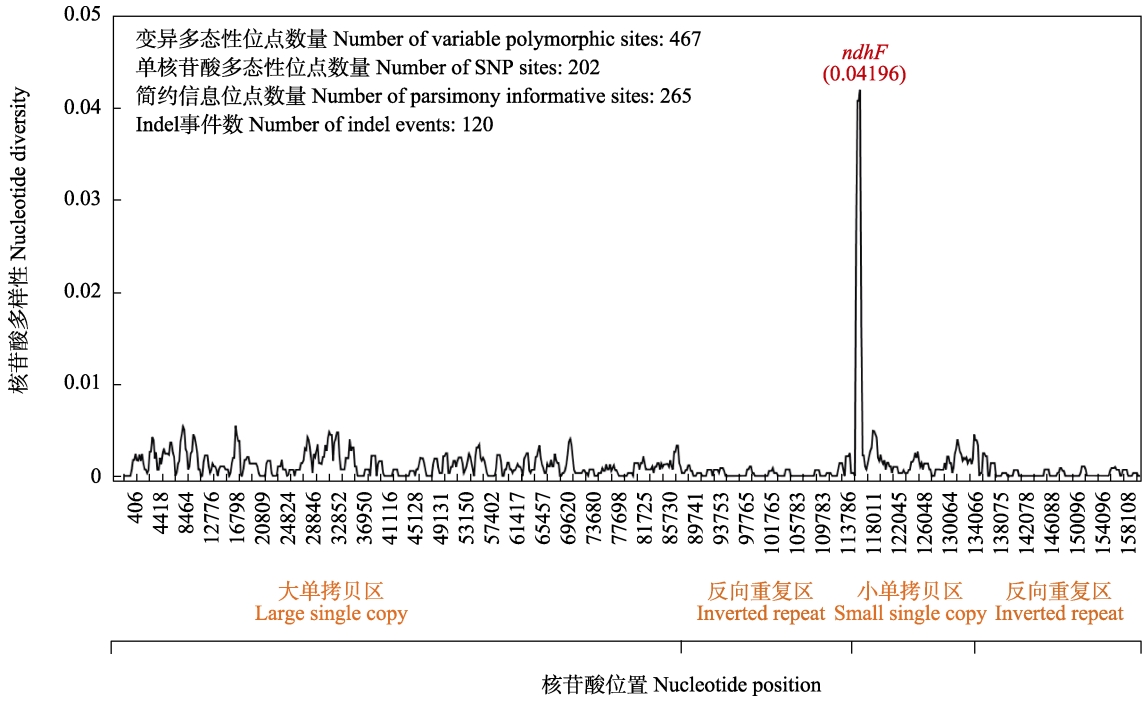


图6　枫杨属叶绿体基因组的滑动窗口分析。X轴表示核苷酸位置, Y轴表示每个窗口的核苷酸多样性(Pi)值。SNP: 单核苷酸多态性。

Fig. 6　Sliding window analysis of chloroplast genome of *Pterocarya*. The X-axis represents the nucleotide positions and the Y-axis represents the value of nucleotide diversity (Pi) per window. SNP, Single nucleotide polymorphism.

不同个体分散在不同的支系中。对于仅有1个个体的物种, 湖北枫杨和水胡桃在大多数分析中位于上部支系(除Window_5中水胡桃单独成支, 以及滑动窗口Window_3和Window_17中位于下部支系外), 而越南枫杨则稳定地位于下部支系。

3　讨论

3.1　枫杨属及胡桃科的叶绿体基因组结构变异

本研究对枫杨属的叶绿体基因组进行了测序、注释及比较分析。结果显示, 枫杨属的叶绿体基因组与大多数陆生植物的叶绿体基因组一样, 呈现出高度的保守性, 这体现在其大小、四分体结构以及GC含量的稳定性上(Ruhlman & Jansen, 2021)。枫杨属在基因总数和独特基因数上与胡桃科其他属存在细微差异(Mo et al., 2020; Luo et al., 2022)。综合多篇文献的注释结果, 枫杨属表现出以下可能特征: 与近缘属相比, 其多次被注释出含有一个额外的*rps*8基因(Hu et al., 2017b; Geng et al., 2019; Luo et al., 2022), 而缺失*infA*和*ycf*15基因(Yan et al., 2017; Huang et al., 2024; 李廷章等, 2024)。在tRNA基因方面, 枫杨属均被注释为缺少*trnS-GGA*但拥有*trnG-UCC*, 此模式与化香树属(*Platycarya*)、山核桃属(*Carya*)及胡桃属(*Juglans*)的注释结果相异(Hu et al., 2017a; Yan et al., 2017; Mo et al., 2020)。这些基于已有注释的发现为枫杨属的独特性提供了线索, 但其最终确认需依赖未来更一致的数据分析方法。

根据多种叶绿体基因组分析结果, 重复序列在诱导插入和替换过程中扮演着不可或缺的角色(Yan et al., 2019)。这些序列不仅在叶绿体基因组序列的重排与稳定性维护中发挥着关键作用, 而且还能够影响相似物种乃至不同物种间拷贝数的差异(Wang et al., 2020)。在对枫杨的研究中, 我们观察到正向重复序列与回文重复序列的含量较为丰富, 这一发现与山核桃(*Carya cathayensis*)中的研究结果相吻合(Shen et al., 2022)。此外, 枫杨的SSRs中, 所有重复单元的A和T碱基含量显著较高, 这表明枫杨对AT碱基组合具有强烈的偏好性, 这与其他物种叶绿体基因组的研究结果相一致(Lee et al., 2025; Zhang et al., 2025)。这些质体SSRs有望成为枫杨属的候选分子标记, 对于推动群体遗传学和进化研究具有重要意义。

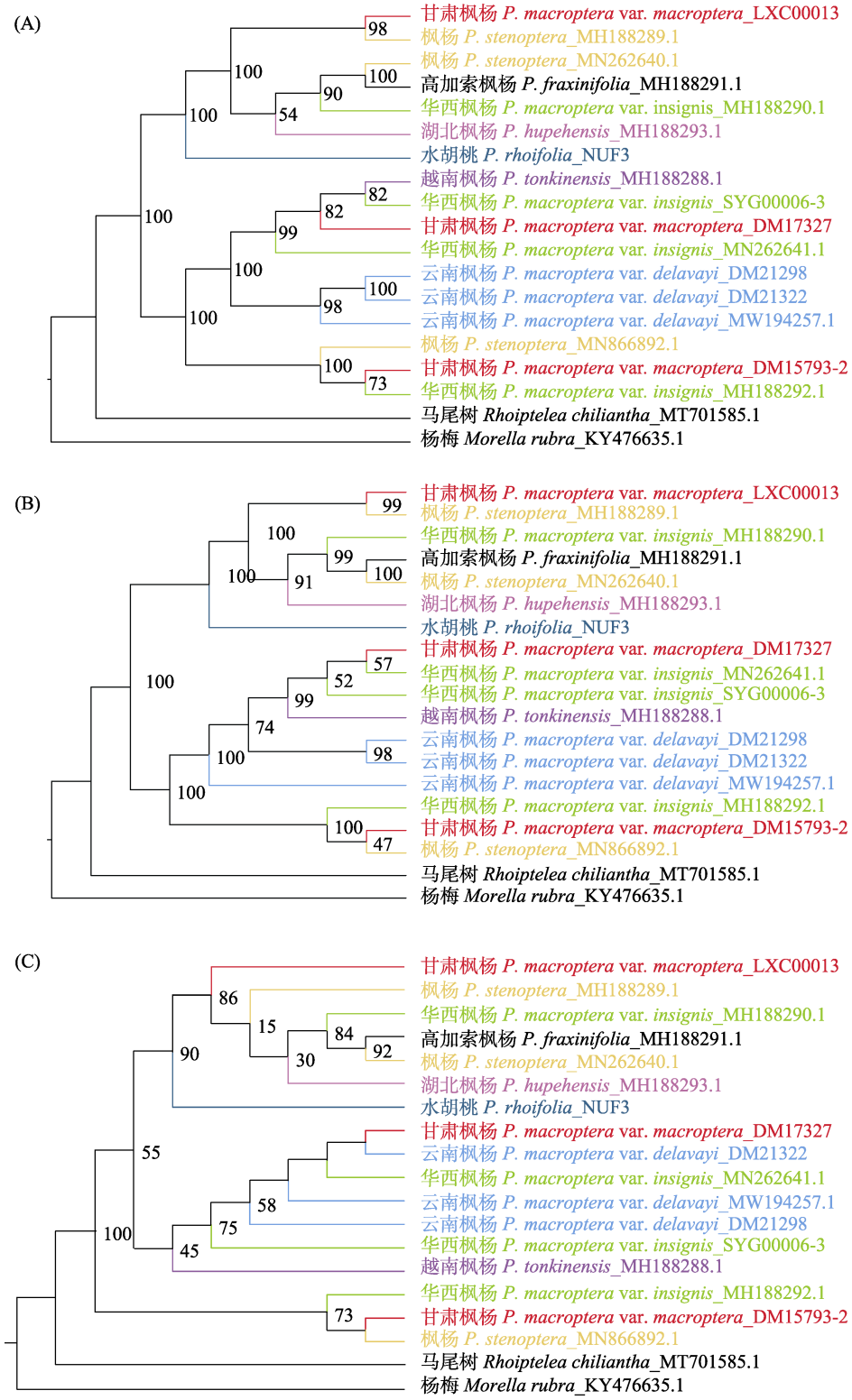


图7　基于不同数据集构建的枫杨属最大似然法系统发育树。(A)基于17个枫杨属个体的叶绿体全基因组序列; (B)基于17个枫杨属个体的蛋白质编码序列(CDS); (C)基于17个枫杨属个体的高变区*ndhF*序列。自展支持率(BS)值标记于进化树的分支。

Fig. 7　Maximum likelihood phylogenetic trees of *Pterocarya* based on different datasets. (A) Based on the complete chloroplast genomes of 17 individuals of *Pterocarya*; (B) Based on the coding sequences (CDS) of 17 individuals of *Pterocarya*; (C) Based on the highly variable *ndhF* region sequences of 17 individuals of *Pterocarya*. The bootstrap support values (BS) are labeled at branches in the evolutionary tree.

3.2 枫杨属的叶绿体比较基因组学

叶绿体序列之间的边界位置是叶绿体基因组进化研究的关键组成部分, 其中IR边界的收缩与扩张被视为被子植物叶绿体基因组变异的主要驱动力(Hansen et al., 2007; Huang et al., 2014)。尽管枫杨属的叶绿体基因组结构和基因排列顺序高度保守, 但在IRb/SSC (JSB)区域却观察到了一定的差异性。具体而言, 在越南枫杨、高加索枫杨和枫杨中检测到*ndhF*基因的存在, 而在其他枫杨种类中未检测到该基因。这一发现与胡桃科其他属不一致, 因为在已发表的研究中, 青钱柳属(*Cyclocarya*)、山核桃属、化香树属的JSB区域均能检测到*ndhF*基因的存在(李廷章等, 2024)。

利用mVISTA和DnaSP v6.12.03软件进行分析发现, 枫杨属叶绿体基因组中的LSC和SSC序列多样性显著高于IR, 这符合叶绿体基因组的普遍规律(Han et al., 2016; He et al., 2017)。序列比对进一步揭示了基因间隔区(如*ndhC–trnV-UAC*和*petA–psbJ*)以及编码区(如*ndhF*)存在显著变异。然而, 与通常观察到的多个高变区不同, 本研究中*ndhF*基因表现出尤为突出的高变异性(Pi > 0.01), 成为一个显著的变异热点。鉴于枫杨属为喜光植物, *ndhF*基因的主要功能与植物的光合作用有关(李景剑等, 2016), 因此我们推测*ndhF*基因可能是枫杨属在叶绿体水平进化适应过程中的重要遗传基础(陈淑瑾, 2015), 其在理论上具有成为DNA条形码的潜力, 然而本研究结果显示, 单独使用*ndhF*基因序列构建的系统发育树难以有效区分枫杨属的不同物种。这一结果符合植物分子系统学的普遍经验, 即多位点组合通常优于单基因标记(Fazekas et al., 2008; Jiang et al., 2022; Ma et al., 2024)。为此, 我们进一步将*ndhF*与本研究中筛选出的其他高变区(如*ndhC–trnV-UAC*、*petA–psbJ*)进行联合分析(附录5), 但其物种区分能力依然有限。令人深思的是, 即使我们采用完整的叶绿体基因组数据进行系统发育重建, 依然未能有效区分枫杨属的不同物种。这一系列结果共同指向一个结论: 对于枫杨属而言, 叶绿体基因组的整体进化速率可能不足以记录其近期物种分化的历史, 其序列变异未能积累出足够用于物种鉴定的系统发育信号。因此, 未来解析该属的系统发育关系, 可能需要转向核基因组标记, 以获取更高分辨率的进化信息。

3.3 叶绿体系统发育信号的复杂性及其对推断演化的启示

叶绿体基因组因其易于获取、处理便捷且蕴含丰富系统发育信息的特点, 在植物系统基因组学中得到广泛应用(如重建系统发育关系、推断网状进化及界定分类群系统位置等) (Dong et al., 2023)。然而, 受其自身遗传特性的限制, 叶绿体基因组在系统发育推断中能力有限, 有时甚至会导致结论偏差, 这一点在枫杨属系统发育研究中表现得尤为明显。近年来, 叶绿体基因组虽为探讨该属的核质冲突和生物地理学问题提供了关键证据(Yang et al., 2021, 2023; Zhou et al., 2021; Yan et al., 2024), 但本研究基于叶绿体全基因组及其分区序列的系统发育分析, 却揭示了其推断结果的高度复杂性: 全基因组与多数滑动窗口支持二分支结构, 而*ndhF*高变区与Window_13形成3分支, Window_5显示4分支, Window_1甚至解析出5分支。值得注意的是, 除云南枫杨在多数分析中保持单系性外, 其他物种如枫杨和甘肃枫杨的个体均分散在不同支系中。这一复杂的拓扑结构与基于核基因组的清晰结论形成了直接冲突(附录6) (Song et al., 2020)——后者将枫杨属清晰地划分为两个组: 水胡桃组(Section *Platyptera*), 包括水胡桃、甘肃枫杨和云南枫杨; 枫杨组(Section *Pterocarya*), 包括高加索枫杨、湖北枫杨和枫杨。显然, 本研究的叶绿体系统发育树未能完全支持现有的分类体系。

上述叶绿体系统发育拓扑结构的不一致性与核基因框架的冲突表明, 枫杨属的演化历史可能比现有分类体系所反映的更为复杂。在植物系统学中, 此类核质冲突常被归因于不完全谱系分选或由杂交导致的叶绿体捕获等进化机制(Rieseberg & Soltis, 1991; Degnan & Rosenberg, 2009; Li XP et al., 2025; Wu et al., 2025; Zhang et al., 2026)。枫杨属作为风媒异花授粉植物(Lu et al., 2024), 其花粉易于远距离传播, 为种间基因流提供了条件, 这从生物学特性上增加了上述机制发生的可能性。例如, 本研究中湖北枫杨与枫杨在叶绿体树中聚为一支而在核基因树中分离的模式, 就与壳斗科栎属(*Quercus*)等类群中因历史基因流导致的核质冲突案例相似(Hipp et al., 2020; Zhou et al., 2022)。

然而, 需要指出的是, 仅凭本研究的叶绿体数据可能无法区分这些潜在机制的具体贡献。这一系列复杂的信号恰恰说明, 依赖单一的、母系遗传的叶绿体基因组来推断枫杨属的物种分化历史存在固有风险。其系统发育树可能更多地反映了通过种子传播的母系谱系历史, 而无法捕捉由花粉流介导的或物种快速分化过程中产生的完整进化图景。因此, 本研究最重要的启示在于: 对于枫杨属这类可能存在复杂进化动态的类群, 基于叶绿体基因组的系统发育分析应被视为一个初步的、需要谨慎解读的视角, 而非定论。未来研究应整合核基因组数据(如SNPs或低拷贝基因)以提高系统发育分辨率(Hollingsworth et al., 2016), 并结合溯祖模型(Pei et al., 2020)来准确解析不完全谱系分选、基因流等过程的相对作用, 从而重建该属可靠的物种树并准确推断其生物地理历史。这一整合性策略不仅是解决枫杨属系统发育难题的关键, 也对研究其他具有类似生物学特性的植物类群具有重要的方法论意义。

ORCID

宋以刚 https://orcid.org/0000-0003-2584-2338

参考文献

Amiryousefi A, Hyvönen J, Poczai P (2018) IRscope: An online program to visualize the junction sites of chloroplast genomes. Bioinformatics, 34, 3030–3031.

Arredondo A, Mourato B, Nguyen K, Boitard S, Rodríguez W, Mazet O, Chikhi L (2021) Inferring number of populations and changes in connectivity under the n-island model. Heredity, 126, 896–912.

Avise JC (2000) Phylogeography: The History and Formation of Species. Harvard University Press, Harvard.

Beier S, Thiel T, Münch T, Scholz U, Mascher M (2017) MISA-web: A web server for microsatellite prediction. Bioinformatics, 33, 2583–2585.

Benson G (1999) Tandem repeats finder: A program to analyze DNA sequences. Nucleic Acids Research, 27, 573–580.

Cao DL, Zhang XJ, Qu XJ, Fan SJ (2022) Plastid phylogenomics sheds light on divergence time and ecological adaptations of the tribe Persicarieae (Polygonaceae). Frontiers in Plant Science, 13, 1046253.

Chase MW, Cowan RS, Hollingsworth PM, van den Berg C, Madriñán S, Petersen G, Seberg O, Jørgsensen T, Cameron KM, Carine M, Pedersen N, Hedderson TAJ, Conrad F, Salazar GA, Richardson JE, Hollingsworth ML, Barraclough TG, Kelly L, Wilkinson M (2007) A proposal for a standardised protocol to barcode all land plants. Taxon, 56, 295–299.

Chen SJ (2015) Analysis of causes of failure of introduction and cultivation of *Pterocarya stenoptera* C. DC in Zhongwei municipality. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 56(8), 26–27. (in Chinese with English abstract) [陈淑瑾 (2015) 中卫市引种栽培枫杨失败原因分析. 宁夏农林科技, 56(8), 26–27.]

Chen T, Xiang TT, Zheng Q, Kuang XK, Kong QB, Zhou JS, Wang H, Zhou LJ, Feng SL, Yuan M, Yang HY, Ding CB (2025) Deciphering the evolutionary imprints of *Camellia oleifera* Abel.: Delineating its distinct phylogeographic structure and demographic history through microsatellite and plastid fragment. BMC Plant Biology, 25, 526.

Chen YX, Chen YS, Shi CM, Huang ZB, Zhang Y, Li SK, Li Y, Ye J, Yu C, Li Z, Zhang XQ, Wang J, Yang HM, Fang L, Chen Q (2018) SOAPnuke: A MapReduce acceleration-supported software for integrated quality control and preprocessing of high-throughput sequencing data. GigaScience, 7, gix120.

Degnan JH, Rosenberg NA (2009) Gene tree discordance, phylogenetic inference and the multispecies coalescent. Trends in Ecology & Evolution, 24, 332–340.

Dong Q, Zhang YL, Zhong SF, Zhang QY, Yang H, Yang H, Yi XX, Tan FQ, Chen C, Luo PG (2024) Conserved DNA sequence analysis reveals the phylogeography and evolutionary events of *Akebia trifoliata* in the region across the eastern edge of the Tibetan Plateau and subtropical China. BMC Ecology and Evolution, 24, 52.

Dong WP, Gao LM, Xu C, Song Y, Poczai P (2023) Editorial: Rise to the challenges in plastome phylogenomics. Frontiers in Plant Science, 14, 1200302.

Doyle JJ, Doyle JL (1987) A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. Phytochemical Bulletin, 19, 11–15.

Ewing B, Green P (1998) Base-calling of automated sequencer traces using *Phred*. II. Error probabilities. Genome Research, 8, 186–194.

Fazekas AJ, Burgess KS, Kesanakurti PR, Graham SW, Newmaster SG, Husband BC, Percy DM, Hajibabaei M, Barrett SCH (2008) Multiple multilocus DNA barcodes from the plastid genome discriminate plant species equally well. PLoS ONE, 3, e2802.

Frazer KA, Pachter L, Poliakov A, Rubin EM, Dubchak I (2004) VISTA: Computational tools for comparative genomics. Nucleic Acids Research, 32, W273–W279.

Fu T, Wang ZL, Lin LJ, Lin L, Li W, Yuan DM (2018) Molecular phylogenetic analysis of wild *Cerasus* plants in South China. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 32, 2126–2134. (in Chinese with English abstract) [付涛, 王志龙, 林乐静, 林立, 李文, 袁冬明 (2018) 我国南方野生樱属植物的分子系统发育分析. 核农学报, 32, 2126–2134.]

Geng YF, Hu GX, Wang S, Xu JC (2019) Complete chloroplast

genome of the threatened *Rhoiptelea chiliantha* (Juglandaceae s.l.). Conservation Genetics Resources, 11, 317–319.

Gou W, Jia SB, Price M, Guo XL, Zhou SD, He XJ (2020) Complete plastid genome sequencing of eight species from *Hansenia*, *Haplosphaera* and *Sinodielsia* (Apiaceae): Comparative analyses and phylogenetic implications. Plants, 9, 1523.

Han YW, Duan D, Ma XF, Jia Y, Liu ZL, Zhao GF, Li ZH (2016) Efficient identification of the forest tree species in Aceraceae using DNA barcodes. Frontiers in Plant Science, 7, 1707.

Hansen DR, Dastidar SG, Cai ZQ, Penaflor C, Kuehl JV, Boore JL, Jansen RK (2007) Phylogenetic and evolutionary implications of complete chloroplast genome sequences of four early-diverging angiosperms: *Buxus* (Buxaceae), *Chloranthus* (Chloranthaceae), *Dioscorea* (Dioscoreaceae), and *Illicium* (Schisandraceae). Molecular Phylogenetics and Evolution, 45, 547–563.

He L, Qian J, Li XW, Sun ZY, Xu XL, Chen SL (2017) Complete chloroplast genome of medicinal plant *Lonicera japonica*: Genome rearrangement, intron gain and loss, and implications for phylogenetic studies. Molecules, 22, 249.

Hipp AL, Manos PS, Hahn M, Avishai M, Bodénès C, Cavender-Bares J, Crowl AA, Deng M, Denk T, Fitz-Gibbon S, Gailing O, González-Elizondo MS, González-Rodríguez A, Grimm GW, Jiang XL, Kremer A, Lesur I, McVay JD, Plomion C, Rodríguez-Correa H, Schulze ED, Simeone MC, Sork VL, Valencia-Avalos S (2020) Genomic landscape of the global oak phylogeny. New Phytologist, 226, 1198–1212.

Hollingsworth PM, Li DZ, van der Bank M, Twyford AD (2016) Telling plant species apart with DNA: From barcodes to genomes. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371, 20150338.

Hu Y, Wang Q, Zhang XX, Zhou W, Chen XY, Hu XS (2019) Advancing phylogeography with chloroplast DNA markers. Biodiversity Science, 27, 219–234. (in Chinese with English abstract) [胡颖, 王茜, 张新新, 周玮, 陈晓阳, 胡新生 (2019) 叶绿体DNA标记在谱系地理学中的应用研究进展. 生物多样性, 27, 219–234.]

Hu YH, Woeste KE, Zhao P (2017a) Completion of the chloroplast genomes of five Chinese *Juglans* and their contribution to chloroplast phylogeny. Frontiers in Plant Science, 7, 1955.

Hu YH, Yan J, Feng XJ, Dang M, Woeste KE, Zhao P (2017b) Characterization of the complete chloroplast genome of wheel wingnut (*Cyclocarya paliurus*), an endemic in China. Conservation Genetics Resources, 9, 273–275.

Huang H, Shi C, Liu Y, Mao SY, Gao LZ (2014) Thirteen *Camellia* chloroplast genome sequences determined by high-throughput sequencing: Genome structure and phylogenetic relationships. BMC Evolutionary Biology, 14, 151.

Huang Y, Jin XJ, Zhang CY, Li P, Meng HH, Zhang YH (2024) Plastome evolution of *Engelhardia* facilitates phylogeny of Juglandaceae. BMC Plant Biology, 24, 634.

Jiang S, Chen FL, Qin P, Xie H, Peng G, Li YL, Guo XH (2022) The specific DNA barcodes based on chloroplast genes for species identification of Theaceae plants. Physiology and Molecular Biology of Plants, 28, 837–848.

Jin JJ, Yu WB, Yang JB, Song Y, DePamphilis CW, Yi TS, Li DZ (2020) GetOrganelle: A fast and versatile toolkit for accurate de novo assembly of organelle genomes. Genome Biology, 21, 241.

Katoh K, Standley DM (2013) MAFFT multiple sequence alignment software version 7: Improvements in performance and usability. Molecular Biology and Evolution, 30, 772–780.

Kozlowski G, Bétrisey S, Song YG (2018) Wingnuts (*Pterocarya*) and Walnut Family: Relict Trees: Linking the Past, Present and Future. Natural History Museum Fribourg, Fribourg, Switzerland.

Kress WJ, Erickson DL (2007) A two-locus global DNA barcode for land plants: The coding *rbcL* gene complements the non-coding *trnH-psbA* spacer region. PLoS ONE, 2, e508.

Kuang KR, Zheng SX, Li PQ, Lu AM (1979) Angiospermae, Dicotyledoneae: Myricaceae, Juglandaceae, Betulaceae. In: Flora Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 21 (ed. Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita). Science Press, Beijing. (in Chinese) [匡可任, 郑世铨, 李沛琼, 路安民 (1979) 杨梅科、胡桃科、桦木科. 见: 中国植物志(第21卷) (中国科学院中国植物志编辑委员会). 科学出版社, 北京.]

Kurtz S (2003) The Vmatch large scale sequence analysis software. Computer Program, 4–12. http://www.vmatch.de/. (accessed on 2026-05-20)

Lee WS, Donrung W, Hung BM, Muhamad Rusly NH, Lee SY, Tanee T (2025) The complete plastid genome of *Citrus hystrix* DC. 1813 (Rutaceae) and its phylogenetic analysis. Mitochondrial DNA Part B, 10, 94–98.

Li JJ, Liu HX, Mao SZ, Zhao B, Huang SX (2016) Adaptive evolution of the *ndhF* gene in the genus *Rheum* (Polygonaceae). Guihaia, 36, 101–106. (in Chinese with English abstract) [李景剑, 刘合霞, 毛世忠, 赵博, 黄仕训 (2016) 大黄属(蓼科)植物*ndhF*基因的适应性进化. 广西植物, 36, 101–106.]

Li PW, Lu YB, Qin XM, Zhang Q (2025) Plastome phylogenomics unravels the evolutionary relationships and biogeographic history of Chloranthaceae. BMC Plant Biology, 25, 543.

Li TZ, Zhang SY, Wu SD, Liao SY, Tang CQ, Li YL (2024) Chloroplast genome and characteristic analysis of *Cyclocarya paliurus* (batalin) iljinsk. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 40, 407–423. (in Chinese with English abstract) [李廷章, 章双玉, 吴书德, 廖水意, 汤楚

乔, 李玉玲 (2024) 青钱柳叶绿体基因组特征分析. 广西科学院学报, 40, 407–423.]

Li XP, Xu H, Yu JY, Han Y, Han S, Niu Y, Zhang FQ (2025) Comparative and phylogenetic analysis of *Potentilla* and *Dasiphora* (Rosaceae) based on plastid genome. BMC Plant Biology, 25, 176.

Liang CL, Wang L, Lei J, Duan BZ, Ma WS, Xiao SM, Qi HJ, Wang Z, Liu YQ, Shen XF, Guo S, Hu HY, Xu J, Chen SL (2019) A comparative analysis of the chloroplast genomes of four *Salvia* medicinal plants. Engineering, 5, 907–915.

Liu JQ, Fu MJ, Wu HY, Tian B (2021) Phylogeography of the Loess Plateau endemic plant *Prinsepia uniflora* inferred from the chloroplast DNA. Guihaia, 41, 396–403. (in Chinese with English abstract) [刘家奇, 付孟娇, 吴海洋, 田斌 (2021) 基于叶绿体DNA的黄土高原特有植物蔷核的谱系地理学. 广西植物, 41, 396–403.]

Liu KJ, Cui HX, Wu LD, Yang HM, Cao LL, Sun JH, Li B, Dong WP, Wang YH (2025) Chloroplast genome-based genetic variation and genetic diversity of *Ulmus pumila* (Ulmaceae) germplasm. Industrial Crops and Products, 233, 121452.

Lohse M, Drechsel O, Kahlau S, Bock R (2013) OrganellarGenomeDRAW—A suite of tools for generating physical maps of plastid and mitochondrial genomes and visualizing expression data sets. Nucleic Acids Research, 41, W575–W581.

Lu ZJ, Wang TR, Zheng SS, Meng HH, Cao JG, Song YG, Kozlowski G (2024) Phylogeography of *Pterocarya hupehensis* reveals the evolutionary patterns of a Cenozoic relict tree around the Sichuan Basin. Forestry Research, 4, e008.

Luo J, Chen JH, Guo WL, Yang ZF, Lim KJ, Wang ZJ (2022) Reassessment of *Annamocarya sinesis* (*Carya sinensis*) taxonomy through concatenation and coalescence phylogenetic analysis. Plants, 11, 52.

Ma WB, Ou YF, Dayananda B, Ji HJ, Yu T (2024) The complete chloroplast genome of *Rhododendron ambiguum* and comparative genomics of related species. Comparative Cytogenetics, 18, 143–159.

Mo ZH, Lou WR, Chen YQ, Jia XD, Zhai M, Guo ZR, Xuan JP (2020) The chloroplast genome of *Carya illinoinensis*: Genome structure, adaptive evolution, and phylogenetic analysis. Forests, 11, 207.

Mu XY, Tong L, Sun M, Zhu YX, Wen J, Lin QW, Liu B (2020) Phylogeny and divergence time estimation of the walnut family (Juglandaceae) based on nuclear RAD-Seq and chloroplast genome data. Molecular Phylogenetics and Evolution, 147, 106802.

Nguyen LT, Schmidt HA, von Haeseler A, Minh BQ (2015) IQ-TREE: A fast and effective stochastic algorithm for estimating maximum-likelihood phylogenies. Molecular Biology and Evolution, 32, 268–274.

O'Donnell RP, Wong DCJ, Phillips RD, Peakall R, Linde CC (2025) Discordance down under: Combining phylogenomics and fungal symbioses to detangle difficult nodes in a diverse tribe of Australian terrestrial orchids. Systematic Biology, 74, 434–452.

Pachter L, Batzoglou S, Spitkovsky VI, Beebee Jr WS, Lander ES, Berger B, Kleitman DJ (1999) A dictionary based approach for gene annotation. Proceedings of the Third Annual International Conference on Computational Molecular Biology, 6, 419–430.

Pei JW, Zhang YM, Nielsen R, Wu YF (2020) Inferring the ancestry of parents and grandparents from genetic data. PLoS Computational Biology, 16, e1008065.

Petit RJ, Duminil J, Fineschi S, Hampe A, Salvini D, Vendramin GG (2005) Comparative organization of chloroplast, mitochondrial and nuclear diversity in plant populations. Molecular Ecology, 14, 689–701.

Rieseberg LH, Soltis DE (1991) Phylogenetic consequences of cytoplasmic gene flow in plants. American Journal of Botany, 5, 65–84.

Rozas J, Ferrer-Mata A, Sánchez-DelBarrio JC, Guirao-Rico S, Librado P, Ramos-Onsins SE, Sánchez-Gracia A (2017) DnaSP 6: DNA sequence polymorphism analysis of large data sets. Molecular Biology and Evolution, 34, 3299–3302.

Ruhlman TA, Jansen RK (2021) Plastid genomes of flowering plants: Essential principles. Methods in Molecular Biology, 2317, 3–47.

Shen JS, Li XQ, Chen X, Huang XL, Jin SH (2022) The complete chloroplast genome of *Carya cathayensis* and phylogenetic analysis. Genes, 13, 369.

Shen Z, Zhou BF, Liang YY, Wang JS, Yu RX, Shi Y, Ling SJ, Luo WJ, Lin QQ, Niu JW, Qiao LJ, Manos PS, Wang BS (2025) Teasing apart the sources of phylogenetic tree discordance across three genomes in the oak family (Fagaceae). BMC Plant Biology, 25, 919.

Shi LC, Chen HM, Jiang M, Wang LQ, Wu X, Huang LF, Liu C (2019) CPGAVAS2, an integrated plastome sequence annotator and analyzer. Nucleic Acids Research, 47, W65–W73.

Song YG, Li Y, Meng HH, Fragnière Y, Ge BJ, Sakio H, Yousefzadeh H, Bétrisey S, Kozlowski G (2020) Phylogeny, taxonomy, and biogeography of *Pterocarya* (Juglandaceae). Plants, 9, 1524.

Song YG, Walas Ł, Pietras M, Sâm HV, Yousefzadeh H, Ok T, Farzaliyev V, Worobiec G, Worobiec E, Stachowicz-Rybka R, Boratyński A, Boratyńska K, Kozlowski G, Jasińska AK (2021) Past, present and future suitable areas for the relict tree *Pterocarya fraxinifolia* (Juglandaceae): Integrating fossil records, niche modeling, and phylogeography for conservation. European Journal of Forest Research, 140, 1323–1339.

Wang Q, Cheng X, Zhou W, Zhang XX, Hu Y, Chen XY, Hu XS (2019) Assessing the ecological and evolutionary processes underlying cytonuclear interactions. Scientia

Sinica Vitae, 49, 951–964. (in Chinese with English abstract) [王茜, 程祥, 周玮, 张新新, 胡颖, 陈晓阳, 胡新生 (2019) 细胞核质互作形成的生态与进化过程分析. 中国科学: 生命科学, 49, 951–964.]

Wang W, Yang T, Wang HL, Li ZJ, Ni JW, Su S, Xu XQ (2020) Comparative and phylogenetic analyses of the complete chloroplast genomes of six almond species (*Prunus* spp. L.). Scientific Reports, 10, 10137.

Wu Q, Zheng PP, Hu YB, Wei FW (2014) Genome-scale analysis of demographic history and adaptive selection. Protein & Cell, 5, 99–112.

Wu Y, Liu R, Wang WJ, Li DZ, Burgess KS, Yu WB, Wang H (2025) High species discrimination in *Pedicularis* (Orobanchaceae): Plastid genomes and traditional barcodes equally effective via parsimony-informative sites. Plant Diversity, 47, 920–930.

Xu J, Song YG, Deng M, Jiang XL, Zheng SS, Li Y (2020) Seed germination schedule and environmental context shaped the population genetic structure of subtropical evergreen oaks on the Yun-Gui Plateau, Southwest China. Heredity, 124, 499–513.

Yan H, Zhang JS, Ye JF, Guo CC, Xiang XG (2021) Characterization of the complete chloroplast genome of *Pterocarya macroptera* var. *delavayi* (Juglandaceae). Mitochondrial DNA Part B, 6, 1344–1345.

Yan H, Zhou P, Wang W, Ye JF, Tan SL, Guo CC, Zhang WG, Zhu ZW, Liu YZ, Xiang XG (2024) Biogeographic history of *Pterocarya* (Juglandaceae) inferred from phylogenomic and fossil data. Journal of Systematics and Evolution, 62, 1165–1176.

Yan J, Han K, Zeng SY, Zhao P, Woeste K, Li JF, Liu ZL (2017) Characterization of the complete chloroplast genome of *Platycarya strobilacea* (Juglandaceae). Conservation Genetics Resources, 9, 79–81.

Yan M, Zhao XQ, Zhou JQ, Huo Y, Ding Y, Yuan ZH (2019) The complete chloroplast genomes of *Punica granatum* and a comparison with other species in Lythraceae. International Journal of Molecular Sciences, 20, 2886.

Yan MX, Dong SJ, Gong QY, Xu Q, Ge YQ (2023) Comparative chloroplast genome analysis of four *Polygonatum* species insights into DNA barcoding, evolution, and phylogeny. Scientific Reports, 13, 16495.

Yang Y, Forsythe ES, Ding YM, Zhang DY, Bai WN (2023) Genomic analysis of plastid-nuclear interactions and differential evolution rates in coevolved genes across Juglandaceae species. Genome Biology and Evolution, 15, evad145.

Yang YY, Qu XJ, Zhang R, Stull GW, Yi TS (2021) Plastid phylogenomic analyses of Fagales reveal signatures of conflict and ancient chloroplast capture. Molecular Phylogenetics and Evolution, 163, 107232.

Zhang CY, Wang FY, Yan HF, Hao G, Hu CM, Ge XJ (2012) Testing DNA barcoding in closely related groups of *Lysimachia* L. (Myrsinaceae). Molecular Ecology Resources, 12, 98–108.

Zhang J, Zhang HX (2024) Characteristics and evolutionary history of the chloroplast genome of *Malus sieversii* in Xinjiang. Arid Zone Research, 41, 2110–2119. (in Chinese with English abstract) [张健, 张宏祥 (2024) 新疆野苹果叶绿体基因组特征及其进化历史. 干旱区研究, 41, 2110–2119.]

Zhang R, Stull GW, Jin JJ, Wang YH, Guo Y, Yang ZY, Li HT, An KL, Charboneau JLM, Folk RA, Cardoso D, de Queiroz LP, Bruneau A, Soltis PS, Soltis DE, Smith SA, Li DZ, Yi TS (2026) Phylogenetic resolution and conflict in the species-rich flowering plant family Leguminosae. Systematic Biology, 75, 236–258.

Zhang ZR, Yang X, Li WY, Peng YQ, Gao J (2022) Comparative chloroplast genome analysis of *Ficus* (Moraceae): Insight into adaptive evolution and mutational hotspot regions. Frontiers in Plant Science, 13, 965335.

Zhang ZR, Shi WB, Hu SQ, Mou LR, Shi C, Zhu BY, Yang J (2025) Comprehensive chloroplast genome analysis of four *Callitriche* (Plantaginaceae) species for phylogenetic and conservation insights. Horticulturae, 11, 66.

Zhao XQ, Yan M, Ding Y, Huo Y, Yuan ZH (2019) Characterization and comparative analysis of the complete chloroplast genome sequence from *Prunus avium* 'Summit'. PeerJ, 7, e8210.

Zhou BF, Yuan S, Crowl AA, Liang YY, Shi Y, Chen XY, An QQ, Kang M, Manos PS, Wang BS (2022) Phylogenomic analyses highlight innovation and introgression in the continental radiations of Fagaceae across the Northern Hemisphere. Nature Communications, 13, 1320.

Zhou HJ, Hu YH, Ebrahimi A, Liu PL, Woeste K, Zhao P, Zhang SX (2021) Whole genome based insights into the phylogeny and evolution of the Juglandaceae. BMC Ecology and Evolution, 21, 191.

(责任编委: 邱英雄　责任编辑: 黄祥忠)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025475

王姗姗, 刘琦, 李玉, 王天瑞, 戴锡玲, Gregor Kozlowski, 许瑾, 宋以刚 (2026) 基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究: 以枫杨属为例. 生物多样性, 34, 25475. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025475

附录1　从NCBI数据库获取的枫杨属物种基本信息

Appendix 1　Basic information of *Pterocarya* species obtained from the NCBI database

物种 Species	登录号 GenBank No.	来源 Source
华西枫杨 *Pterocarya macroptera* var. *insignis*	MN262641.1	NCBI数据库
华西枫杨 *Pterocarya macroptera* var. *insignis*	MH188292.1	NCBI数据库
华西枫杨 *Pterocarya macroptera* var. *insignis*	MH188290.1	NCBI数据库
枫杨 *Pterocarya stenoptera*	MN262640.1	NCBI数据库
枫杨 *Pterocarya stenoptera*	MN866892.1	NCBI数据库
枫杨 *Pterocarya stenoptera*	MH188289.1	NCBI数据库
云南枫杨 *Pterocarya macroptera* var. *delavayi*	MW194257.1	NCBI数据库
湖北枫杨 *Pterocarya hupehensis*	MH188293.1	NCBI数据库
高加索枫杨 *Pterocarya fraxinifolia*	MH188291.1	NCBI数据库
越南枫杨 *Pterocarya tonkinensis*	MH188288.1	NCBI数据库
马尾树 *Rhoiptelea chiliantha*	MT701585.1	NCBI数据库
杨梅 *Morella rubra*	KY476635.1	NCBI数据库

附录2　本研究新测序的7个个体的叶绿体基因组注释基因列表

Appendix 2　List of annotated genes in the chloroplast genomes of seven newly sequenced individuals in this study

基因分类 Category	基因分组 Group of genes	基因名称 Name of genes
表达相关基因 Expression-related genes	核糖体RNA基因 Ribosomal RNAs genes	*rrn*4.5*S*(×2), *rrn*5*S*(×2), *rrn*16*S*(×2), *rrn*23*S*(×2)
	转运RNA基因 Transfer RNAs genes	*trnA-UGC**(×2), *trnC-GCA*, *trnD-GUC*, *trnE-UUC*, *trnF-GAA*, *trnG-GCC**, *trnG-UCC*, *trnH-GUG*, *trnI-CAU*(×2), *trnI-GAU**(×2), *trnK-UUU**, *trnL-CAA*(×2), *trnL-UAA**, *trnL-UAG*, *trnM-CAU*, *trnN-GUU*(×2), *trnP-UGG*, *trnQ-UUG*, *trnR-ACG*(×2), *trnR-UCU*, *trnS-GCU*(×2), *trnS-UGA*, *trnT-GGU*, *trnT-UGU*, *trnV-GAC*(×2), *trnV-UAC**, *trnW-CCA*, *trnY-GUA*, *trnfM-CAU*
	核糖体小亚基基因 Ribosomal small subunit gene (SSU gene)	*rps*2, *rps*3, *rps*4, *rps*7(×2), *rps*8(×2), *rps*11, *rps*12**(×2), *rps*14, *rps*15, *rps*16*, *rps*18, *rps*19
	核糖体大亚基基因 Ribosomal large subuni gene (LSUgene)	*rpl*2*(×2), *rpl*14, *rpl*16*, *rpl*20, *rpl*22, *rpl*23(×2), *rpl*32, *rpl*33, *rpl*36
	RNA聚合酶亚基基因 RNA polymerase subunit gene	*rpoA*, *rpoB*, *rpoC*1, *rpoC*2
光合作用相关基因 Photosynthesis-related genes	ATP酶合成基因 ATP synthase gene	*atpA*, *atpB*, *atpE*, *atpF**, *atpH*, *atpI*
	细胞色素复合物基因 Cytochrome b/f complex gene	*petA*, *petB**, *petD**, *petG*, *petL*, *petN*
	NADH 脱氢酶基因 NADH dehydrogenase gene	*ndhA**, *ndhB**(×2), *ndhC*, *ndhD*, *ndhE*, *ndhF*, *ndhG*, *ndhH*, *ndhI*, *ndhJ*, *ndhK*
	光合系统 I 基因 Photosystem I gene	*psaA*, *psaB*, *psaC*, *psaI*, *psaJ*
	光合系统 II 基因 Photosystem II gene	*psbA*, *psbB*, *psbC*, *psbD*, *psbE*, *psbF*, *psbH*, *psbI*, *psbJ*, *psbK*, *psbL*, *psbM*, *psbN*, *psbT*, *psbZ*
	二磷酸核酮糖羧化酶大亚基基因 RubisCO large subunit gene	*rbcL*
	依赖ATP的蛋白酶单元p基因 ATP-dependent protease subunit p gene (clpP)	*clpP***
其他基因 Other genes	成熟酶基因 Maturase gene	*matK*
	包裹膜蛋白基因 Envelop membrane protein gene	*cemA*
	乙酰辅酶 A 羧化酶亚基基因 Acetyl CoA-carboxylase subunit gene	*accD*
	c型细胞色素合成基因 c-type cytochrome synthesis ccsA gene (ccsA)	*ccsA*
	假定叶绿体阅读框 Hypothetical chloroplast reading frames	*ycf*1(×2), *ycf*2(×2), *ycf*3, *ycf*4

*/**: 带有符号的基因是含有单(*)或双(**)内含子的基因; (×2): 位于IR区域的重复基因标记为×2。

*/**, The signed genes are those containing single (*) or double (**) introns; (×2), The duplicate genes in the IR region mark ×2.

附录3　枫杨属叶绿体基因组核苷酸多样性(Pi)的滑动窗口分析结果

Appendix 3　Sliding window analysis of nucleotide diversity (Pi) in the chloroplast genomes of *Pterocarya*

Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
1–806	406	0	12977–13780	13376	0.00223
207–1006	606	0	13177–13981	13580	0.00223
407–1206	806	0	13377–14185	13780	0.00223
607–1413	1006	0	13581–14386	13981	0.00103
807–1614	1206	0	13781–14586	14185	0.00031
1007–1814	1413	0	13982–14786	14386	0.00063
1207–2014	1614	0.00071	14186–14995	14586	0.00134
1414–2214	1814	0.00174	14387–15195	14786	0.00103
1615–2414	2014	0.00174	14587–15395	14995	0.00103
1815–2614	2214	0.00241	14787–15595	15195	0.00071
2015–2814	2414	0.0017	14996–15797	15395	0
2215–3014	2614	0.00165	15196–15997	15595	0.00071
2415–3214	2814	0.00232	15396–16198	15797	0.00103
2615–3414	3014	0.00165	15596–16398	15997	0.00103
2815–3614	3214	0.00237	15798–16598	16198	0.00103
3015–3816	3414	0.00138	15998–16798	16398	0.00103
3215–4018	3614	0.00071	16199–16998	16598	0.00071
3415–4218	3816	0.00071	16399–17198	16798	0.00071
3615–4418	4018	0.00031	16599–17398	16998	0.00071
3817–4620	4218	0.00063	16799–17599	17198	0
4019–4822	4418	0.00263	16999–17799	17398	0.00031
4219–5026	4620	0.00263	17199–17999	17599	0.00134
4419–5226	4822	0.0042	17399–18199	17799	0.00196
4621–5426	5026	0.00388	17600–18399	17999	0.00196
4823–5626	5226	0.00188	17800–18606	18199	0.00545
5027–5832	5426	0.00254	18000–18809	18399	0.00442
5227–6032	5626	0.00067	18200–19009	18606	0.00379
5427–6232	5832	0.00067	18400–19209	18809	0.00379
5627–6442	6032	0.00196	18607–19409	19009	0
5833–6650	6232	0.00129	18810–19609	19209	0
6033–6852	6442	0.00232	19010–19809	19409	0.00071
6233–7055	6650	0.00299	19210–20009	19609	0.00174
6443–7255	6852	0.00241	19410–20209	19809	0.00174
6651–7455	7055	0.00241	19610–20409	20009	0.00205
6853–7655	7255	0.00241	19810–20609	20209	0.00205
7056–7863	7455	0.00228	20010–20809	20409	0.00134
7256–8064	7655	0.00362	20210–21009	20609	0.00134
7456–8264	7863	0.00362	20410–21209	20809	0.00134
7656–8464	8064	0.00259	20610–21409	21009	0.00134
7864–8664	8264	0.00205	20810–21609	21209	0.00134
8065–8864	8464	0	21010–21809	21409	0.00134
8265–9064	8664	0.00031	21210–22009	21609	0.00103
8465–9266	8864	0.00129	21410–22209	21809	0.00031
8665–9469	9064	0.00161	21610–22409	22009	0
8865–9816	9266	0.00375	21810–22609	22209	0
9065–10020	9469	0.00446	22010–22809	22409	0
9267–10333	9816	0.00536	22210–23009	22609	0
9470–10533	10020	0.00504	22410–23209	22809	0
9817–10733	10333	0.0029	22610–23410	23009	0.00134
10021–10933	10533	0.00259	22810–23610	23209	0.00165
10334–11133	10733	0.00071	23010–23810	23410	0.00165
10534–11366	10933	0.00103	23210–24010	23610	0.00165
10734–11569	11133	0.00246	23411–24210	23810	0.00031
10934–11776	11366	0.00263	23611–24410	24010	0
11134–11976	11569	0.00451	23811–24610	24210	0
11367–12176	11776	0.0042	24011–24824	24410	0
11570–12376	11976	0.00348	24211–25041	24610	0
11777–12576	12176	0.00259	24411–25246	24824	0.00103
11977–12776	12376	0.00071	24611–25446	25041	0.00103
12177–12976	12576	0.00071	24825–25646	25246	0.00103
12377–13176	12776	0	25042–25846	25446	0.00174
12577–13376	12976	0	25247–26046	25646	0.00071
12777–13580	13176	0.00152	25447–26246	25846	0.00071

Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
25647–26446	26046	0.00071	38752–39551	39151	0.00071
25847–26646	26246	0	38952–39751	39351	0
26047–26846	26446	0	39152–39953	39551	0.00219
26247–27046	26646	0.00067	39352–40153	39751	0.00219
26447–27246	26846	0.00067	39552–40368	39953	0.00219
26647–27446	27046	0.00067	39752–40568	40153	0.00219
26847–27646	27246	0.00067	39954–40914	40368	0
27047–27846	27446	0	40154–41116	40568	0.00129
27247–28046	27646	0.00067	40369–41328	40914	0.00161
27447–28246	27846	0.00067	40569–41528	41116	0.00161
27647–28446	28046	0.00067	40915–41728	41328	0.00161
27847–28646	28246	0.00067	41117–41928	41528	0.00031
28047–28846	28446	0.00138	41329–42128	41728	0
28247–29046	28646	0.00138	41529–42328	41928	0
28447–29246	28846	0.0017	41729–42528	42128	0
28647–29446	29046	0.00299	41929–42728	42328	0
28847–29646	29246	0.00281	42129–42928	42528	0
29047–29846	29446	0.00424	42329–43128	42728	0
29247–30046	29646	0.00393	42529–43328	42928	0
29447–30246	29846	0.00295	42729–43528	43128	0.00071
29647–30449	30046	0.00174	42929–43728	43328	0.00071
29847–30649	30246	0.00031	43129–43928	43528	0.00071
30047–30849	30449	0.00237	43329–44128	43728	0.00071
30247–31049	30649	0.00205	43529–44328	43928	0
30450–31249	30849	0.00277	43729–44528	44128	0
30650–31449	31049	0.00344	43929–44728	44328	0
30850–31652	31249	0.00138	44129–44928	44528	0
31050–31852	31449	0.00138	44329–45128	44728	0
31250–32052	31652	0.00129	44529–45328	44928	0
31450–32252	31852	0.00205	44729–45528	45128	0
31653–32452	32052	0.00205	44929–45728	45328	0
31853–32652	32252	0.00335	45129–45928	45528	0
32053–32852	32452	0.00272	45329–46128	45728	0.00054
32253–33052	32652	0.00411	45529–46328	45928	0.00054
32453–33252	32852	0.00478	45729–46528	46128	0.00054
32653–33452	33052	0.00446	45929–46728	46328	0.00054
32853–33652	33252	0.00446	46129–46928	46528	0
33053–33852	33452	0.00165	46329–47129	46728	0.00071
33253–34058	33652	0.00362	46529–47329	46928	0.00071
33453–34272	33852	0.00402	46729–47529	47129	0.00125
33653–34472	34058	0.00473	46929–47729	47329	0.00196
33853–34672	34272	0.00473	47130–47929	47529	0.00192
34059–34883	34472	0.0021	47330–48129	47729	0.00192
34273–35083	34672	0.00071	47530–48330	47929	0.00138
34473–35284	34883	0.00071	47730–48530	48129	0.00067
34673–35484	35083	0.00071	47930–48730	48330	0
34884–35696	35284	0.00071	48130–48930	48530	0
35084–35896	35484	0.00196	48331–49131	48730	0
35285–36098	35696	0.00192	48531–49331	48930	0
35485–36327	35896	0.00192	48731–49536	49131	0
35697–36531	36098	0.00397	48931–49736	49331	0.00125
35897–36740	36327	0.00272	49132–49938	49536	0.00188
36099–36950	36531	0.00308	49332–50148	49736	0.00188
36328–37151	36740	0.00308	49537–50348	49938	0.00188
36532–37351	36950	0.00103	49737–50548	50148	0.00094
36741–37551	37151	0.00103	49939–50748	50348	0.00031
36951–37751	37351	0	50149–50948	50548	0.00031
37152–37951	37551	0	50349–51148	50748	0.00031
37352–38151	37751	0	50549–51348	50948	0.00214
37552–38351	37951	0	50749–51548	51148	0.00214
37752–38551	38151	0	50949–51748	51348	0.00246
37952–38751	38351	0	51149–51948	51548	0.00246
38152–38951	38551	0.00071	51349–52148	51748	0.00031
38352–39151	38751	0.00071	51549–52349	51948	0.00031
38552–39351	38951	0.00071	51749–52550	52148	0.00098

Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
51949–52750	52349	0.00098	65258–66057	65657	0.00205
52149–52950	52550	0.00165	65458–66259	65857	0.0021
52350–53150	52750	0.00165	65658–66477	66057	0.00277
52551–53350	52950	0.00098	65858–66677	66259	0.0033
52751–53550	53150	0.00165	66058–66877	66477	0.00192
52951–53795	53350	0.00201	66260–67077	66677	0.00121
53151–53995	53550	0.00201	66478–67278	66877	0.00085
53351–54255	53795	0.00201	66678–67478	67077	0.00031
53551–54455	53995	0.00134	66878–67678	67278	0.00031
53796–54655	54255	0.00031	67078–67878	67478	0.00134
53996–54855	54455	0.00063	67279–68078	67678	0.00103
54256–55056	54655	0.00098	67479–68278	67878	0.00103
54456–55256	54855	0.0017	67679–68606	68078	0.00174
54656–55456	55056	0.00241	67879–68807	68278	0.00103
54856–55657	55256	0.0021	68079–69007	68606	0.00103
55057–55857	55456	0.00143	68279–69219	68807	0.00241
55257–56057	55657	0.00071	68607–69420	69007	0.0017
55457–56262	55857	0	68808–69620	69219	0.00138
55658–56462	56057	0.0021	69008–69820	69420	0.00138
55858–56801	56262	0.00308	69220–70020	69620	0
56058–57002	56462	0.00308	69421–70220	69820	0
56263–57202	56801	0.00339	69621–70420	70020	0.00031
56463–57402	57002	0.00196	69821–70620	70220	0.00031
56802–57602	57202	0.00165	70021–70821	70420	0.00063
57003–57803	57402	0.00196	70221–71026	70620	0.00129
57203–58003	57602	0.00165	70421–71230	70821	0.00241
57403–58203	57803	0.00098	70621–71447	71026	0.00371
57603–58403	58003	0.00031	70822–71647	71230	0.00402
57804–58603	58203	0	71027–71847	71447	0.00335
58004–58803	58403	0	71231–72047	71647	0.00192
58204–59003	58603	0	71448–72247	71847	0.00063
58404–59203	58803	0	71648–72468	72047	0.00031
58604–59403	59003	0	71848–72668	72247	0.00031
58804–59603	59203	0	72048–72869	72468	0.00031
59004–59803	59403	0.00071	72248–73069	72668	0.00031
59204–60003	59603	0.00228	72469–73279	72869	0.00031
59404–60203	59803	0.00228	72669–73480	73069	0.00031
59604–60403	60003	0.00228	72870–73680	73279	0.00063
59804–60617	60203	0.00156	73070–73880	73480	0.00063
60004–60817	60403	0	73280–74080	73680	0.00031
60204–61017	60617	0	73481–74280	73880	0.00031
60404–61217	60817	0.00071	73681–74481	74080	0
60618–61417	61017	0.00071	73881–74681	74280	0.00071
60818–61617	61217	0.00143	74081–74881	74481	0.00071
61018–61817	61417	0.00143	74281–75081	74681	0.00071
61218–62017	61617	0.00071	74482–75281	74881	0.00071
61418–62217	61817	0.00071	74682–75481	75081	0
61618–62417	62017	0.00031	74882–75681	75281	0
61818–62638	62217	0.00063	75082–75891	75481	0
62018–62838	62417	0.00063	75282–76091	75681	0.00031
62218–63038	62638	0.00094	75482–76291	75891	0.00031
62418–63238	62838	0.00129	75682–76491	76091	0.00031
62639–63438	63038	0.00098	75892–76698	76291	0.00085
62839–63638	63238	0.00098	76092–76898	76491	0.00054
63039–63838	63438	0.00067	76292–77098	76698	0.00054
63239–64038	63638	0	76492–77298	76898	0.00125
63439–64249	63838	0.00183	76699–77498	77098	0.00071
63639–64450	64038	0.00214	76899–77698	77298	0.00071
63839–64654	64249	0.00246	77099–77898	77498	0.00125
64039–64854	64450	0.00246	77299–78098	77698	0.00054
64250–65054	64654	0.00063	77499–78298	77898	0.00085
64451–65257	64854	0.00031	77699–78501	78098	0.00116
64655–65457	65054	0.00067	77899–78701	78298	0.00063
64855–65657	65257	0.00067	78099–78901	78501	0.00063
65055–65857	65457	0.00067	78299–79101	78701	0.00031

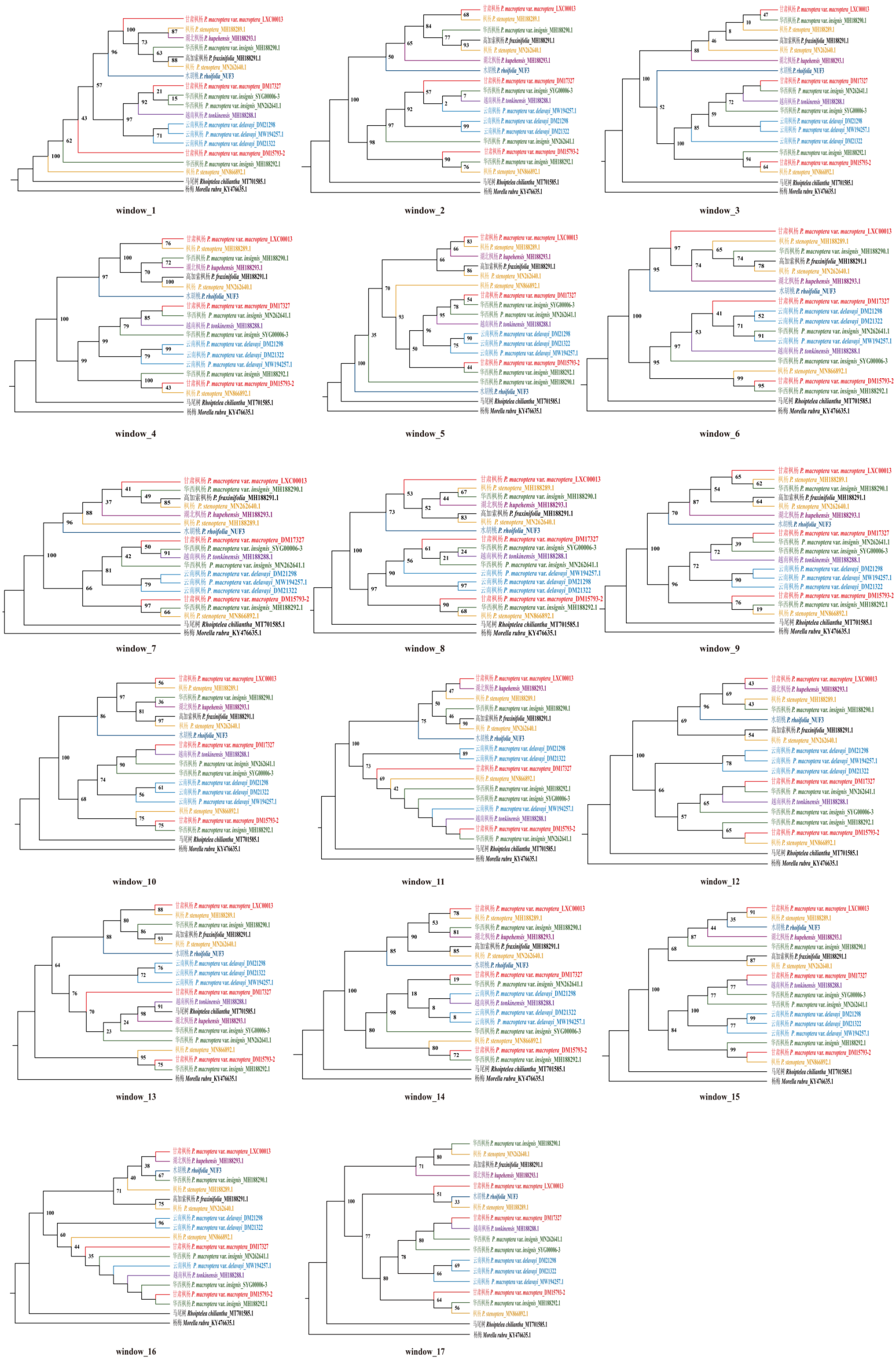
Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
78502–79301	78901	0	91554–92353	91953	0
78702–79501	79101	0	91754–92553	92153	0
78902–79701	79301	0	91954–92753	92353	0
79102–79901	79501	0	92154–92953	92553	0
79302–80124	79701	0	92354–93153	92753	0.00067
79502–80324	79901	0	92554–93353	92953	0.00067
79702–80524	80124	0	92754–93553	93153	0.00067
79902–80724	80324	0.00031	92954–93753	93353	0.00067
80125–80924	80524	0.00031	93154–93953	93553	0
80325–81124	80724	0.00031	93354–94153	93753	0.00067
80525–81325	80924	0.00031	93554–94353	93953	0.00067
80725–81525	81124	0	93754–94553	94153	0.00067
80925–81725	81325	0.00138	93954–94765	94353	0.00067
81125–81925	81525	0.00138	94154–94965	94553	0.00031
81326–82125	81725	0.00138	94354–95165	94765	0.00085
81526–82325	81925	0.00138	94554–95365	94965	0.00085
81726–82525	82125	0.00071	94766–95565	95165	0.00085
81926–82725	82325	0.00138	94966–95765	95365	0.00054
82126–82925	82525	0.00138	95166–95965	95565	0
82326–83127	82725	0.0021	95366–96165	95765	0
82526–83327	82925	0.00138	95566–96365	95965	0
82726–83527	83127	0.00071	95766–96565	96165	0
82926–83727	83327	0.00071	95966–96765	96365	0
83128–83928	83527	0.00071	96166–96965	96565	0
83328–84128	83727	0.00071	96366–97165	96765	0
83528–84328	83928	0.00071	96566–97365	96965	0
83728–84528	84128	0.00103	96766–97565	97165	0
83929–84728	84328	0.00031	96966–97765	97365	0
84129–84928	84528	0.00098	97166–97965	97565	0
84329–85128	84728	0.00098	97366–98165	97765	0
84529–85328	84928	0.00138	97566–98365	97965	0
84729–85530	85128	0.00138	97766–98565	98165	0
84929–85730	85328	0.00071	97966–98765	98365	0
85129–85930	85530	0.00134	98166–98965	98565	0
85329–86139	85730	0.00094	98366–99165	98765	0
85531–86339	85930	0.00125	98566–99365	98965	0.00071
85731–86539	86139	0.00125	98766–99565	99165	0.00071
85931–86739	86339	0.00129	98966–99765	99365	0.00103
86140–86939	86539	0.00129	99166–99965	99565	0.00103
86340–87139	86739	0.00098	99366–100165	99765	0.00031
86540–87341	86939	0.0017	99566–100365	99965	0.00031
86740–87541	87139	0.00103	99766–100565	100165	0
86940–87741	87341	0.00071	99966–100765	100365	0
87140–87941	87541	0.00263	100166–100965	100565	0
87342–88141	87741	0.00259	100366–101165	100765	0
87542–88341	87941	0.0033	100566–101365	100965	0
87742–88541	88141	0.0033	100766–101565	101165	0
87942–88741	88341	0.00138	100966–101765	101365	0
88142–88941	88541	0.00103	101166–101965	101565	0
88342–89141	88741	0.00031	101366–102165	101765	0
88542–89341	88941	0.00031	101566–102365	101965	0
88742–89541	89141	0.00031	101766–102565	102165	0
88942–89741	89341	0.00063	101966–102765	102365	0.00054
89142–89941	89541	0.00063	102166–102965	102565	0.00054
89342–90141	89741	0.00116	102366–103173	102765	0.00054
89542–90349	89941	0.00116	102566–103373	102965	0.00085
89742–90549	90141	0.00054	102766–103573	103173	0.00031
89942–90749	90349	0.00054	102966–103773	103373	0.00031
90142–90953	90549	0	103174–103973	103573	0.00031
90350–91153	90749	0	103374–104173	103773	0
90550–91353	90953	0	103574–104373	103973	0
90750–91553	91153	0.00031	103774–104573	104173	0
90954–91753	91353	0.00031	103974–104773	104373	0
91154–91953	91553	0.00031	104174–104973	104573	0
91354–92153	91753	0.00031	104374–105173	104773	0

Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
104574–105383	104973	0.00071	117412–118211	117811	0.00071
104774–105583	105173	0.00071	117612–118411	118011	0.00134
104974–105783	105383	0.00071	117812–118611	118211	0.00205
105174–105983	105583	0.00071	118012–118811	118411	0.00272
105384–106183	105783	0	118212–119012	118611	0.00304
105584–106383	105983	0	118412–119223	118811	0.00491
105784–106583	106183	0	118612–119423	119012	0.00487
105984–106783	106383	0	118812–119623	119223	0.00451
106184–106983	106583	0	119013–119823	119423	0.00415
106384–107183	106783	0	119224–120035	119623	0.00196
106584–107383	106983	0	119424–120236	119823	0.00161
106784–107583	107183	0	119624–120436	120035	0.00228
106984–107783	107383	0	119824–120641	120236	0.00161
107184–107983	107583	0	120036–120841	120436	0.00129
107384–108183	107783	0	120237–121041	120641	0.0017
107584–108383	107983	0	120437–121241	120841	0.00071
107784–108583	108183	0	120642–121441	121041	0.00143
107984–108783	108383	0	120842–121641	121241	0.00143
108184–108983	108583	0	121042–121845	121441	0.00103
108384–109183	108783	0	121242–122045	121641	0.00103
108584–109383	108983	0	121442–122245	121845	0.00031
108784–109583	109183	0	121642–122445	122045	0.00098
108984–109783	109383	0	121846–122645	122245	0.00098
109184–109986	109583	0.00063	122046–122845	122445	0.00098
109384–110186	109783	0.00063	122246–123045	122645	0.00098
109584–110386	109986	0.00063	122446–123245	122845	0.00031
109784–110586	110186	0.00063	122646–123445	123045	0.00031
109987–110786	110386	0	122846–123647	123245	0.00031
110187–110986	110586	0	123046–123847	123445	0.00031
110387–111186	110786	0	123246–124047	123647	0.00063
110587–111386	110986	0	123446–124247	123847	0.00031
110787–111586	111186	0	123648–124447	124047	0.00031
110987–111786	111386	0.00031	123848–124648	124247	0.00031
111187–111986	111586	0.00031	124048–124848	124447	0.00067
111387–112186	111786	0.00031	124248–125048	124648	0.00067
111587–112386	111986	0.00031	124448–125248	124848	0.00152
111787–112586	112186	0	124649–125448	125048	0.00152
111987–112786	112386	0	124849–125648	125248	0.00183
112187–112986	112586	0	125049–125848	125448	0.0025
112387–113186	112786	0	125249–126048	125648	0.00196
112587–113386	112986	0	125449–126248	125848	0.00263
112787–113586	113186	0.00071	125649–126448	126048	0.00165
112987–113786	113386	0.00138	125849–126648	126248	0.00098
113187–113986	113586	0.00138	126049–126848	126448	0.00138
113387–114186	113786	0.00138	126249–127057	126648	0.00071
113587–114386	113986	0.00067	126449–127262	126848	0.00134
113787–114586	114186	0	126649–127462	127057	0.00134
113987–114786	114386	0.00214	126849–127662	127262	0.00134
114187–114986	114586	0.00214	127058–127863	127462	0.00134
114387–115186	114786	0.00214	127263–128063	127662	0.00071
114587–115386	114986	0.00246	127463–128263	127863	0.00071
114787–115586	115186	0.00031	127663–128463	128063	0
114987–115786	115386	0.00031	127864–128663	128263	0
115187–115995	115586	0.00031	128064–128863	128463	0
115387–116195	115786	0	128264–129063	128663	0.00071
115587–116539	115995	0.02621	128464–129263	128863	0.00071
115787–116811	116195	0.04076	128664–129463	129063	0.00071
115996–117011	116539	0.04076	128864–129663	129263	0.00071
116196–117211	116811	0.04196	129064–129863	129463	0.00067
116540–117411	117011	0.01679	129264–130064	129663	0.00067
116812–117611	117211	0.00223	129464–130266	129863	0.00067
117012–117811	117411	0.00223	129664–130466	130064	0.00138
117212–118011	117611	0.00103	129864–130666	130266	0.00071

Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
130065–130866	130466	0.0021	142279–143078	142678	0
130267–131066	130666	0.0021	142479–143278	142878	0
130467–131266	130866	0.00138	142679–143478	143078	0
130667–131466	131066	0.00138	142879–143678	143278	0
130867–131666	131266	0.00031	143079–143878	143478	0
131067–131866	131466	0.00098	143279–144078	143678	0
131267–132066	131666	0.00241	143479–144278	143878	0
131467–132266	131866	0.00295	143679–144478	144078	0
131667–132466	132066	0.00397	143879–144678	144278	0
131867–132666	132266	0.0033	144079–144878	144478	0
132067–132866	132466	0.00259	144279–145078	144678	0
132267–133066	132666	0.00237	144479–145278	144878	0
132467–133266	132866	0.00165	144679–145478	145078	0
132667–133466	133066	0.00196	144879–145678	145278	0
132867–133666	133266	0.00179	145079–145878	145478	0
133067–133866	133466	0.00201	145279–146088	145678	0.00071
133267–134066	133666	0.00138	145479–146288	145878	0.00071
133467–134266	133866	0.00174	145679–146488	146088	0.00071
133667–134466	134066	0.00183	145879–146688	146288	0.00071
133867–134666	134266	0.00129	146089–146888	146488	0
134067–134866	134466	0.00183	146289–147088	146688	0
134267–135066	134666	0.00451	146489–147288	146888	0
134467–135266	134866	0.00388	146689–147488	147088	0
134667–135475	135066	0.00388	146889–147688	147288	0
134867–135675	135266	0.00335	147089–147888	147488	0
135067–135875	135475	0	147289–148088	147688	0.00031
135267–136075	135675	0.00031	147489–148296	147888	0.00031
135476–136275	135875	0.00031	147689–148496	148088	0.00085
135676–136475	136075	0.00246	147889–148696	148296	0.00085
135876–136675	136275	0.00246	148089–148896	148496	0.00054
136076–136875	136475	0.00214	148297–149096	148696	0.00054
136276–137075	136675	0.00214	148497–149296	148896	0
136476–137275	136875	0	148697–149496	149096	0
136676–137475	137075	0	148897–149696	149296	0
136876–137675	137275	0.00138	149097–149896	149496	0
137076–137875	137475	0.00138	149297–150096	149696	0
137276–138075	137675	0.00138	149497–150296	149896	0
137476–138275	137875	0.00138	149697–150496	150096	0
137676–138475	138075	0	149897–150696	150296	0
137876–138675	138275	0	150097–150896	150496	0
138076–138875	138475	0	150297–151096	150696	0
138276–139075	138675	0	150497–151296	150896	0
138476–139275	138875	0	150697–151496	151096	0
138676–139475	139075	0.00031	150897–151696	151296	0.00031
138876–139675	139275	0.00031	151097–151896	151496	0.00103
139076–139875	139475	0.00031	151297–152096	151696	0.00103
139276–140075	139675	0.00031	151497–152296	151896	0.00103
139476–140275	139875	0	151697–152496	152096	0.00071
139676–140475	140075	0	151897–152696	152296	0
139876–140675	140275	0	152097–152896	152496	0
140076–140875	140475	0	152297–153096	152696	0
140276–141075	140675	0	152497–153296	152896	0
140476–141278	140875	0.00063	152697–153496	153096	0
140676–141478	141075	0.00063	152897–153696	153296	0
140876–141678	141278	0.00063	153097–153896	153496	0
141076–141878	141478	0.00063	153297–154096	153696	0
141279–142078	141678	0	153497–154296	153896	0
141479–142278	141878	0	153697–154496	154096	0
141679–142478	142078	0	153897–154696	154296	0
141879–142678	142278	0	154097–154896	154496	0
142079–142878	142478	0	154297–155096	154696	0

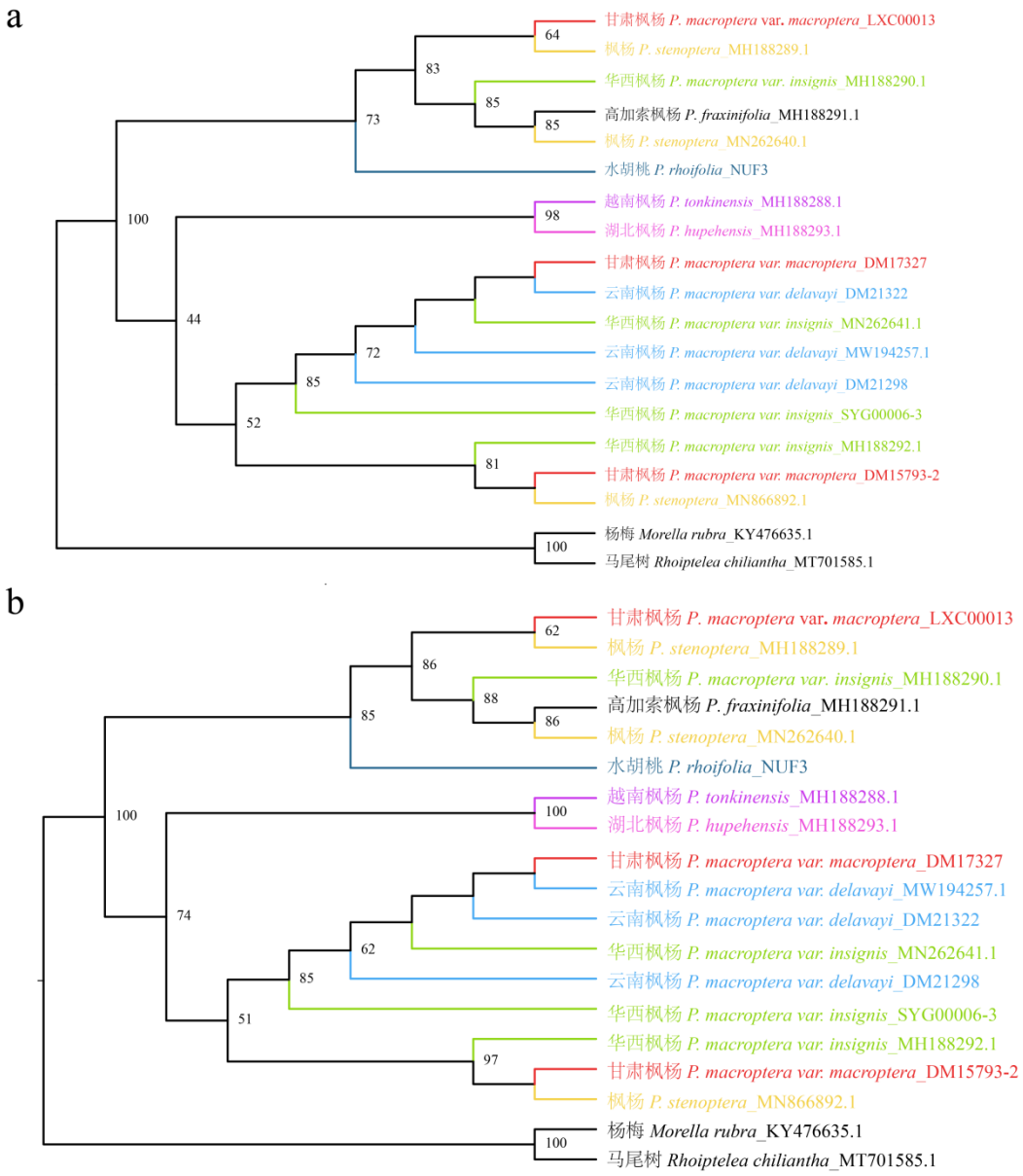
Window	Midpoint	Pi	Window	Midpoint	Pi
154497–155296	154896	0	157509–158308	157908	0.00067
154697–155496	155096	0	157709–158508	158108	0.00067
154897–155696	155296	0	157909–158708	158308	0.00067
155097–155896	155496	0	158109–158908	158508	0.00067
155297–156096	155696	0	158309–159108	158708	0
155497–156296	155896	0.00054	158509–159308	158908	0
155697–156496	156096	0.00085	158709–159508	159108	0
155897–156708	156296	0.00085	158909–159708	159308	0
156097–156908	156496	0.00085	159109–159908	159508	0.00031
156297–157108	156708	0.00098	159309–160108	159708	0.00031
156497–157308	156908	0.00067	159509–160312	159908	0.00031
156709–157508	157108	0.00067	159709–160512	160108	0.00031
156909–157708	157308	0.00067	159909–160712	160312	0
157109–157908	157508	0	160109–160912	160512	0
157309–158108	157708	0	160313–160939	160625	0

王姗姗, 刘琦, 李玉, 王天瑞, 戴锡玲, Gregor Kozlowski, 许瑾, 宋以刚 (2026) 基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究：以枫杨属为例. 生物多样性, 34, 25475. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025475



附录4　基于17个枫杨属个体滑动窗口序列构建的最大似然系统发育树。自举支持率标注于各分支上。

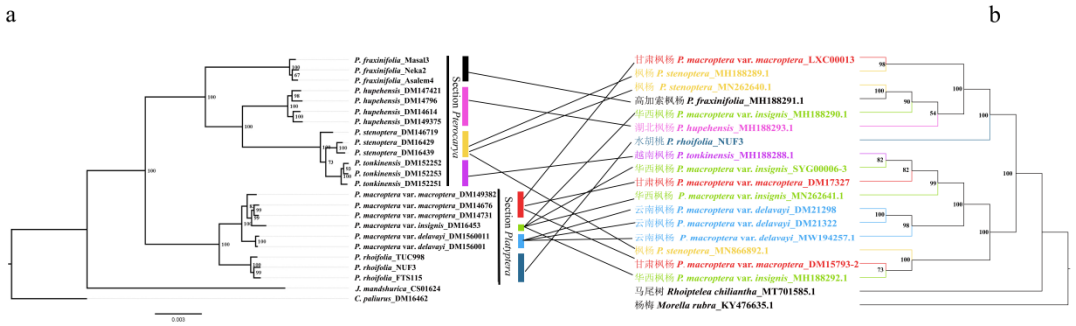
Appendix 4　Phylogenetic relationships of 17 *Pterocarya* individuals inferred using maximum likelihood analysis of sliding window sequences. Bootstrap support (BS) values are labeled at the branches



附录5　基于17个枫杨属个体的高变区*ndhF+ndhC–trnV-UAC*序列(a)和*ndhF+petA–psbJ*序列(b)分别构建的最大似然系统发育树

Appendix 5　Maximum likelihood phylogenetic tree constructed based on the hypervariable region *ndhF+ndhC–trnV-UAC* sequences (a) and *ndhF+petA–psbJ* sequences (b) from 17 *Pterocarya* individuals, respectively

王姗姗, 刘琦, 李玉, 王天瑞, 戴锡玲, Gregor Kozlowski, 许瑾, 宋以刚 (2026) 基于叶绿体基因组构建的系统发育关系应慎用于物种鉴定和生物地理学研究: 以枫杨属为例. 生物多样性, 34, 25475. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025475



附录6　基于RAD–seq数据对22个枫杨属个体和2个外群类群推断(a)和基于17个枫杨属个体的叶绿体全基因组序列重建(b)分别构建的系统发育树

Appendix 6　Phylogenetic tree inferred from RAD–seq data for 22 *Pterocarya* individuals and 2 outgroup taxa (a) and reconstructed from the complete chloroplast genome sequences of 17 *Pterocarya* individuals (b), respectively

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2026, 34 (5): 26003, pages 1–12
doi: 10.17520/biods.2026003
cstr: 32101.14.biods.2026003

•研究报告•

西南地区家鸡线粒体DNA控制区遗传多样性和基因渗入

贾晓旭[1], 陈皖强[1], 唐修君[1], 樊艳凤[1], 张静[1], 王海威[2*], 高玉时[1*]

1. 江苏省家禽科学研究所, 江苏扬州 225125; 2. 重庆市畜牧科学院, 重庆 402460

摘要: 我国西南地区是家鸡(*Gallus gallus*)遗传资源高度富集的重要区域。系统评估西南地区地方鸡的遗传多样性及外源血缘渗入状况, 对于维护家鸡遗传资源安全具有重要意义。本研究以重庆、四川、贵州、云南和西藏等地21个代表性地方鸡品种和常用商业鸡品种为研究对象, 对其线粒体DNA控制区(D-loop)全序列进行测序, 并开展遗传多样性、单倍型组成及母系血缘渗入分析。共获得1,146条完整D-loop序列, 总体单倍型多样度和核苷酸多样度分别为0.943和0.00699, 整体上表现出较高的多样性水平, 但不同品种间遗传多样性水平存在差异。大围山微型鸡和平武红鸡的Tajima's D值显著偏离中性, 提示其可能经历过选择作用或群体历史事件。共检测到70个多态性位点和105种单倍型, 可划分为A、B、C、D、E、F和G共7个单倍型类群, 其中A、B和E类群为优势类群。系统进化树和中介网络图分析表明, 各单倍型类群形成相对独立的谱系结构; 群体间亲缘关系与优势单倍型构成密切相关, 而与地理分布并不完全一致。部分单倍型在不同地区和品种间广泛共享, 反映出复杂的历史分化与基因交流过程。外来商业鸡种均属于E单倍型类群; 除茶花鸡和独龙鸡外, 其余地方鸡品种均检测到不同数量的E类群单倍型, 并与商业鸡种共享核心单倍型。部分群体中E类群比例偏高, 提示其母系遗传结构可能受到外源血缘影响。总体而言, 西南地区地方鸡仍保留了较为丰富的母系遗传变异。为维持其遗传多样性和谱系完整性, 建议加强保种群体规范化管理, 合理控制外来血缘比例。本研究为西南地区地方鸡遗传资源的科学保护与合理利用提供了重要的分子遗传学参考。

关键词: 西南地区; 地方鸡; 遗传多样性; 线粒体DNA; D-loop区

贾晓旭, 陈皖强, 唐修君, 樊艳凤, 张静, 王海威, 高玉时 (2026) 西南地区家鸡线粒体DNA控制区遗传多样性和基因渗入. 生物多样性, 34, 26003. doi: 10.17520/biods.2026003; cstr: 32101.14.biods.2026003.

Jia XX, Chen WQ, Tang XJ, Fan YF, Zhang J, Wang HW, Gao YS (2026) Genetic diversity and gene introgression of mitochondrial DNA control region in indigenous chickens from Southwest China. Biodiversity Science, 34, 26003. doi: 10.17520/biods.2026003; cstr: 32101.14.biods.2026003.

Genetic diversity and gene introgression of mitochondrial DNA control region in indigenous chickens from Southwest China

Xiaoxu Jia[1], Wanqiang Chen[1], Xiujun Tang[1], Yanfeng Fan[1], Jing Zhang[1], Haiwei Wang[2*], Yushi Gao[1*]

1 *Jiangsu Institute of Poultry Science, Yangzhou, Jiangsu 225125, China*
2 *Chongqing Academy of Animal Sciences, Chongqing 402460, China*

ABSTRACT

Aims: Southwest China is characterized by complex topography, diverse ecological conditions, and abundant indigenous chicken genetic resources. This study aims to systematically evaluate the genetic diversity of local chicken populations in this region, together with potential introgression from exotic commercial breeds, as this is essential for the conservation and sustainable utilization of these valuable genetic resources.

Methods: In this study, 21 representative indigenous chicken breeds from Chongqing, Sichuan, Guizhou, Yunnan, and Xizang, together with commonly used commercial chicken breeds, were investigated. The complete mitochondrial DNA control region (D-loop) was amplified and sequenced, and the resulting sequences were used to assess genetic

收稿日期 Received: 2026-01-04; 接受日期 Accepted: 2026-04-03
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1200302)和国家自然科学基金(32372869) Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1200302) and National Natural Science Foundation of China (32372869)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: wahwe@163.com; gaoys100@sina.com

diversity, haplotype composition, phylogenetic relationships, and potential maternal introgression from commercial breeds.
Results: A total of 1,146 complete D-loop sequences were obtained. The overall haplotype diversity (Hd) and nucleotide diversity (Pi) were 0.943 and 0.00699, respectively, indicating a relatively high level of maternal genetic diversity across indigenous chicken populations in Southwest China, although diversity differed among breeds. Tajima's D values for Daweishan mini chicken and Pingwu red chicken deviated significantly from neutrality, suggesting possible selection or demographic events. In total, 70 polymorphic sites and 105 haplotypes were identified, which were assigned to seven haplogroups (A, B, C, D, E, F, and G), with haplogroups A, B, and E being dominant. Phylogenetic and median-joining network analyses showed that the haplogroups formed relatively independent lineages, and that the genetic relationships among populations were more closely associated with dominant haplotype composition than with geographic distribution. Several haplotypes were widely shared among breeds and regions, indicating complex historical differentiation and gene flow. All commercial breeds belonged to haplogroup E. Except for Chahua chicken and Dulong chicken, all indigenous breeds contained varying proportions of haplogroup E haplotypes and shared core haplotypes with commercial breeds. In several populations, the proportion of haplogroup E was relatively high, suggesting possible maternal introgression from exotic lineages.
Conclusion: Indigenous chickens in Southwest China still retain abundant maternal genetic variation overall. However, the elevated proportion of haplogroup E in some populations indicates that maternal genetic structure may have been influenced by exogenous commercial lineages. Strengthening the standardized management of conservation populations and carefully regulating the introduction of exotic bloodlines will therefore be important for maintaining genetic diversity and lineage integrity. These findings provide an important molecular genetic basis for the scientific conservation and rational utilization of indigenous chicken resources in Southwest China.
Key words: Southwest China; indigenous chickens; genetic diversity; mitochondrial DNA; D-loop region

我国西南地区地处青藏高原、横断山区及云贵高原交汇区域, 地形地貌复杂、生态类型多样, 是我国乃至全球生物多样性最为丰富的地区之一(王麒淋等, 2021)。西南地区尤其是云南及其周边区域, 被认为是家鸡早期驯化活动的重要区域之一(Wang et al., 2020), 目前仍分布有不同亚种的红原鸡(*Gallus gallus*), 为研究家鸡驯化与母系谱系形成提供了重要的野生基因库资源。复杂的自然地理环境和相对封闭的区域条件在一定程度上限制了不同群体间的基因交流, 使得当地家禽种群在长期自然选择和人工选择的共同作用下, 形成了丰富的遗传多样性和独特的遗传结构。例如, 云南、贵州等地地方鸡种质资源丰富, 在形态特征、生产性能和生态适应性方面均表现出明显差异; 西藏高原特殊的低氧和低温环境塑造了藏鸡独特的高原适应性特征(黄涛等, 2025)。然而, 随着现代集约化养殖和商业化育种体系的发展, 高产型商业鸡种的大规模推广使部分地方品种逐渐被培育品种或杂交种替代, 导致群体数量下降甚至消失, 品种资源流失(束婧婷等, 2023)。因此, 科学评估地方鸡种的遗传多样性水平及其群体遗传结构, 对于制定合理的保护与利用策略具有重要意义。

线粒体DNA (mitochondrial DNA, mtDNA)具有母系遗传、拷贝数高、进化速率快且基本不发生重组等特点, 是研究动物起源、群体遗传结构和系统发育关系的理想工具(Storey et al., 2012)。其中, 线粒体控制区(D-loop)不编码蛋白质, 但能够累积大量变异, 是线粒体基因组中进化速率最快的区域之一。已有研究基于D-loop区序列揭示了家鸡起源的多中心特征, 并将全球家鸡线粒体单倍型划分为多个类群(A–I和W–Z), 认为南亚、东南亚及中国南部地区在家鸡驯化过程中发挥了重要作用(Liu et al., 2006; Miao et al., 2013)。后续研究在不同地区和不同鸡种中进一步验证了这一分类体系(Gao et al., 2017; 贾晓旭等, 2017), 并发现中国西南地区在G类群分布上具有一定的区域特异性(Ran et al., 2023)。值得注意的是, 利用单倍型比例评估商业品种对地方鸡的渗入程度时, 有研究发现E单倍型占主导地位(Sha et al., 2020)。此外, 针对不同生长速度肉鸡品种的研究同样发现, E单倍型在817肉鸡和所有中速/快速型肉鸡品种中占优势(Tang et al., 2023)。

近年来, 随着全基因组测序技术的快速发展, 关于家鸡起源与扩散的研究框架不断更新。Wang等(2020)基于全基因组数据提出, 家鸡最初源自红原鸡滇南亚种(*Gallus gallus spadiceus*), 该亚种主

要分布于中国西南部、泰国北部和缅甸, 并强调家鸡驯化过程具有明显的区域性与阶段性特征, 在驯化之后, 家鸡被迁移至东南亚和南亚, 并与不同红原鸡亚种及其他原鸡物种发生了本地杂交。Peters等(2022)结合考古证据, 将家鸡骨骼最早出现时间推定为约公元前1650–1250年的泰国中部, 并指出水稻(*Oryza sativa*)和小米(*Setaria italica*)种植的兴起可能为家鸡驯化提供了关键驱动力。Xu等(2025)则基于全基因组数据检测到原鸡向斗鸡的基因渗入事件及其相关基因, 为原鸡对斗鸡遗传多样性的贡献提供了证据。Huang等(2023)通过完整家鸡基因组组装, 进一步揭示了家鸡进化过程中的基因组结构变异和选择信号。总体来看, 这些研究主要从核基因组层面解析了原鸡到家鸡的宏观起源与扩散模式, 为理解家鸡驯化历史提供了重要视角。

我国地方品种鸡大多为有色羽, 包括黄羽、麻羽、红羽和黑羽等类型。在改良过程中, 通常以携带隐性白羽等位基因的引进鸡种作为母系, 与地方品种进行杂交, 以提升其生长和繁殖性能。改良后的品种在保留地方品种外貌特征的同时, 生产性能得到显著提高。然而, 这类改良品种的血缘渗入情况无法仅凭外貌特征直接判断, 仍需借助分子遗传学手段进行解析。目前, 相关研究多基于核基因组分析群体整体遗传构成, 但由于核基因组具有双亲遗传和重组特性, 在追踪特定亲本来源、尤其是母系渗入方面存在一定局限(Zhang et al., 2019; Xu et al., 2023)。相比之下, 线粒体基因组具有母系遗传、结构简单和进化速率适中等特点, 能够更清晰地追溯母系血缘来源(贾晓旭等, 2017)。

线粒体DNA是位于细胞核外的遗传物质, 具有严格的母系遗传特性, 可作为“母系血缘示踪剂”从微观层面揭示群体历史动态、母系谱系结构及区域遗传组成。然而, 现有研究在样本覆盖范围、测序片段长度以及单倍型划分标准等方面仍存在差异。例如, 仅采用D-loop区部分片段进行分析(黄勋和等, 2022; Li et al., 2024), 以及公共数据库中部分历史测序数据受限于测序技术和序列质量(Shi et al., 2014), 均不利于不同研究之间的平行比较分析(黄勋和等, 2022)。基于此, 本研究以我国西南地区21个代表性地方鸡品种为研究对象, 对其线粒体DNA D-loop区全序列进行测定与分析, 系统评估其遗传多样性、群体遗传结构及系统进化关系, 并结合常用商业鸡品种, 探讨引进品种母系血缘对地方鸡的潜在渗入情况, 以期为西南地区地方鸡遗传资源的科学保护、合理利用及育种策略制定提供分子遗传学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究的21个地方鸡品种样本主要来源于当地保种场, 其中藏鸡除采集自西藏自治区山南市群体外, 还采集了国家级地方鸡种基因库(江苏)保存的群体, 各鸡种相关信息见表1。为检测地方群体受到国外血缘渗入的程度, 本研究同时采集了国内常用于生长性能遗传改良的隐性白羽鸡、用于产蛋性能遗传改良的洛岛白鸡, 以及引入外血改良后的茶花鸡配套系(父本为茶花鸡, 母本为隐性白羽鸡), 样品分别来自新广农牧有限公司、河北容德家禽育种有限公司和昆明云岭广大种禽饲料有限公司。采用翅静脉采血, 使用血液基因组DNA提取试剂盒(北京天根生化科技有限公司)提取DNA, 具体流程参照产品说明书进行。提取的DNA经1.2%琼脂糖凝胶电泳(美国Invitrogen公司)检测完整性, 并通过凝胶成像系统(北京君意东方电泳设备有限公司)观察结果; 质量检测合格后, 于–20℃保存。为避免批次效应影响, 所有样本后续处理均采用统一流程完成。

1.2 实验方法

PCR扩增引物参考Jia等(2016), 上游引物为5′-AAACACCCAAACTCACTAAC-3′, 下游引物为5′-CACTGGGATGCGGATACTTGC-3′。PCR扩增体系(50 μL)包括: 2 × PCR Master Mix (南京诺唯赞生物科技有限公司) 25 μL, 10 μmol/L上下游引物各1 μL, 模板DNA 2 μL (50–100 ng), 以灭菌水补足至50 μL。PCR扩增条件为: 95℃预变性5 min; 随后进行35个循环, 每个循环包括95℃变性30 s、56℃退火30 s和72℃延伸30 s; 最后在72℃延伸7 min, 4℃保存。PCR扩增产物经1.2%琼脂糖凝胶电泳检测后, 选择扩增效果良好的样本送至上海生工生物工程股份有限公司进行双向测序。

1.3 数据处理和分析

使用Clustal X 2.1 (Larkin et al., 2007)对21个地方鸡品种样本的D-loop区全序列进行同源性比对。

表1　本研究的鸡品种和相关信息
Table 1　List of chicken breeds and relevant information in this study

品种 Breed	代号 Code	产地 Origin	样本量 Sample size
矮脚鸡 Aijiao chicken	AJ	贵州省兴义市 Xingyi City, Guizhou Province	61
茶花鸡 Chahua chicken	CH	云南省西双版纳傣族自治州 Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture, Yunnan Province	30
城口山地鸡 Chengkou mountain chicken	CK	重庆市城口县 Chengkou County, Chongqing Municipality	72
长顺绿壳蛋鸡 Changshun blue-eggshell chicken	CS	贵州省长顺县 Changshun County, Guizhou Province	55
独龙鸡 Dulong chicken	DL	云南省贡山县 Gongshan County, Yunnan Province	30
大宁河鸡 Daninghe chicken	DN	重庆市巫溪县 Wuxi County, Chongqing Municipality	62
大围山微型鸡 Daweishan mini chicken	DW	云南省屏边县 Pingbian County, Yunnan Province	60
金阳丝毛鸡 Jinyang silky chicken	JY	四川省金阳县 Jinyang County, Sichuan Province	60
兰坪绒毛鸡 Lanping silky chicken	LP	云南省兰坪县 Lanping County, Yunnan Province	30
南川鸡 Nanchuan chicken	NC	重庆市南川区 Nanchuan District, Chongqing Municipality	60
瓢鸡 Piao chicken	PJ	云南省镇沅县 Zhenyuan County, Yunnan Province	48
平武红鸡 Pingwu red chicken	PW	四川省平武县 Pingwu County, Sichuan Province	19
彭县黄鸡 Pengxian yellow chicken	PX	四川省彭州市 Pengzhou City, Sichuan Province	64
黔东南小香鸡 Qiandongnan xiaoxiang chicken	QD	贵州省黔东南自治州 Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, Guizhou Province	61
藏鸡(山南市) Tibetan chicken (Shannan City)	SN	西藏自治区山南市 Shannan City, Xizang Autonomous Region	62
石柱绿壳蛋鸡 Shizhu blue-eggshell chicken	SZ	重庆市石柱县 Shizhu County, Chongqing Municipality	60
武隆凤头黑鸡 Wulong black crested chicken	WL	重庆市武隆区 Wulong District, Chongqing Municipality	60
秀山鸡 Xiushan chicken	XS	重庆市秀山县 Xiushan County, Chongqing Municipality	92
盐津乌骨鸡 Yanjin black-bone chicken	YJ	云南省昭通市 Zhaotong City, Yunnan Province	59
云龙矮脚鸡 Yunlong aijiao chicken	YL	云南省云龙县 Yunlong County, Yunnan Province	19
增福土鸡 Zengfu chicken	ZF	重庆市涪陵区 Fuling District, Chongqing Municipality	62
藏鸡(基因库) Tibetan chicken (National Chicken Genetic Resources)	ZJ	国家地方鸡种基因库(江苏) National Chicken Genetic Resources (Jiangsu)	20

利用DnaSP 6.12.03 (Rozas et al., 2017)软件统计单一突变位点(singleton variable sites)、简约信息位点(parsimony informative sites)、多态位点数(number of polymorphic sites, S)、单倍型数(number of haplotypes, h)、核苷酸多样度(nucleotide diversity, Pi)、单倍型多样度(haplotype diversity, Hd)、核苷酸平均差异数(average number of nucleotide differences, K)以及Tajima's D中性检验结果。按照鸡mtDNA单倍型分类的通用标准(Miao et al., 2013), 使用MitoToolPy (Peng et al., 2015)脚本完成单倍型类群划分。使用MEGA 11.0.13 (Tamura et al., 2021)软件统计平均碱基组成、转换与颠换数目以及品种间和品种内遗传距离; 遗传距离采用最大似然法(maximum likelihood, ML)计算, 系统进化树采用邻接法(neighbor-joining, NJ)构建。使用PopART 1.7 (Leigh & Bryant, 2015)软件构建中介网络图(median-joining)分析单倍型间的进化关系。另从NCBI数据库下载已发表的西南地区地方鸡品种线粒体序列, 作为补充数据进行对比分析, NCBI数据库登录号见附录1。PCR产物经过纯化、测序、拼接和校对后, 共获得1,146条完整的线粒体D-loop区序列。所有数据已存储于科学数据银行(Science DB, https://doi.org/10.57760/sciencedb.39826)。

2　结果

2.1　地方鸡mtDNA D-loop区序列组成及变异

序列比对结果显示, 在859 bp处存在C碱基缺失。22个地方鸡群体共检测到70个变异位点, 其中核苷酸二态性突变64个, 包括单一位点突变9个(168、223、228、237、291、294、298、313、458)和简约信息位点55个(133、167、190、199、207、210、212、217、220、221、222、225、234、236、

238、239、240、242、243、246、254、261、265、280、281、286、302、303、306、315、317、330、342、344、354、355、358、360、361、362、363、367、370、372、396、446、447、521、586、686、711、792、904、1214、1215); 核苷酸三态性突变6个, 均为简约信息位点(252、256、296、310、322、391)。变异区在133–1,215 bp之间, 其中T-C转换42处、A-G转换20处, 仅有2处颠换(A-C和A-T)。三核苷酸突变模式包括5处A-C-T突变和1处A-G-T突变。碱基组成统计显示, 21个品种的T、C、A和G平均含量分别为33.5%、26.5%、26.6%和13.4%, 其中A + T平均含量为60.1%, 明显高于C + G平均含量(39.9%)。

2.2 地方鸡遗传多样性和单倍型分析

各地方鸡群体的线粒体遗传多样性指标见表2。22个地方鸡群体检测到的多态位点数介于9–41个, 单倍型数为3–33个, 单倍型多样度(Hd)范围为0.476–0.939, 核苷酸多样度(Pi)范围为0.00202–0.00796。秀山鸡、增福土鸡、城口山地鸡和藏鸡(山南市)的单倍型多样度均高于0.900, 表现出较高的线粒体遗传多样性; 而茶花鸡的单倍型多样度低于0.500, 遗传多样性相对较低。瓢鸡、大围山微型鸡和秀山鸡的核苷酸多样度较高(Pi > 0.00700), 平武红鸡和石柱绿壳蛋鸡的核苷酸多样度较低(Pi < 0.00300)。对于采自两个群体的藏鸡, 原产地(山南市)群体的单倍型多样度和核苷酸多样度均高于基因库保存群体。Tajima's D中性检验结果显示, 大围山微型鸡的Tajima's D值为2.783, 极显著大于0, 表明其群体可能经历平衡选择或群体收缩; 平武红鸡的Tajima's D值为–1.857, 显著小于0, 表明其群体可能经历瓶颈后的扩张或者群体分化。其余群体的Tajima's D值均未达到显著水平。

表2 22个地方鸡群体线粒体DNA D-loop区的遗传多样性

Table 2 Genetic diversity of mtDNA D-loop in the 22 indigenous chicken populations

品种 Breed	多态位点数 S	单倍型数 Number of haplotypes	单倍型类群比例 Percentage of haplogroups (%)	单倍型多样度 Hd	核苷酸多样度 Pi	平均核苷酸差异 K	Tajima's D
AJ	25	7 (A = 2, E = 2, F = 2, G = 1)	A (15), E (67), F (13), G (5)	0.595	0.00446	5.484	0.085
CH	9	3 (A = 1, B = 2)	A (70), B (30)	0.476	0.00301	3.703	1.958
CK	31	17 (A = 11, B = 1, C = 1, D = 1, E = 3)	A (67), B (3), C (1), D (3), E (26)	0.923	0.00516	6.349	–0.122
CS	24	10 (A = 2, B = 2, C = 2, E = 4)	A (7), B (11), C (6), E (76)	0.838	0.00414	5.096	–0.091
DL	23	4 (A = 1, B = 2, F = 1)	A (47), B (50), F (3)	0.674	0.00440	5.411	–0.240
DN	25	11 (A = 2, B = 4, C = 1, E = 4)	A (3), B (65), C (5), E (27)	0.740	0.00507	6.230	0.540
DW	24	7 (A = 1, B = 3, D = 1, E = 1, F = 1)	A (13), B (33), D (5), E (7), F (42)	0.777	0.00786	9.665	2.783**
JY	31	12 (A = 4, B = 2, E = 3, F = 1, G = 2)	A (28), B (27), E (7), F (3), G (35)	0.840	0.00693	8.530	0.921
LP	27	11 (B = 1, E = 2, F = 4, G = 4)	B (3), E (10), F (60), G (27)	0.848	0.00564	6.940	0.066
NC	28	20 (A = 7, B = 6, C = 3, E = 2, G = 2)	A (45), B (32), C (8), E (12), G (3)	0.891	0.00563	6.921	0.246
PJ	30	13 (A = 3, B = 2, E = 2, F = 3, G = 3)	A (31), B (8), E (15), F (23), G (23)	0.877	0.00796	9.788	1.347
PW	17	8 (A = 7, E = 1)	A (95), E (5)	0.836	0.00202	2.480	–1.857*
PX	23	8 (A = 2, B = 2, C = 2, E = 2)	A (61), B (3), C (6), E (30)	0.589	0.00467	5.750	0.569
QD	24	11 (A = 1, B = 5, C = 1, E = 4)	A (8), B (31), C (7), E (54)	0.846	0.00593	7.299	1.339
SN	28	19 (A = 5, B = 3, C = 6, D = 2, E = 3)	A (29), B (8), C (13), D (23), E (27)	0.911	0.00674	8.292	1.253
SZ	19	7 (A = 4, B = 1, E = 2)	A (83), B (2), E (15)	0.577	0.00262	3.225	–0.642
WL	19	11 (A = 6, B = 3, E = 2)	A (68), B (7), E (25)	0.854	0.00430	5.291	0.920
XS	41	33 (A = 9, B = 11, C = 9, D = 1, E = 3)	A (22), B (30), C (35), D (2), E (11)	0.939	0.00706	8.680	0.167
YJ	35	14 (A = 4, B = 1, C = 1, E = 6, F = 1, G = 1)	A (27), B (2), C (3), E (59), F (7), G (2)	0.875	0.00540	6.648	–0.387
YL	25	8 (A = 2, B = 1, C = 1, E = 4)	A (21), B (5), C (5), E (68)	0.860	0.00477	5.871	–0.702
ZF	29	19 (A = 7, B = 6, C = 4, E = 1, G = 1)	A (52), B (34), C (7), E (3), G (5)	0.927	0.00523	6.433	0.023
ZJ	18	4 (A = 1, B = 2, E = 1)	A (40), B (55), E (5)	0.658	0.00451	5.542	0.347

品种全称见表1。A、B、C、D、E、F和G表示7个单倍型类群。Tajima's D: Tajima's D值。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$。

The full names of the breeds are shown in Table 1. A, B, C, D, E, F, and G represent seven haplotypes. S, Number of polymorphic sites; Hd, Haplotype diversity; Pi, Nucleotide diversity; K, Average number of nucleotide differences; Tajima's D, Tajima's D value. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

在1,146个个体中共检测到105种单倍型, 可划分为A、B、C、D、E、F和G共7个单倍型类群, 分别包括36、21、14、5、11、8和10个单倍型, 对应416、225、67、21、299、69和49个个体。A类群中有13个单倍型仅检测到1个个体, B类群中有12个单倍型为单次出现单倍型。各单倍型的多态位点组成、数量及其在品种间的分布见附录1。从品种层面看, 大多数地方鸡群体分布于4–5个单倍型类群, 但不同品种的优势类群存在明显差异。茶花鸡、城口山地鸡、平武红鸡、彭县黄鸡、石柱绿壳蛋鸡和武隆凤头黑鸡以A类群为主; 大宁河鸡以B类群为主; 矮脚鸡、长顺绿壳蛋鸡和云龙矮脚鸡以E类群为主; 兰坪绒毛鸡以F类群为主, 且上述品种对应的主要类群占比均不低于60.0%。平武红鸡仅检测到A和E两个类群, 其中A类群个体占比达94.7% (n = 18), 分布在7个单倍型中, 仅发现1个E单倍型个体。从单倍型分布来看, A1和E1单倍型分别包含16个和17个品种, 个体数明显高于其他单倍型; B类群中B1–B4单倍型的品种分布相对均匀, 品种数均在9个以上; D类群的5个单倍型均为品种特异单倍型; E2单倍型包含15个品种, 是一种常见单倍型。

2.3 系统进化树和中介网络图分析

为了研究西南地区22个地方鸡群体之间的进化关系, 基于群体之间的平均遗传距离, 使用邻接法构建系统进化树(图1), 结果显示西南地区地方鸡群体可分为若干分支, 各分支与其主要单倍型类群组成具有较高一致性。兰坪绒毛鸡与其他品种的遗传距离相对较远, 在系统进化树上与大围山微型鸡和瓢鸡聚为一支, 该分支中F类群单倍型占比较高。独龙鸡、藏鸡(基因库)、茶花鸡、增福土鸡和南川鸡聚为一支, 以A和B类群单倍型为主。彭县黄鸡、城口山地鸡、武隆凤头黑鸡、平武红鸡和石柱绿壳蛋鸡聚为一支, A和E类群单倍型占比较高, 其中A类群均超过60.0%。盐津乌骨鸡、云龙矮脚鸡、长顺绿壳蛋鸡和矮脚鸡聚为一支, 该分支中E类群单倍型比例较高(59.3%–76.4%)。秀山鸡和藏鸡(山南市)的3个类群分布相对均衡, 黔东南小香鸡则以B和E类群占比较大, 金阳丝毛鸡的A、B和G类群分布相对均衡, 且B类群与大宁河鸡共享, 这些品种在系统进化树中位于上述分支之间。

基于105种单倍型构建的中介网络图显示(图2), 不同单倍型类群在网络中形成相对独立的聚集结构。A、C、E、F和G类群分别以A1、C1、E1、F1



图1 基于线粒体DNA D-loop区全序列采用邻接(NJ)法构建的22个地方鸡群体的系统进化树
Fig. 1 Neighbor-joining (NJ) tree among 22 domestic chicken populations from mtDNA complete D-loop sequence

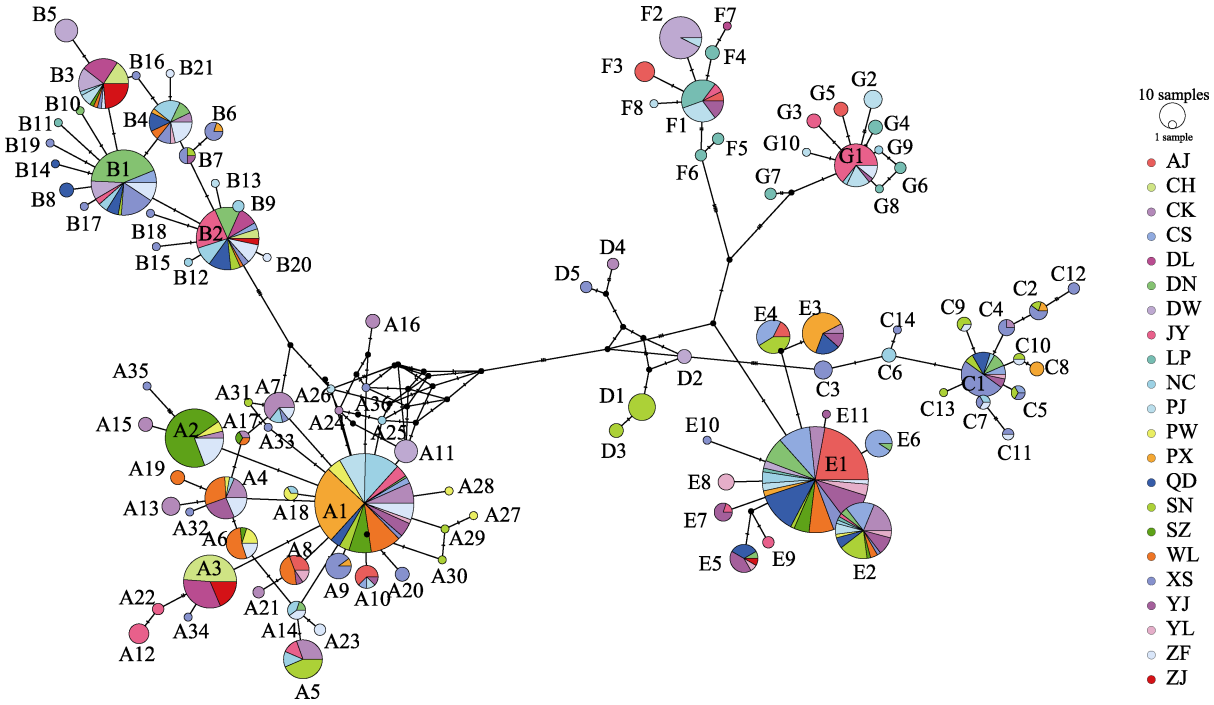


图2　基于线粒体DNA D-loop单倍型构建的中介网络图。圆的大小对应于单倍型频率，不同鸡品种用不同颜色标注。单倍型编号(A1–G10)见附录1。黑点为中介假点。AJ: 矮脚鸡; **CH**: 茶花鸡; **CK**: 城口山地鸡; **CS**: 长顺绿壳蛋鸡; **DL**: 独龙鸡; **DN**: 大宁河鸡; **DW**: 大围山微型鸡; **JY**: 金阳丝毛鸡; **LP**: 兰坪绒毛鸡; **NC**: 南川鸡; **PJ**: 瓢鸡; **PW**: 平武红鸡; **PX**: 彭县黄鸡; **QD**: 黔东南小香鸡; **SN**: 藏鸡(山南市); **SZ**: 石柱绿壳蛋鸡; **WL**: 武隆凤头黑鸡; **XS**: 秀山鸡; **YJ**: 盐津乌骨鸡; **YL**: 云龙矮脚鸡; **ZF**: 增福土鸡; **ZJ**: 藏鸡(基因库)。

Fig. 2　Median network profile of the mtDNA D-loop haplotypes observed in the present study. The circle sizes are proportional of the haplotype frequencies. Different shades of the circles correspond to distinct populations. Haplotype numbers (A1–G10) see Appendix 1. Black dots are the intermediate hypothetical points. AJ, Aijiao chicken; CH, Chahua chicken; CK, Chengkou mountain chicken; CS, Changshun blue-eggshell chicken; DL, Dulong chicken; DN, Daninghe chicken; DW, Daweishan mini chicken; JY, Jinyang silky chicken; LP, Lanping silky chicken; NC, Nanchuan chicken; PJ, Piao chicken; PW, Pingwu red chicken; PX, Pengxian yellow chicken; QD, Qiandongnan xiaoxiang chicken; SN, Tibetan chicken (Shannan city); SZ, Shizhu blue-eggshell chicken; WL, Wulong fengyu chicken; XS, Xiushan chicken; YJ, Yanjin black-bone chicken; YL, Yunlong aijiao chicken; ZF, Zengfu chicken; ZJ, Tibetan chicken (National Chicken Genetic Resources).

和G1单倍型为中心节点，B类群则以B1和B2单倍型为中心，周围单倍型呈放射状分布。这些中心单倍型在各自类群中的个体数最多，网络结构呈现明显的衍生关系，可能是祖先单倍型。D类群单倍型之间主要通过中介假点连接，未形成清晰的辐射结构。不同单倍型类群之间同样通过多个中介假点相连，其中A类群相关区域的中介假点结构较为复杂，说明该处的线粒体谱系存在复杂的进化历史，可能存在未采样到的关键单倍型或分化群体的混合。

2.4　外来品种单倍型分析

为评估外来商业鸡品种对西南地区地方鸡母系遗传组成的潜在影响，本研究以线粒体共享单倍型为参考，对隐性白羽鸡、洛岛白鸡以及茶花鸡配套系的遗传多样性和单倍型组成进行了分析(表3)。由于线粒体DNA遵循母系遗传，茶花鸡配套系的母本来源于隐性白羽鸡，其线粒体单倍型组成应与隐性白羽鸡一致。结果表明，隐性白羽鸡和茶花鸡配套系群体均仅检测到1个多态位点，位于199 bp处，共鉴定出2种单倍型，遗传多样性水平均较低。其中，茶花鸡配套系的单倍型多样度和核苷酸多样度分别为0.153和0.00012，均低于隐性白羽鸡。洛岛白鸡群体检测到4个多态位点，鉴定出3种单倍型，其单倍型多样度和核苷酸多样度分别为0.573和0.00163。洛岛白鸡的Tajima's D值显著大于0，表明其可能存在平衡选择，这与实际的商业育种改良需求相符。

在单倍型类群组成方面，隐性白羽鸡、洛岛白鸡和茶花鸡配套系均隶属于E单倍型类群。隐性白

羽鸡检测到E1和E2两个单倍型, 洛岛白鸡检测到E1、E3和E5 3个单倍型。结合中介网络分析结果, E1与E2单倍型直接相连, 而E3和E5单倍型与E1单倍型之间则通过中介假点连接, 显示出E类群内部的谱系关系, 也说明洛岛白鸡与隐性白羽鸡在外来血缘渗入分析中具有一定的区分价值。将外来品种单倍型与地方鸡群体进行对比后发现, 在本研究涉及的地方鸡品种中, 茶花鸡和独龙鸡未检测到E类群单倍型; 藏鸡(基因库)未检测到E1和E2单倍型; 其余地方鸡品种中均检测到不同数量的E1或E2单倍型, 个体数范围为1–38个, 其中矮脚鸡中E类群个体数最多。此外, 共有7个地方鸡品种检测到1–16个E3或E5单倍型, 其中彭县黄鸡的E3或E5单倍型个体数相对较多。

2.5 NCBI数据库单倍型分析

为进一步验证本研究结果的代表性和稳定性, 从NCBI数据库下载了西南地区11个地方鸡品种的线粒体D-loop区序列数据进行对比分析。各品种的序列数介于12–67条之间, 共获得398条序列。不同品种序列长度存在差异, 其中8条序列长度超过1,200 bp, 其余390条序列长度约为500 bp, 主要覆盖D-loop区前段区域。尽管序列长度不一致, 但这些片段包含主要多态性位点, 仍能够较为准确地进行单倍型类群划分。因此, 本研究仅对其单倍型类群组成进行分析, 结果见表4。398条数据库序列可划分为A、B、C、E、F和G共6个单倍型类群, 分别包含129、76、14、92、51和36条序列, 其中F和G类群所占比例高于本研究样本; E类群在11个品种

表3 外来鸡品种及茶花鸡配套系线粒体DNA D-loop区遗传多样性统计

Table 3 Genetic diversity of mtDNA D-loop in foreign chicken breeds and Chahua chicken strain

品种 Breed	样本量 Sample size	多态位点数 S	单倍型(个体数) Haplotype (individuals)	单倍型多样度 Hd	核苷酸多样度 Pi	Tajima's D
隐性白羽鸡 Recessive white feather chicken	30	1	E1 (22), E2 (8)	0.405	0.00033	0.940
洛岛白鸡 Rhode island white chicken	40	4	E1 (3), E3 (21), E5 (16)	0.573	0.00163	2.710**
茶花鸡 × 隐性白羽鸡 Chahua chicken × Recessive white feather chicken	25	1	E1 (23), E2 (2)	0.153	0.00012	–0.698

Tajima's D: Tajima's D值。S, Number of polymorphic sites; Hd, Haplotype diversity; Pi, Nucleotide diversity; Tajima's D, Tajima's D value. ** $P < 0.01$.

表4 NCBI数据库中西南地区地方鸡单倍型类群分布

Table 4 Distribution of haplogroups in local chickens in Southwest China from NCBI database

产地 Origin	品种 Breed	序列数 Number of sequences	单倍型类群个体数 Haplogroup individuals					
			A	B	C	E	F	G
贵州省乌蒙山区 Wumengshan District, Guizhou Province	乌蒙乌骨鸡 Wumeng black-bone chicken	16	1	10		5		
贵州省赤水市 Chishui City, Guizhou Province	竹乡鸡 Zhuxiang chicken	32	3	12	3	14		
四川省达州市 Dazhou City, Sichuan Province	旧院黑鸡 Jiuyuan black chicken	40	32			7		1
四川省米易县 Miyi County, Sichuan Province	米易鸡 Miyi chicken	39	11		3	11		14
四川省兴文县 Xingwen County, Sichuan Province	四川山地乌骨鸡 Sichuan mountain black-bone chicken	12	3	1	3	5		
四川省石棉县 Shimian County, Sichuan Province	石棉草科鸡 Shimian caoke chicken	63	19	10	2	32		
云南省西双版纳傣族自治州 Xishuangbanna, Yunnan Province	西双版纳斗鸡 Xishuangbanna game chicken	42	17	16	1	3	3	2
云南省迪庆藏族自治州 Diqing Tibetan Autonomous Prefecture, Yunnan Province	尼西鸡 Nixi chicken	26	3	5		2	9	7
云南省马龙县 Malong County, Yunnan Province	深沟鸡 Shengou chicken	16		3		1	12	
云南省保山市 Baoshan City, Yunnan Province	腾冲雪鸡 Tengchong white chicken	45	14	3		2	23	3
云南省武定县 Wuding County, Yunnan Province	武定鸡 Wuding chicken	67	26	16	2	10	4	9

中均有分布, 而未检测到D类群单倍型。在本研究中的D类群比例也是最低的, 表明D类群在西南地区分布总体较少。从地区分布来看, 云南地方鸡品种的单倍型类群组成相对更为丰富。西双版纳斗鸡和武定鸡在6个单倍型类群中均有分布, 显示出较高的线粒体谱系多样性。总体而言, NCBI数据库分析结果与本研究样本中西南地区地方鸡单倍型类群的整体分布特征基本一致。

3 讨论

西南地区位于我国西南山地与印度-缅甸两个全球生物多样性热点的交汇区域, 复杂的地形条件和多样的生态环境在一定程度上限制了种群间的频繁基因交流, 有利于遗传分化和多样性的形成与维持(陈文华和徐娟, 2023)。家鸡由红原鸡滇南亚种驯化而来, 而该亚种主要分布在中国西南、泰国北部和缅甸等地区, 说明该区域很可能是家鸡的重要驯化中心(Wang et al., 2020)。为全面揭示这一驯化中心家鸡种群的遗传特征, 研究者们采用微卫星标记(王转运等, 2023)、简化基因组测序(尤桂爽等, 2022)和SNP芯片技术(周晓红等, 2024)等多种分子标记手段, 从不同层面丰富了对该地区地方鸡遗传资源的认识。与上述核基因组标记不同, 线粒体DNA为母系单系遗传, 不发生重组, 进化速率较快, 能够更清晰地追溯母系起源、重建种群的母系演化路径, 并有效识别历史上的母系基因渗入事件。贾晓旭等(2021a)通过比较丝羽乌骨鸡和竹丝鸡的线粒体单倍型组成, 从遗传学角度证实, 竹丝鸡配套系是以丝羽乌骨鸡为父本、国外快大型肉鸡为母本经杂交选育而成。本研究中, 已知遗传背景的茶花鸡配套系同样通过线粒体标记验证了其母系来源并非茶花鸡。对于以外来血缘为父本、遗传背景更为复杂的群体, 仅依赖线粒体标记进行区分仍具有一定局限, 后续还需结合微卫星、SNP芯片或全基因组重测序数据进行综合验证。

不同样本来源、采样时间、样本量或分子标记长度差异, 均可能影响不同研究之间的平行比较。前人研究在评估地方黄鸡品种遗传多样性时, 通常采用统一的D-loop标记长度(黄勋和等, 2022)。因此, 本研究在统一时间窗口内采集样本, 并基于统一的线粒体D-loop全序列长度, 系统分析了西南地区21个地方鸡品种的遗传多样性水平。结果显示, 该区域地方鸡整体具有较高的单倍型多样度和核苷酸多样度。与我国其他地区已报道的地方鸡群体相比, 如广西(Liao et al., 2016)、江西(Gao et al., 2017)、华东(贾晓旭等, 2017)、广东(黄勋和等, 2018; 李莹等, 2022)和浙江(张嘉文等, 2024), 本研究总体单倍型多样度和核苷酸多样度分别为0.943和0.00699, 处于较高水平。同时, 部分品种如石柱绿壳蛋鸡、平武红鸡和武隆凤头黑鸡, 还未见相关的遗传多样性报道。西南地区地方鸡仍然保留了相对丰富的母系遗传变异, 是我国地方鸡遗传资源的重要组成部分。部分品种如秀山鸡、城口山地鸡和藏鸡(山南市)具有较高的单倍型多样度, 而茶花鸡的单倍型多样度相对较低(< 0.500), 这可能与建群者效应、小样本建群以及长期保持较原始状态、较少受到外来品种基因污染等因素有关。此外, 茶花鸡对我国家鸡遗传多样性的品种贡献率较高(李慧芳等, 2009)。这些差异反映了不同品种在群体规模、历史管理方式和外来血缘引入程度等方面存在差别, 也为制定差异化保护策略提供了依据。

本研究共鉴定出A、B、C、D、E、F和G 7个线粒体单倍型类群, 其中A、B和E类群为西南地方鸡中的优势谱系。这一结果与前人关于全球家鸡线粒体谱系分布的研究结论基本一致(Liu et al., 2006; Miao et al., 2013; Wang et al., 2020), 表明西南地方鸡的母系遗传背景在整体上仍保留了家鸡驯化与扩散过程中的主要谱系特征。系统进化树和中介网络分析显示, 不同地方鸡品种之间的进化关系主要与其优势单倍型类群组成相关, 而与地理分布并不完全对应, 说明品种间在历史上可能存在不同程度的基因交流。尽管来自不同地理区域的地方鸡谱系之间存在较强的基因流动, 但长期的遗传适应仍塑造了其独特的行为、形态和繁殖特征(Wang et al., 2020)。Miao等(2013)指出, D类群相对罕见, 且与C类群不易区分, 部分研究中宏观的CD类群往往被归入D类群。Wang等(2020)的研究表明南亚鸡最常见的优势单倍型群为D和E, 这些单倍型群与东南亚和中国的谱系相近。本研究检测到的D类群单倍型数量较少, 且均为品种特异单倍型; 而在藏鸡(山南市)群体中, 属于宏观CD类群的单倍型占比达23%, 且在之前的藏鸡群体研究中并未发现D类群

(贾晓旭等, 2021b)。结合近期研究对CD类群细分结果的讨论(Yonezawa et al., 2024), 藏鸡(山南市)群体中D类群的系统地位仍有待通过更大样本量及完整线粒体基因组数据进一步验证。

随着现代家禽育种体系的发展, 引入高产型商业鸡种对地方鸡进行杂交改良已成为提高生产性能的常见手段, 但同时也可能对地方鸡原有遗传结构产生影响。20世纪90年代隐性白羽鸡等品种的引进和杂交利用, 大大提高了我国部分地方品种的生产性能。目前国内培育的快速型黄羽肉鸡配套系, 大都用隐性白羽鸡为母本, 部分优质型肉鸡品种也含有隐性白羽鸡血缘。地方鸡中检测到的E类群单倍型以E1和E2为主, 而这两种单倍型同样是隐性白羽鸡中的主要类型, 并在E类群网络结构中处于中心位置; 同时, 地方鸡与外来商业鸡种之间E类群共享单倍型占比达到86.3%。这一结果提示, 部分地方鸡群体中的E类群单倍型可能与外来商业鸡品种存在一定的母系谱系关联。需要注意的是, 隐性白羽鸡和洛岛白鸡来源于商业化育种公司, 可能经过人工选择后, 仅保留E单倍型类群, 而其他单倍型类群在原始品种或商业群体中仍可能存在。在部分较为原始或种群规模较小的品种中, E类群比例较低(0–10.0%), 而在部分品种中, E类群占比较高(> 50.0%), 比如矮脚鸡、长顺绿壳蛋鸡、黔东南小香鸡、盐津乌骨鸡和云龙矮脚鸡, 相关研究也提及了其中部分品种存在杂交育种背景(李建伟等, 2025)。已有研究表明, E类群在南亚及欧美商业鸡种中较为常见(Liu et al., 2006; Miao et al., 2013), 国内部分地方品种也可能受到相关基因渗入(贾晓旭等, 2017), 但也有研究指出, 其多样性中心并不局限于南亚和欧美(Al-Jumaili et al., 2020)。因此, E单倍型类群的出现不能简单等同于外来血缘的直接引入。本研究综合共享单倍型特征及E类群在群体中的相对频率, 将其作为评估群体遗传结构的重要参考。其中, E类群比例显著升高可被视为潜在预警信号, 提示该群体可能存在遗传结构偏移或外源母系渗入风险。

4 结论

基于线粒体DNA D-loop全序列分析, 本研究表明我国西南地区地方鸡整体具有较高的线粒体遗传多样性, 母系遗传结构较为丰富。不同品种间的系统进化关系主要与其优势单倍型类群构成相关, 而与地理分布的对应性并不明显。除茶花鸡和独龙鸡外, 其余地方鸡品种及NCBI数据库中的相关品种均检测到不同比例的E单倍型类群。结合外来商业鸡种的单倍型特征, 部分地方鸡群体中E类群比例偏高, 提示其母系遗传结构可能受到外来血缘影响。相关结果可为西南地区地方鸡遗传资源的保护与利用提供参考。

致谢: 感谢江苏省家禽科学研究所郭军研究员在论文撰写过程中给予的帮助。

ORCID

贾晓旭 https://orcid.org/0009-0009-1546-7926
陈皖强 https://orcid.org/0009-0000-9168-5858
唐修君 https://orcid.org/0000-0002-7944-3271
樊艳凤 https://orcid.org/0000-0002-5522-1244
张静 https://orcid.org/0000-0003-4772-7648
王海威 https://orcid.org/0009-0009-0337-0895
高玉时 https://orcid.org/0000-0002-3170-5105

参考文献

Al-Jumaili AS, Boudali SF, Kebede A, Al-Bayatti SA, Essa AA, Ahbara A, Aljumaah RS, Alatiyat RM, Mwacharo JM, Bjørnstad G, Naqvi AN, Gaouar SBS, Hanotte O (2020) The maternal origin of indigenous domestic chicken from the Middle East, the north and the horn of Africa. BMC Genetics, 21, 30.

Chen WH, Xu J (2023) Study on bird species richness and its maintenance factors in southwest China. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 59, 629–638. (in Chinese with English abstract) [陈文华, 徐娟 (2023) 中国西南鸟类物种丰富度及其维持因素研究. 北京大学学报(自然科学版), 59, 629–638.]

Gao YS, Jia XX, Tang XJ, Fan YF, Lu JX, Huang SH, Tang MJ (2017) The genetic diversity of chicken breeds from Jiangxi, assessed with BCDO2 and the complete mitochondrial DNA D-loop region. PLoS ONE, 12, e0173192.

Huang T, Wang RJ, Danzengsangzhu, Chen X, Gao MX, Basang, Zhang H, Zhang HL, Pi JS, Wang SX (2025) Analysis of genetic diversity and evolutionary relationship of lhoka Xizang chicken population based on mitochondrial COX gene family sequence. Xizang Journal of Agricultural Sciences, 47(1), 72–77. (in Chinese with English abstract) [黄涛, 王润锦, 单增桑珠, 陈羲, 高铭馨, 巴桑, 张昊, 张宏林, 皮劲松, 王士欣 (2025) 山南市藏鸡群体遗传多样性与进化关系分析. 西藏农业科技, 47(1), 72–77.]

Huang XH, Weng ZX, Li WN, Wang Q, He DL, Luo W,

Zhang XQ, Du BW (2022) Genetic diversity of indigenous yellow-feathered chickens in Southern China inferred from mitochondrial DNA D-loop region. Scientia Agricultura Sinica, 55, 4526–4538. (in Chinese with English abstract) [黄勋和, 翁茁先, 李威娜, 王庆, 何丹林, 罗威, 张细权, 杜炳旺 (2022) 中国地方品种黄鸡线粒体DNA D-loop遗传多样性研究. 中国农业科学, 55, 4526–4538.]

Huang XH, Yu ZQ, Weng ZX, He DL, Yi ZH, Li WN, Chen JB, Zhang XQ, Du BW, Zhong FS (2018) Mitochondrial genetic diversity and maternal origin of Guangdong indigenous chickens. Biodiversity Science, 26, 238–247. (in Chinese with English abstract) [黄勋和, 余哲琪, 翁茁先, 何丹林, 易振华, 李威娜, 陈洁波, 张细权, 杜炳旺, 钟福生 (2018) 广东省地方鸡线粒体遗传多样性与母系起源. 生物多样性, 26, 238–247.]

Huang Z, Xu ZX, Bai H, Huang YJ, Kang N, Ding XT, Liu J, Luo HR, Yang CT, Chen WJ, Guo QX, Xue LZ, Zhang XP, Xu L, Chen ML, Fu HG, Chen YL, Yue ZC, Fukagawa T, Liu SL, Chang GB, Xu LH (2023) Evolutionary analysis of a complete chicken genome. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 120, e2216641120.

Jia XX, Lu JX, Tang XJ, Fan YF, Huang SH, Ge QL, Gao YS (2021a) Genetic diversity and breed identification of Chinese black bone chicken (*Gallus gallus domesticus*). Journal of Agricultural Biotechnology, 29, 2312–2319. (in Chinese with English abstract) [贾晓旭, 陆俊贤, 唐修君, 樊艳凤, 黄胜海, 葛庆联, 高玉时 (2021a) 我国乌骨鸡品种遗传多样性和品种鉴定. 农业生物技术学报, 29, 2312–2319.]

Jia XX, Lu JX, Tang XJ, Fan YF, Ma YP, Ge QL, Gao YS (2021b) Characterization and phylogenetic evolution of mitochondrial genome in Tibetan chicken (*Gallus gallus domesticus*). Journal of Agricultural Biotechnology, 29, 307–315. (in Chinese with English abstract) [贾晓旭, 陆俊贤, 唐修君, 樊艳凤, 马尹鹏, 葛庆联, 高玉时 (2021b) 藏鸡线粒体基因组特征及系统发育进化. 农业生物技术学报, 29, 307–315.]

Jia XX, Tang XJ, Fan YF, Lu JX, Huang SH, Ge QL, Gao YS, Han W (2017) Genetic diversity of local chicken breeds in East China based on mitochondrial DNA D-loop region. Biodiversity Science, 25, 540–548. (in Chinese with English abstract) [贾晓旭, 唐修君, 樊艳凤, 陆俊贤, 黄胜海, 葛庆联, 高玉时, 韩威 (2017) 华东地区地方鸡品种mtDNA控制区遗传多样性. 生物多样性, 25, 540–548.]

Jia XX, Tang XJ, Lu JX, Fan YF, Chen DW, Tang MJ, Gu R, Gao YS (2016) The investigation of genetic diversity and evolution of Daweishan Mini chicken based on the complete mitochondrial (mt)DNA D-loop region sequence. Mitochondrial DNA Part A, 27, 3001–3004.

Larkin MA, Blackshields G, Brown NP, Chenna R, McGettigan PA, McWilliam H, Valentin F, Wallace IM, Wilm A, Lopez R, Thompson JD, Gibson TJ, Higgins DG (2007) Clustal W and Clustal X version 2.0. Bioinformatics, 23, 2947–2948.

Leigh JW, Bryant D (2015) Popart: Full-feature software for haplotype network construction. Methods in Ecology and Evolution, 6, 1110–1116.

Li HF, Zhu YF, Han W, Shu JT, Chen KW (2009) Analysis about genetic diversity and contribution rate of Chinese indigenous chicken breeds. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 30(5), 10–15. (in Chinese with English abstract) [李慧芳, 朱云芬, 韩威, 束婧婷, 陈宽维 (2009) 中国地方鸡种遗传多样性和品种贡献率分析. 家畜生态学报, 30(5), 10–15.]

Li JW, Zhou D, Feng YL, Li J, Lu YX, Liang XY, Yang XD (2025) Current situation of poultry germplasm resources and research progress of genetic improvement in Guizhou Province. China Poultry Science, 47(10), 45–50. (in Chinese) [李建伟, 周迪, 冯宇隆, 李俊, 卢昱希, 梁显义, 杨学东 (2025) 贵州省家禽种质资源现状及遗传改良研究进展. 家禽科学, 47(10), 45–50.]

Li WP, Yang Z, Yan C, Chen SY, Zhao XB (2024) The relationship between mitochondrial DNA haplotype and its copy number on body weight and morphological traits of Wuliangshan black-bone chickens. PeerJ, 12, e17989.

Li Y, Shu DM, He JY, Luo W, Wang Y, Chen P, Cai MS, Liu TF, Ji J, Luo CL (2022) Genetic diversity analysis of mtDNA D-loop complete sequence of three local chicken breeds in Guangdong Province. Chinese Journal of Animal Science, 58(4), 111–118. (in Chinese) [李莹, 舒鼎铭, 何静怡, 罗威, 王艳, 陈鹏, 蔡曼珊, 刘天飞, 计坚, 罗成龙 (2022) 广东3个地方鸡种mtDNA D-loop全序列的遗传多样性分析. 中国畜牧杂志, 58(4), 111–118.]

Liao YY, Mo GD, Sun JL, Wei FY, Liao DJ (2016) Genetic diversity of Guangxi chicken breeds assessed with microsatellites and the mitochondrial DNA D-loop region. Molecular Biology Reports, 43, 415–425.

Liu YP, Wu GS, Yao YG, Miao YW, Luikart G, Baig M, Beja-Pereira A, Ding ZL, Palanichamy MG, Zhang YP (2006) Multiple maternal origins of chickens: Out of the Asian jungles. Molecular Phylogenetics and Evolution, 38, 12–19.

Miao YW, Peng MS, Wu GS, Ouyang YN, Yang ZY, Yu N, Liang JP, Pianchou G, Beja-Pereira A, Mitra B, Palanichamy MG, Baig M, Chaudhuri TK, Shen YY, Kong QP, Murphy RW, Yao YG, Zhang YP (2013) Chicken domestication: An updated perspective based on mitochondrial genomes. Heredity, 110, 277–282.

Peng MS, Fan L, Shi NN, Ning T, Yao YG, Murphy RW, Wang WZ, Zhang YP (2015) DomeTree: A canonical toolkit for mitochondrial DNA analyses in domesticated animals. Molecular Ecology Resources, 15, 1238–1242.

Peters J, Lebrasseur O, Irving-Pease EK, Paxinos PD, Best J, Smallman R, Callou C, Gardeisen A, Trixl S, Frantz L, Sykes N, Fuller DQ, Larson G (2022) The biocultural origins and dispersal of domestic chickens. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 119, e2121978119.

Ran B, Zhu W, Zhao XL, Li LX, Yi ZX, Li M, Wang T, Li DY (2023) Studying genetic diversity and relationships between

mountainous Meihua chickens using mitochondrial DNA control region. Genes, 14, 998.

Rozas J, Ferrer-Mata A, Sánchez-DelBarrio JC, Guirao-Rico S, Librado P, Ramos-Onsins SE, Sánchez-Gracia A (2017) DnaSP 6: DNA sequence polymorphism analysis of large data sets. Molecular Biology and Evolution, 34, 3299–3302.

Sha YZ, Gao CX, Liu MM, Zhao SG (2020) Evaluation of the genetic diversity of six Chinese indigenous chickens. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 33, 1566–1572.

Shi NN, Fan L, Yao YG, Peng MS, Zhang YP (2014) Mitochondrial genomes of domestic animals need scrutiny. Molecular Ecology, 23, 5393–5397.

Shu JT, Tu YJ, Zou JM (2023) Latest progress in evaluation and utilization of genetic resources of broilers in China. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 19(12), 146–155. (in Chinese) [束婧婷, 屠云洁, 邹剑敏 (2023) 国内肉鸡遗传资源种质特性评价与利用的最新进展. 中国畜禽种业, 19(12), 146–155.]

Storey AA, Athens JS, Bryant D, Carson M, Emery K, de France S, Higham C, Huynen L, Intoh M, Jones S, Kirch PV, Ladefoged T, McCoy P, Morales-Muñiz A, Quiroz D, Reitz E, Robins J, Walter R, Matisoo-Smith E (2012) Investigating the global dispersal of chickens in prehistory using ancient mitochondrial DNA signatures. PLoS ONE, 7, e39171.

Tamura K, Stecher G, Kumar S (2021) MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. Molecular Biology and Evolution, 38, 3022–3027.

Tang XJ, Fan YF, Jia XX, Ge QL, Lu JX, Han W, Liu HL, Gao YS (2023) Haplotype study of the mitochondrial control region of broiler breeds with different growth rates. Animal Biotechnology, 34, 3165–3173.

Wang MS, Thakur M, Peng MS, Jiang Y, Frantz LAF, Li M, Zhang JJ, Wang S, Peters J, Otecko NO, Suwannapoom C, Guo X, Zheng ZQ, Esmailizadeh A, Hirimuthugoda NY, Ashari H, Suladari S, Zein MSA, Kusza S, Sohrabi S, Kharrati-Koopaee H, Shen QK, Zeng L, Yang MM, Wu YJ, Yang XY, Lu XM, Jia XZ, Nie QH, Lamont SJ, Lasagna E, Ceccobelli S, Gunwardana HGTN, Senasige TM, Feng SH, Si JF, Zhang H, Jin JQ, Li ML, Liu YH, Chen HM, Ma C, Dai SS, Bhuiyan AKFH, Khan MS, Silva GLLP, Le TT, Mwai OA, Ibrahim MNM, Supple M, Shapiro B, Hanotte O, Zhang GJ, Larson G, Han JL, Wu DD, Zhang YP (2020) 863 genomes reveal the origin and domestication of chicken. Cell Research, 30, 693–701.

Wang QL, Li GY, Guo AW, Zhou JL, Chen FF, Li QQ (2021) Current situation and molecular research progress of Yunnan local chicken germplasm resources. Hubei Journal of Animal and Veterinary Sciences, 42(4), 14–19. (in Chinese) [王麒淋, 李广玉, 郭爱伟, 周杰珑, 陈粉粉, 李青青 (2021) 云南地方鸡种质资源现状与分子研究进展. 湖北畜牧兽医, 42(4), 14–19.]

Wang ZY, E GX, Li MH (2023) Polymorphism of microsatellite marker LEI0258 in Chongqing local chickens. Chinese Journal of Animal Science, 59(10), 126–132. (in Chinese) [王转运, 俄广鑫, 李明晖 (2023) 微卫星标记LEI0258在重庆地方鸡中的多态性研究. 中国畜牧杂志, 59(10), 126–132.]

Xu D, Zhu W, Wu YH, Wei S, Shu G, Tian YF, Du XH, Tang JG, Feng YL, Wu GM, Han X, Zhao XL (2023) Whole-genome sequencing revealed genetic diversity, structure and patterns of selection in Guizhou indigenous chickens. BMC Genomics, 24, 570.

Xu NY, Zhang LY, Chen FF, Feng ZF, Zheng JT, Li DH, Zhao YJ, Kang XT (2025) Population structure, selection signal and introgression of gamecocks revealed by whole genome sequencing. Journal of Animal Science and Biotechnology, 16, 22.

Yonezawa T, Mannen H, Honma K, Matsunaga M, Rakotondraparany F, Ratsoavina FM, Wu JQ, Nishibori M, Yamamoto Y (2024) Origin and spatial population structure of Malagasy native chickens based on mitochondrial DNA. Scientific Reports, 14, 569.

You GS, Yi XY, Jiang MS, Li ZW, Tan HL, Cao C, Shu G, Tian YF, Zhu Q, Zhao XL (2022) Study on the genetic relationship of six local chicken populations from Sichuan Basin. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 53, 370–380. (in Chinese with English abstract) [尤桂爽, 易兴友, 蒋美山, 李中伟, 谭和林, 曹池, 舒刚, 田尧夫, 朱庆, 赵小玲 (2022) 四川盆地6个地方鸡群体遗传关系研究. 畜牧兽医学报, 53, 370–380.]

Zhang CY, Lin D, Wang YZ, Peng DZ, Li HF, Fei J, Chen KW, Yang N, Hu XX, Zhao YQ, Li N (2019) Widespread introgression in Chinese indigenous chicken breeds from commercial broiler. Evolutionary Applications, 12, 610–621.

Zhang JW, Tan XD, Dong J, Huang MJ, Zhou ZZ, Zhao AY, Wang DQ (2024) Study on genetic diversity of Zhejiang local chicken based on mitochondrial DNA. Chinese Journal of Animal Science, 60(12), 127–132. (in Chinese) [张嘉文, 谭晓冬, 董捷, 黄敏婕, 周珍珍, 赵阿勇, 王德前 (2024) 基于线粒体DNA的浙江省地方鸡遗传多样性研究. 中国畜牧杂志, 60(12), 127–132.]

Zhou XH, Chen DH, Wu S, Tian YP, Pan CY, Zhang FP (2024) Genetic diversity of local chicken breeds (groups) in Guizhou based on SNP chip. Journal of Southern Agriculture, 55, 1444–1453. (in Chinese with English abstract) [周晓红, 陈大海, 吴胜, 田应平, 潘成勇, 张福平 (2024) 基于SNP芯片分析贵州地方鸡品种(类群)的遗传多样性. 南方农业学报, 55, 1444–1453.]

(责任编委: 刘阳　责任编辑: 李会丽)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2026003

贾晓旭, 陈皖强, 唐修君, 樊艳凤, 张静, 王海威, 高玉时 (2026) 西南地区家鸡线粒体 DNA 控制区遗传多样性和基因渗入. 生物多样性, 34, 26003. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2026003.

附录 1

Appendix 1

表 A　多态信息和各个单倍型在 22 个地方鸡群体中的分布

Table A　Polymorphic information and haplotype distribution of the 22 indigenous chicken populations

单倍型 Haplotype	多态位点位置 Location of polymorphic sites 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000011 1111122222222222222222222222222222223333333333333333333333333344455677922 3669901112222223333344445556688899990001111234455566666779944528819011 3780970270123584678902362461501614682360357202445801237021667816612445	总计 Total	品种(个体数) Breed (individuals)
NC007237	TTCTTACGTTCATCCCTAGACGCCATCTCTGAACCCCACTCCATCGATTATA CCTTACTCTTATGGGTCG		
A1	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....	150	CK1,CS3,DN1,JY6,NC17,PJ13, PW7,PX38,QD5,SN5,SZ11, WL15,XS2,YJ7,YL2,ZF8
A2	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....C.....	52	CK2,PW3,SZ37,ZF1
A3	CC.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....	43	CH21,DL14,ZJ8
A4	.C...G.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....	27	CK5,NC1,PW1,WL8,YJ7,ZF5
A5	.C....T.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....A.....	23	CK7,JY3,NC3,SN1
A6	.C...G.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....A.....	15	PW3,SZ1,WL8,ZF3
A7	.C.....T.....TT..TC..A.....TC.....A.....	14	CK9,NC2,XS1,ZF2
A8	.C.....T.....G..T...TC..A.....TC.....A.....	13	AJ4,WL6,YJ1,YL2
A9	.C.....T.....T.T...TC..A.....TC.....A.....	10	PX1,XS9
A10	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....T.....	8	AJ5,CS1,PJ1,YJ1
A11	.C.....T.....T...TC..A.....T.....A.....	8	DW8
A12	CC.....T.....T...TC.....TC.T.....	6	JY6
A13	.C...G.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....T.....	5	CK5
A14	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....A.....	5	DN1,NC2,ZF2
A15	.C.....T.....T....C..A.....TC.....A.....C.....	3	CK3
A16	.C.....A.....T.....T...TC..A.....C.....A.....T.....	3	CK3
A17	.C...G.....T.....TT..TC..A.....TC.....A.....	3	CK1,SZ1,WL1
A18	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....AG.....	3	NC1,PW2
A19	.C...G.....T.....T...TC..A...T...TC.....A.....	3	WL3
A20	.C..C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....G.....	3	XS3
A21	.C.....T..T.....G..T...TC..A.....TC.....A.....	2	CK2
A22	CC.....T.....T...TC.....TC.T...A.....	2	JY2
A23	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A..C.....A.....	2	ZF2
A24	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....A.....	1	CK1
A25	.C.....T.....T...T...A.....TC.....A.....	1	NC1
A26	.C.....T...TC..A.....TC.....A.....	1	PJ1
A27	.CT.....T.....T...TC..A.....TC.....	1	PW1
A28	.C.....T...G....T...TC..A.....TC.....A.....	1	PW1
A29	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....	1	SN1
A30	.C..C.....T.....T...TC..A.....TC.....	1	SN1

A31	.C.....T.....TT..TC..A.....TC.....A.....G.....	1	SN1
A32	.C...G.....T.....T...TC.CA.....TC.....A.....	1	XS1
A33	.C.....T.....T...TC..A.....TC.....A.....G.....	1	XS1
A34	CC.....CT.....T...TC..A.....TA.....A.....	1	XS1
A35	.C.....T.....T...TC..A.G.....TCT....A.....CC.....	1	XS1
A36	.C.....T.....T...TC..A.....C.....A.....	1	XS1
B1	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....A..A	65	CS4,DN28,DW6,JY2,NC3,QD4, SN1,XS11,ZF6
B2	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....A	60	CH3,CS2,DL6,DN8,JY14,NC6, QD7,SN3,WL1,XS2,ZF6,ZJ2
B3	.....A.....TT..TC..A...T...TC.T...A.....A..A	38	CH6,DL9,DW6,NC1,PJ3,SZ1, WL1,XS1,ZF1,ZJ9
B4	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....A.A..A	28	CK2,DN3,NC6,PX1,QD4,WL2, XS3,YL1,ZF6
B5	.....A.....TT..T...A...T...TC.T...A.....A..A	8	DW8
B6	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....C.....A....A	5	PX1,XS4
B7	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....A....A	4	SN1,XS2,YJ1
B8	.....A.....TT..TC..A.....TC.T.....A..A	3	QD3
B9	.....A.....A...TT..TC..A.....TC.T...A.....A	2	NC2
B10	.....A.....G..TT..TC..A.....TC.T...A.....A..A	1	DN1
B11	.....A.....TT...C..A.....TC.T...A.....A..A	1	LP1
B12	.....A.....TT..AC..A.....TC.T...A.....A	1	NC1
B13	.....A.....TT..TC.....TC.T...A.....A	1	PJ1
B14	.....A.....TT..TC..A..T....TC.T...A.....A..A	1	QD1
B15	.....A.....TT..TC.CA.....TC.T...A.....A	1	XS1
B16	.....A.....TT..TC..A...T...TC.T...A.....A.A..A	1	XS1
B17	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...AG.....A..A	1	XS1
B18	C.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....A	1	XS1
B19	.....A.....TT..TC..A....T..TC.T...A.....A..A	1	XS1
B20	.....A.....TT..TC..A.....TC.T...A.....C.....A	1	ZF1
B21	.....A.....TT..TC..A.....C.T...A.....A.A..A	1	ZF1
C1	.....A.....C.....T.....TC.....	30	CS2,DN3,NC1,QD4,SN2,XS15, YJ2,YL1
C2	.....A.....A.....C.....T.....A.....TC.....	5	PX1,SN1,XS3
C3	.....A.....T.....A.....TC.....	5	XS5
C4	.....A.....A.....C.....T.....TC.....	4	CK1,XS3
C5	.....A.....C.....T.....TC.....A....	3	CS1,SN1,XS1
C6	.....A.....T.....TC.....	3	NC3
C7	.....A.....C.....T.....TC.....A.....	3	NC1,XS1,ZF1
C8	.....A..G..C..A.....T.....TC.....	3	PX3
C9	.....A.....C.....T.....C..TC.....	3	SN2,ZF1
C10	.....A.....C..A.....T.....TC.....	2	SN1,ZF1
C11	.....A.....C.....TC.....A.....TC.....A.....	2	XS1,ZF1
C12	.....A.....A.....C.....T.....A.....TC.....CA.....	2	XS2

C13	.....A.....C.....T.....TC..T.....	1	SN1
C14	.....T.....A.....T.....TC.....	1	XS1
D1	.....A..C.....T.....	11	SN11
D2	.....A.....	3	DW3
D3	.....A..C.....T.....A.....	3	SN3
D4	.....C.....T.A.....A...G.....A.....	2	CK2
D5	.....C.....A.....T.....A.....A.....	2	XS2
E1	.....C.....A.....T.....A.....T.....T.	172	AJ38,CK8,CS17,DN13,DW4, LP2,NC6,PJ4,PX3,QD21,SN2, SZ8,WL13,XS8,YJ17,YL6,ZF2
E2	....C...C.....A.....T.....A.....T.....T.	48	CK9,CS8,DN2,JY1,LP1,NC1, PJ3,PW1,QD3,SN8,SZ1,WL2, XS1,YJ5,YL2
E3	.....C.....A.....T.....T....A...T.	26	CK2,PX16,QD5,YJ3
E4	.....C.....T.....A.....T.....A.....T....A...T.	17	AJ3,CS7,SN7
E5	.....C..G.....A.....T.....TA.....T.....T.	12	DN1,QD4,YJ5,YL1,ZJ1
E6	...C....C.....A.....T.....A.....T.....T.	11	CS1,DN1
E7	.....C.....A.....T.....A.C.....T.....T.	5	JY1,YJ4
E8	.....C.....T.....A.....T.....A.....T.....T.	4	YL4
E9	.....C.....C..A.....T.....TA.....T.....T.	2	JY2
E10	.....C.....A.....T.....A.....A.T.....T.	1	XS1
E11	.....C.....A.....T.....A.....T..G.....T.	1	YJ1
F1	.....TC.....T.C....A.....T..TC..A.....T....A..CT.	27	AJ2,JY2,LP11,PJ8,YJ4
F2	.....TC.....T.C....A.....T..TC..A.....CT....A..CT.	27	DW25,PJ2
F3	.....TC.....T.C....A.....T..TC..A.....T.T....A..CT.	6	AJ6
F4	.....TC.....T.C....A.....T..TC..A.....T..G.A..CT.	3	LP3
F5	.....TC.....C....AG.....T..TC..A.....T.....CT.	2	LP2
F6	.....TC.....C....A.....T..TC..A.....T.....CT.	2	LP2
F7	.....TC.....T.C....A.....T..TCA.A.....T..G.A..CT.	1	DL1
F8	.....TC.....T.C....A.....TC..A.....T....A..CT.	1	PJ1
G1	.....A.....A...A.T.T..T.C.A.....T.....T.	28	JY18,NC1,PJ5,YJ1,ZF3
G2	.....A..T.....A...A.T.T..T.C.A.....T.....T.....T.	5	PJ5
G3	.....A.....A...A.T.T..T.C.A..C.....T.....T.	3	JY3
G4	.....A.....A...A.T.T..T.C.A.....TC.....T.	3	LP3
G5	.....A.....A...A.T.T..T.C.A.C.....T.....T.	3	AJ3
G6	.....A.....A.T.T..T.C.A.....T....A...T.	2	LP2
G7	.....A.....T...A...A.TGT..T...A.....T.....T.	2	LP2
G8	.....A.....A.T.T..T.C.A.....T.....T.	1	LP1
G9	.....A.....A...A.T.T..T.C.A.....T....A...T.	1	NC1
G10	....C..A.....A...A.T.T..T.C.A.....T.....T.	1	PJ1

圆点表示与单倍型NC007237具有相同的碱基。

Dots (.) denote identity with the reference sequence (NC007237).

表 B　西南地区 11 个地方鸡品种的 NCBI 数据库登录号

Table B　NCBI accession numbers for 11 indigenous chicken breeds in Southwest China

品种 Breed	序列数 Number of sequences	NCBI 登录号 NCBI Accession Number
乌蒙乌骨鸡 Wumeng black-bone chicken	16	AY466000–AY466003, GU447953, GU447955–GU447960, GU447966–GU447970
竹乡鸡 Zhuxiang chicken	32	KX781318, MH923638–MH923668
旧院黑鸡 Jiuyuan black chicken	40	MN381426–MN381465
米易鸡 Miyi chicken	39	MN381466–MN381504
四川山地乌骨鸡 Sichuan mountain black-bone chicken	12	AF512261–AF512272
石棉草科鸡 Shimian caoke chicken	63	AF512091–AF512107, MN381561–MN381606
西双版纳斗鸡 Xishuangbanna game chicken	42	AB098664–AB098666, AY588629–AY588635, AY728085, GU447659–GU447687, GU447758, GU448658
尼西鸡 Nixi chicken	26	AF512246–AF512254, GU261710–GU261711, MH513055–MH513069
深沟鸡 Shengou chicken	16	GU447988–GU447995, GU448240–GU448247
腾冲雪鸡 Tengchong white chicken	45	AY392296–AY392340
武定鸡 Wuding chicken	67	AF512292–AF512298, CM061878, GU261676, GU448069–GU448109, GU448248, GU448261, GU448659–GU448665, GU448705–GU448712

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25041, pages 1–14
doi: 10.17520/biods.2025041
cstr: 32101.14.biods.2025041

•“一带一路”沿线生物多样性专题•

中国、缅甸、老挝热带香料植物的民族植物学

浦瑀璐[1,2], 周仕顺[2], 李仁[2,3*]

1. 云南民族大学民族医药学院, 昆明 650504; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303; 3. 中国科学院东南亚生物多样性研究中心, 云南勐腊 666303

摘要: 香料植物是大航海时代以来的主要贸易商品之一, 具有重要的经济和药用价值。开展香料植物的民族植物学研究, 符合现代社会需求和大健康产业的发展趋势。民族植物学对植物资源的开发和民族地区经济的发展有重要的促进作用, 为有关人类安全和具有药理活性的药物筛选工作提供了前所未有的线索。中国、缅甸、老挝三国热带地区是全球生物多样性研究热点地区之一, 具有丰富的香料植物资源和文化多样性。本研究以中国、缅甸、老挝的傣族、哈尼族、瑶族、老族、克木人、缅族、钦族和克钦族等8个民族利用的香料植物为研究对象, 基于民族植物学原理和多学科方法, 通过1985–2024年中英文文献检索、野外科考、半结构式访谈、市场和村寨调查, 完成了三国热带香料植物的民族植物学研究。结果显示, 该地区民族利用的香料植物414种(含变种), 分属于63个科和206个属。其用途涵盖药用(300种, 含药食两用74种)、蔬菜(123种)、调味(95种)等, 其利用部位以叶(46.62%)、根(20.77%)为主。利用价值超过0.2的植物大多为药食两用的香料植物。资源来源中野生的有178种(43.00%)、栽培的有185种(44.69%), 这其中仅有12%实现了从野生采集到人工栽培再到市场销售的全过程。中缅、中老、缅老边境地区民族利用的香料植物Jaccard相似性指数为0.20–0.25, 整体偏低, 表明不同地区民族在长期适应各自生态环境和文化背景下形成了各具特色的植物利用传统, 反映了该地区丰富的文化多样性和民族植物学知识的独特性。此外, 调查发现处于保护或受威胁的物种有52种(12.56%), 经评估和筛选, 其中有15种需要重点研究、保护和利用。本研究完成了全球第一份系统全面展示中国、缅甸、老挝三国热带地区民族利用香料植物的民族植物学编目, 既可为三国香料植物资源在食品、药品和化妆品产业的可持续开发和利用提供知识原型, 也为实施跨国境文化多样性和生物多样性保护, 建设绿色“一带一路”提供基础数据和科学案例。

关键词: 香料植物; 民族植物学; 传统知识; 中国、缅甸、老挝三国热带地区; 保护与利用

浦瑀璐, 周仕顺, 李仁 (2026) 中国、缅甸、老挝热带香料植物的民族植物学. 生物多样性, 34, 25041. doi: 10.17520/biods.2025041; cstr: 32101.14.biods.2025041.
Pu YL, Zhou SS, Li R (2026) Ethnobotany of tropical spice plants utilized by ethnic groups in China, Myanmar and Laos. Biodiversity Science, 34, 25041. doi: 10.17520/biods.2025041; cstr: 32101.14.biods.2025041.

Ethnobotany of tropical spice plants utilized by ethnic groups in China, Myanmar and Laos

Yulu Pu[1,2], Shishun Zhou[2], Ren Li[2,3*]

1 *School of Ethnic Medicine, Yunnan Minzu University, Kunming, Yunnan 650504, China*
2 *Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China*
3 *Southeast Asia Biodiversity Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China*

ABSTRACT

Aims: Spice plants are one of the most significant commodities in global trade since the Age of Exploration and they still hold important economic and medicinal value nowadays. Ethnobotanical research on spice plants meets the needs of modern society and aligns with modern societal demands and the development trends of the “Big Health” industry.

收稿日期 Received: 2025-01-26; 接受日期 Accepted: 2025-10-15
基金项目: 中国科学院东南亚生物多样性研究中心(Y4ZK111B01)、云南省科技厅建设面向南亚东南亚科技创新中心专项(202203AP140007)、云南省“兴滇英才支持计划创新团队” (202405AS350019)和青年人才项目(E5YNR07B01)、中国科学院西部之光(E3ZK039B01)和云南省热带雨林与亚洲象保护重点实验室项目(202305AG070003) Supported by the Southeast Asia biodiveristy Research Institute, Chinese Academy of Sciences (Y4ZK111B01), Yunnan Province Science and Technology Department Project (No. 202203AP140007), Yunnan Revitalization Talent Support Program “Innovation Team” Project (202405AS350019), Yunnan Revitalization Talent Support Program “Young Talent” Project (E5YNR07B01), West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (E3ZK039B01) and Yunnan Key Laboratory for Conservation of Tropical Rainforests and Asian Elephants (202305AG070003)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liren@xtbg.ac.cn

Ethnobotany studies play a crucial role in promoting the utilization of plant resources and the economic development of ethnic regions by offering unprecedented clues for screening medicines related to human safety and pharmacological activity. China, Myanmar, and Laos tropical regions are one of the global biodiversity hotspots with abundant spice plants and cultural diversity. This study aims to catalogue the traditional knowledge of spice plants consumed by the ethnic groups in these regions, thereby providing a scientific basis for their conservation and sustainable utilization.
Methods: Based on ethnobotanical principles and multidisciplinary approaches, integrating botany, anthropology, pharmacology, linguistics, ecology, and economics, field surveys were conducted in China, Myanmar and Laos tropical regions. Semi-structured interviews ("5W+H"), village and market investigations, were done among eight ethnic groups, including Dai, Hani, Yao, Lao, Khmu, Burmese, Chin, and Kachin people. Literature on spice plants published in English or Chinese from 1985 to 2024 were reviewed. The spice plants diversity, traditional knowledge, resources origin and conservation status were systematically collected. Use value (UV) and Jaccard index (JI) were analyzed.
Results: A total of 414 spice plant species (including varieties) belonging to 63 families and 206 genera were documented. Among 300 medicinal, 123 edibles, 95 flavoring and 74 dual-purpose (medicinal-edible) species, 54.83% were herbs, with leaves (46.62%) and roots (20.77%) as the main used parts. Spice plants with a UV greater than 0.2 are predominantly multifunctional medicinal-food species. Of all recorded species, 178 could only be collected from wild, 185 were cultivated; however, only about 12% of them have fully completed the transition from wild harvesting to cultivation and market sale. The Jaccard index of spice plants utilization across the three countries is relatively low (JI, 0.20–0.25), indicating the rich cultural diversity and distinct ethnobotanical traditions shaped by long-term adaptation to different ecological and cultural contexts in these regions. There were 52 (12.56%) species under protection or threaten, and 15 nationally protected or rare and endangered spice plants were identified for priority investigation, conservation and utilization.
Conclusions: This study provides the world's first comprehensive and systematic ethnobotanical catalogue of spice plants utilized by local ethnic communities in the tropical regions of China, Myanmar, and Laos. It not only provides an initial intellectual prototype for the sustainable development and cross-border utilization of spice plant resources in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries, but also offers fundamental data and scientific case for promoting transboundary cultural and biodiversity conservation and contributes to the green development of the Belt and Road.
Key words: spice plants; ethnobotany; traditional knowledge; tropical regions of China, Myanmar and Laos; conservation and utilization

香料植物有多种定义, 本文所研究的香料植物泛指已被人们利用, 并将其相关器官或组织(如种子、果实、叶、根、树皮)做成调味料或芳香制品的一类植物的总称。在人类历史长河中, 国家的发展和香料植物有着密切关系。香料植物在全球的利用历史悠久, 四大文明古国是最早发现和使用香料植物的国家。2000多年前, 中国开辟了连接欧亚两个大陆和文明的伟大航路——丝绸之路(the Silk Road)。香料植物也是国际贸易的最早商品之一。由于香料贸易的暴利, 连接东南亚、印度、西亚, 最后通往欧洲的航线, 也被称为"香料之路"。欧洲的兴起与航海业的发展密不可分, 而航海业发展的主要动力是寻找香料(白红彤和刘刘, 2006)。我国香料植物资源丰富, 《神农本草经》中记载了肉桂、生姜、甘草、花椒、当归等香料植物。明朝李时珍在其编著的《本草纲目》"芳香篇"中, 记载了三大类共218种香料植物(李春艳和冯爱国, 2014)。考古和文献记载证据表明, 从丝绸之路而来的香料植物主要用在宗教仪式(供品)、制造香水和治病药方中, 是当时的奢侈品和统治阶级地位的象征(Van der Veen & Morales, 2015)。在丝绸之路上, 香料、黄金和宝石并称"三宝", 香料植物贸易是古丝绸之路上利润最高的交易之一, 并促成了美洲新大陆的地理大发现和欧洲的崛起(Pollmer, 2000)。

香料植物在全球有丰富的多样性和良好的产业开发前景, 在现代国际贸易领域仍然有着十分重要的价值。香料植物不仅是国际贸易的重要商品, 还广泛应用于食品、药品、化妆品等多个领域, 具有重要的经济和药用价值(白红彤和刘刘, 2006)。据文献记载有3,600多种香料植物分布于世界的各个角落, 约隶属于200个科, 800个属, 开始被利用的有400多种, 而常用的只有200–300种, 绝大多数都处于未被开发状态。我国天然香料植物有60多科400多种, 已被开发利用的约120种, 主要集中在木兰科、松科、樟科、蔷薇科、菊科、木犀科、芸香科、百合科、唇形科、豆科等。我国香料植物分布

遍及全国, 长江、淮河以南地区分布集中, 西南、华南最为丰富。我国拥有肉桂、八角等众多特有品种, 在全球具有独特优势品种, 每年约有1/3香精香料产品出口, 其中香料产品的出口比例更高, 约占其总量的2/3, 香兰素、芳樟醇、麦芽酚出口量均占全球供应量的50%左右[①]。中国、缅甸、老挝三国热带地区地处热带东南亚与世界第三极(青藏高原)的过渡带, 拥有独特的地理和生态环境, 是全球生物多样性研究的热点地区之一。该地区泛北极植物区系和古热带植物区系混合交融, 形成复杂多样的生态系统和丰富的生物多样性(陈进, 1998), 为香料植物生长提供了得天独厚的条件, 使其成为香料植物的宝库。云南省是中国生物多样性最为丰富的地区之一, 有“动植物王国”的美誉, 其天然香料植物资源十分丰富, 是中国天然香料的主产区, 目前云南省发现和引种栽培的香料植物共计有400余种, 分属95科179属, 集中分布在热带和亚热带地区, 全球约90%的香料植物可以在云南自然生长(秦太峰和周铁生, 2011), 而且云南的香料产量及出口量约占全国总量的30%, 产品远销印度、德国、荷兰、法国等20多个国家和地区(周铁生, 2004; 秦太峰和周铁生, 2011)。

民族植物学是一门跨学科科学, 涵盖了自然科学和人文科学的多个方面。“民族植物学”这一术语最早由美国植物学家约翰·哈什伯格(John Harshberger)于1895年提出, 指的是“对原始部落和土著居民所用植物的研究”。这一术语很快被广泛使用。直到20世纪初, 民族植物学主要聚焦于对植物本土用途的研究。自哈什伯格之后, 随着该领域的形成与发展, 民族植物学的定义也在不断变化和演进(裴盛基, 2013)。民族植物学的现代定义是“一门研究人类与植物之间相互作用的科学”。民族植物学涵盖诸多方面, 包括人们对植物的命名和分类方式、赋予的价值、用途以及对管理。早在1982年引入中国后就取得较快发展, 尤其在民族地区, 为中国植物资源开发利用和保护、区域经济发展、生态文明建设等做出重要贡献(裴盛基, 2024)。在21世纪初期, 中国民族植物学家龙春林教授提出了现代民族植物学概念(龙春林, 2013)。此后, 学界特别强调民族植物学是一门攸关人类生存的科学(Pei et al., 2020), 并指出依赖多种工具进行多维的民族植物学研究是未来民族植物学发展的趋势(耿彦飞和王雨华, 2024)。

中国、缅甸和老挝各民族都有悠久的历史和独特的传统文化, 特别是在香料植物利用方面, 呈现出丰富的经验和强烈的地方特色。据统计, 仅在西双版纳等热带地区就有香料植物200多种, 隶属于52个科100个属, 分为木本叶类、草本类、香花类、果(种子)类、树皮类、香树脂及木香类、根香类和地衣类等八大类。但目前实现工业生产的较少, 大有开发利用的前景(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001)。中国、缅甸、老挝三国世居有近200个民族, 有着悠久的历史和灿烂的民族传统文化。三国典型分布的森林植被有季节性雨林、山地雨林、中山湿性常绿阔叶林等。该地区傣族(Dai)、哈尼族(Hani)、瑶族(Yao)、老族(Lao)、克木人(Khmu)、缅族(Burmese)、钦族(Chin)和克钦族(Kachin)等为主体民族, 他们在长期与大自然的互动中积累了丰富的香料植物利用传统知识。这些传统知识是民族文化的重要组成部分, 通过民族植物学研究对其进行及时记录整理、形成编目, 能够促进跨国境、跨民族的文化传承以及香料植物多样性的保护。1980年, 中国民族植物学家裴盛基教授在云南西双版纳哈尼族村寨首次发现跳蚤草(*Adenosma buchneroides*)。当地哈尼族将其用于治疗炎症相关的皮肤肿胀、痤疮和腹泻等疾病, 还用于驱虫、装饰等, 跳蚤草因而成为哈尼族文化身份的象征(Shen et al., 1988)。2016–2018年, 王雨华等人对中国云南省西双版纳傣族自治州和老挝丰沙里省的跳蚤草进行了综合系统的民族植物学调查, 除已记录的用途外, 他们还发现其被用作仪式植物和调味品, 并且哈尼族会用多种方式来制作治疗炎症相关疾病的药物。然而, 由于社会变迁因素, 中国哈尼族传统的刀耕火种农业逐渐被取代, 跳蚤草的存在和使用受到威胁, 相关传统知识面临消失(Shi et al., 2024)。这凸显了在中国、缅甸、老挝三国热带地区开展民族植物学研究的紧迫性, 需要及时对该地区的香料植物传统知识进行记录、整理。

大量植物新类群的发表, 凸显了该地区目前研究资料仍然不足的现状。通过大力发掘, 填补本底

① 李福琳 (2019) 中国主要香料资源植物分布的研究. 硕士学位论文, 河南师范大学, 河南新乡.

资料的不足, 可为后续保护和开发提供基础数据。国内外学者对中国云南南部、缅甸和老挝部分地区的植物资源进行调查后发表了一系列民族植物学相关研究论文(Soejarto et al., 2012; Shi et al., 2014; Tanaka & Aung, 2017)。近20年该地区发表报道了大量植物新种, 其中包括1种胡椒科植物(Yang et al., 2017)和十多种姜科植物(Gowda et al., 2012; Tanaka & Aung, 2017; Ding et al., 2019; Li et al., 2020)具有潜在的香料植物开发价值。据报道, 云南南部傣族和哈尼族利用的传统药用植物有199种、野生蔬菜284种、饮料植物114种(Xu et al., 2004; Shi et al., 2014), 老挝记录有药用植物573种(Soejarto et al., 2012)、野生食用蔬菜115种(Kosaka et al., 2013), 缅甸常用药用植物有472种(DeFilipps & Krupnick, 2018), 其中钦邦民族利用的有75种(Ong et al., 2018), 掸邦民族食用蔬菜有83种(Shin et al., 2018)。这些数据为进一步了解该地区的植物利用情况提供了基础数据, 但与该地区丰富的植物和文化多样性相比, 研究的力度和深度还远远不够。

在全球气候变化和人为破坏的压力下, 物种面临巨大灭绝风险, 其承载的传统知识也面临消失的威胁, 特别是生物多样性丰富的热带地区, 亟需及时记录和保护, 避免未被发现利用前就已经野外灭绝。气候变化对全球生物多样性产生了巨大影响(Maiti, 2016), 我们面临着地球第六次大灭绝的危机和挑战(Ceballos et al., 2015)。据估计全球有约50万种陆生植物, 由于受到栖息地丧失、生境破碎化、森林退化、过度开发、入侵物种、环境污染和气候变化等威胁, 其中有1/3的物种存在灭绝危险, 并且在全球范围内, 最大的保护缺口是在生物多样性高度丰富的热带低地, 需要更加关注(Corlett, 2016)。虽然中国、缅甸、老挝三国都加入了《生物多样性公约》, 三国政府也制定了相应的自然资源保护和可持续利用政策, 然而该区域内世代居住的民族大多依赖当地森林资源为生, 加上经济落后等原因, 盗伐林木和过量采集野生植物资源等情况时有发生, 自然资源的存续面临巨大威胁, 该地区的生物多样性保护工作形势日趋严峻(Li et al., 2008; Delang et al., 2013; Reddy et al., 2019; Yang et al., 2019)。原住民长期以来在认识自然、利用自然的过程中所形成的传统知识是人类知识宝库的重要组成部分。然而, 由于环境变迁、生计变化以及外来文化的影响, 大多传统知识正面临消失的威胁(Benz et al., 2000; Ladio & Lozada, 2000, 2001, 2003)。于全球植物而言, 人类利用的种类有限, 但是珍稀濒危物种往往可能有特定的人类用途和不同寻常的功能, 未来可能为人类造福(Corlett, 2016)。同时, 该地区民族普遍没有本民族文字, 相关传统知识只能依靠口口相传, 一旦失传便无法挽回。因此, 调查和记录好该地区的香料植物资源和利用现状已十分必要和紧迫。

总之, 中国、缅甸和老挝热带地区作为全球生物多样性研究的热点地区之一, 拥有丰富的香料植物资源和文化多样性, 本文旨在通过运用民族植物学基本原理, 结合植物学、人类学、药物学、语言学、生态学、经济学等多学科交叉方法, 以姜科、胡椒科、芸香科、樟科植物为关键类群, 在三国热带关键地区, 开展跨国境、跨民族、跨学科的香料植物民族植物学研究, 完成该地区民族利用香料植物的本底调查和传统知识抢救性编目, 促进跨国境、跨民族的文化和香料植物多样性保护, 并为三国香料产业开发提供知识原型。

1 方法

1.1 研究区域

为充分掌握当前中国、缅甸、老挝三国民族利用香料多样性名录, 相关药用、食用的传统知识, 以及资源现状等内容, 采用点面结合的方法, 以地处中国热带的云南省西双版纳州和普洱市、老挝北部三省(琅南塔省、乌多姆赛省和丰沙里省)以及缅甸的克钦邦、钦邦为关键研究地区(表1), 同时综合文献检索, 将研究区域覆盖到缅甸、老挝和中国热带地区。

1.2 民族植物学调查

本文系统收集了1985–2024年间中国、缅甸、老挝三国地区民族利用植物的调查、分类学相关的中文及英文专著和期刊文献资料等。专著如 *Medicinal Plants of Myanmar* (Vol. 1) (DOTM, 2000)、*Medicinal Plants and Herbs in the Lao People's Democratic Republic* (Vol. 1) (IOTM, 2013)、*Medicinal Plants of the Ex-Situ Medicinal Plants Preserved in Veunkham* (Vol. 1) (IOTM, 2019)、《西

表1 中国、缅甸、老挝热带香料植物重点研究区域
Table 1 Key study areas of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos

国家 Country	地点 Location	经纬度 Coordinates (N, E)
中国 China	云南省西双版纳傣族自治州 Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture, Yunnan Province	21°10′–22°40′, 99°55′–101°50′
	云南省普洱市 Pu'er City, Yunnan Province	22°02′–24°50′, 99°09′–102°19′
缅甸 Myanmar	钦邦 Chin State	20°40′–24°06′, 92°37′–94°09′
	克钦邦 Kachin State	23°27′–28°25′, 96°0′–98°44′
老挝 Laos	琅南塔省 Luang Namtha Province	19°90′–22°50′, 100°10′–103°35′
	丰沙里省 Phongsali Province	
	乌多姆赛省 Oudomxay Province	

双版纳哈尼族医药》(阿海, 1999)、《云南热带亚热带香料植物》(程必强和喻学俭, 1995)、《云南香料植物资源及其利用》(程必强等, 2001)、《中华本草·傣药卷》(国家中医药管理局中华本草编委会, 2005)等。不限制检索时间, 分别以"香料(spice)"或"食用植物(edible plants)"、或"药用植物(medicinal plants)", 结合"中国热带(tropical China)"或"缅甸(Myanmar)"或"老挝(Laos)"等为中英文关键词, 对中国知网、PubMed、Web of Science等权威文献数据库进行了全面搜索。在获取相关文献及其植物名录后, 对其中有关中国、缅甸、老挝三国民族利用香料的所有记载进行了深入分析, 整理出该地区潜在民族利用香料植物名录。

在此基础上, 针对该地区聚居的主体民族, 如傣族/老龙族(Lao Loum)、哈尼族/阿卡族(Akha)、瑶族/老冷族(Lanten)、老族、克木人、缅族、钦族和克钦族等8个民族, 开展民族植物学调查。采用"点、线、面"结合原则, 进行深入细致的村寨调查、半结构式访谈和野外调查。在进入各个村寨进行民族植物学调查之前, 我们同当地村寨的村长和地方官员进行了会谈, 并介绍了研究的主题和目标。根据国际民族生物学会关于民族植物学调查和知识产权保护的指南, 在获得当地居民同意后才可开展相应的调查研究。在调查期间, 我们采用了关键人物访谈、半结构式访谈、实地野外考察等多种方法, 受访人员主要先通过当地村长推荐, 然后在入户调查过程中用"滚雪球"式的方法召集, 通过"5W+H"访问方法(即Who、What、When、Where、Why五大问题加How实施方式) (Cunningham, 2001), 记录其资源情况, 管理模式和利用现状, 收集和记录该地区民族利用香料植物资源的基本情况(包括食用香料植物资源种类、栽培引种情况、食用方法、食用功效、生境、资源量、可获取的难易程度和传统利用知识的来源与传承等相关信息), 并进行民族植物学编目, 完成该地区香料植物的本底资料收集和描述的阶段性工作。同时结合当地的集市、农贸市场和边民交易市场(图1)等进行考察, 以期全面收集该地区香料植物的资源量和应用信息。

根据调查地区的民族分布和研究条件, 在中国热带区域选取云南省西双版纳傣族自治州勐腊县、勐仑镇、景洪市、基诺山乡、勐海县、勐遮镇、勐往乡、勐混镇, 以及云南省普洱市思茅区、江城哈尼族彝族自治县、整董镇等区域的多个民族村寨和12处集市, 开展不定期民族植物学调查。在老挝主要通过与老挝生物技术与生态研究所、南塔省科技厅等合作, 完成了两次对老挝北部克木人哈尼族、瑶族、苗族(Mong)、傣族等5个少数民族20个村寨利用资源植物的调查和民族植物学编目。在缅甸主要在钦邦对缅甸西部的Natma Taung国家公园(又称维多利亚山国家公园)进行了4次野外科考(图2), 对其沿途9个村寨的80多户钦族居民植物利用情况进行了初步调查。此外, 在缅甸克钦邦Hkakaborazi国家公园和Hpokanrazi野生生物保护区, 沿着中缅联合考察队行进路线, 对在葡萄地区途经的10个少数民族村寨近60多户进行了初步调查(图2), 综合缅甸相关药用植物书籍、已发表的文献和调查资料, 从中挖掘和整理了缅甸居民利用的香料植物, 并进行了民族植物学编目。

本名录以《中国植物志》(中国科学院中国植物志编辑委员会, 2004)的分类系统为基础, 植物拉丁学名参照全球生物多样性信息服务网络平台(Global Biodiversity Information Facility, GBIF, https://www.gbif.org/); 中文名以原文献提供信息为主, 若原文献未给出中文名, 则根据词源学进行命名。植物学名参照林奈双名法, 列出属名和种名, 未查找到中文名时则标注原文献拉丁文学名。



图1　中国、缅甸、老挝三国香料植物野外和市场调查
Fig. 1　Field and market investigation of spice plants in China, Myanmar and Laos



图2　缅甸钦邦(A1–A4)和克钦邦(B1–B4)民族利用香料植物植物学调查
Fig. 2　Ethnobotanical survey of spice plants used by local people in Chin State (A1–A4) and Kachin State (B1–B4), Myanmar

1.3　数据分析

通过对中国、缅甸、老挝三国民族利用香料植物进行民族植物学编目，同时运用民族植物学(淮虎银和哈斯巴根，2010)和民族生态学(冯金朝等，2014)相关原理和定量方法进行统计分析，从而评估该地区香料植物多样性、传统知识的传承程度，并筛选出有待进一步研究和开发的香料植物原材料。主要参考指数有:

(1)相似度指数(Jaccard index, JI)，用于衡量不同地区利用的香料植物相似程度，反映不同民族文化的交融和异同。本研究将分别计算中国、缅甸、老挝三国研究地区之间的JI指数，并以各地区民族利用香料植物的种数分别代表公式中的a、b、c，以此评估三地香料植物利用的相似性，计算公式为:

$$JI = a / (a + b + c) \quad (1)$$

其中，a是两个地区均利用的植物数量，b是只在其中一个地区利用的植物数量，c是只在其中另一个地区利用的植物数量。

(2)植物利用价值指数(use value, UV)，通过其对植物个体被利用的频率进行统计，以表达其在民族地区日常生活中的相对重要性及其价值。UV是通过比较某一种植物被受访者提及的次数和所有

受访者的人数来计算的。本文将在缅甸钦邦、克钦邦、老挝北部以及中国西双版纳和普洱开展4个地区的民族植物学调查, 作为4个记录样本, 将收集到的当地民族利用植物相关的10本书籍和已发表的81篇研究论文作为91个记录样本, 共95个记录作为本底样本N。从每个香料植物在各个样本中出现的次数来累计其利用频次U_i, 从而计算其在中国、缅甸和老挝三国的相对利用价值指数UV。UV的计算公式为:

$$UV = (\sum U_i)/N \quad (2)$$

其中, U_i是某一种植物被受访者提及的次数, N是所有受访者的人数。

本研究参照世界自然保护联盟(IUCN)濒危物种红色名录(IUCN, 2015)、《中国高等植物受威胁物种名录》(覃海宁等, 2017)开展物种保护等级评估; 同时参考国家重点保护野生植物名录(https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml)补充物种保护信息。依据上述资料, 对调查记录的香料植物保护现状、受威胁等级进行判定, 划分极危(CR)、濒危(EN)、易危(VU)、近危(NT)、无危(LC)、数据缺乏(DD)及未纳入等级(–), 并筛选出亟需重点保护与研究的物种。

2 结果与讨论

2.1 三国香料植物种类、利用部位、生长习性的多样性

通过系统调查和物种编目, 初步记录到三国民族利用香料植物414种(含变种) (附录1), 分属于63科206属。在414种香料植物中, 科水平分布呈现明显优势类群: 姜科物种数最多(83种, 20.05%), 其次为菊科(51种, 12.32%)、唇形科(46种, 11.11%)、芸香科(41种, 9.90%), 这4科物种占总种数的53.38%, 是中国、缅甸、老挝三国热带地区民族利用香料植物的核心科(表2)。其余58科物种数均少于20种, 合计占比40.10%, 从属的水平来看, 姜属(*Zingiber*)、豆蔻属(*Amomum*)、姜黄属(*Curcuma*)、山姜属(*Alpinia*)为物种数超过15种的高频属, 主要集中在姜科, 凸显出姜科植物在香料和药用领域中的重要地位; 葱属(*Allium*)、胡椒属(*Piper*)、花椒属(*Xanthoxylum*)等属的物种数超10种, 这些物种多作为调味香料, 兼具药用价值, 但有134属仅包含了1种物种。该名录是目前全球范围内最长的跨国境民族利用香料植物名录之一, 表明该地区是具有全球意义的香料植物多样性区域。

414种香料植物的生长习性多样, 其中草本227种(54.83%)、乔木94种(22.71%)、灌木55种(13.29%)、半灌木13种(3.14%)、藤本13种(3.14%)、木质藤本7种(1.69%)、小乔木5种(1.21%) (表3)。这一生长习性组成特征与研究区域的热带生态环境高度适配, 草本植物占比最高, 反映出热带地区温暖湿润气候下草本植物生长周期短、繁殖能力强的适应优势。乔木与灌木合计占比36.00%, 则对应了该地区“季节性雨林、山地雨林”植被系统中木本植物的核心组成地位(陈进, 1998), 体现了香料植物生长习性与区域植被类型的协同性。

此外, 其利用部位也十分丰富, 叶(193种, 46.62%)是最主要的利用部位, 其次为根(86种, 20.77%)、花(68种, 16.43%)、果实(60种, 14.49%)和全草(42种, 10.14%), 此外还包括嫩茎叶、花序、根茎、茎、树皮和块茎等多种部位(表4)。从不同生长习性植物获取丰富多样的利用部位表明当地居民积累了大量香料植物利用的传统知识, 能够精准辨别出不同部位的利用价值。例如, 樟科樟属植物黄樟(*Camphora parthenoxylon*)的果实捣碎后可作为调味料; 叶可药用, 能清火解毒、消肿止痛、除风

表2 中国、缅甸、老挝三国热带香料植物优势科(前7科)

Table 2 The dominant families of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos (Top 7)

科名 Family name	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)	主要生长习性 Main growth habits	核心用途 Core uses
姜科 Zingiberaceae	83	20.05	草本 Herb	调味、药用 Seasoning, medicinal
菊科 Asteraceae	51	12.32	草本、半灌木 Herb, subshrub	药用、驱蚊 Medicinal, mosquito repellent
唇形科 Lamiaceae	46	11.11	草本、灌木 Herb, shrub	调味、茶饮 Seasoning, tea
芸香科 Rutaceae	41	9.90	乔木、灌木 Tree, shrub	调味、药用 Seasoning, medicinal
樟科 Lauraceae	26	6.52	乔木、灌木 Tree, shrub	调味、驱虫 Seasoning, insect repellent
胡椒科 Piperaceae	16	3.86	藤本、半灌木 Vine, subshrub	调味、药用 Seasoning, medicinal
伞形科 Apiaceae	16	3.86	草本 Herb	药用、蔬菜 Medicinal, vegetable

表3 中国、缅甸、老挝三国热带地区民族利用香料植物不同生长习性

Table 3 Different growth habits of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos

生长习性 Growth habit	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)	生长习性 Growth habit	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)
草本 Herb	227	54.83	藤本 Vine	13	3.14
乔木 Tree	94	22.71	木质藤本 Liana	7	1.69
灌木 Shrub	55	13.29	小乔木 Small tree	5	1.21
半灌木 Subshrub	13	3.14			

表4 中国、缅甸、老挝三国热带香料植物主要利用部位统计

Table 4 Statistics on the main used parts of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos

利用部位 Used part	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)	代表物种 Representative species
叶 Leaf	193	46.62	薄荷、蒟叶 *Mentha haplocalyx*, *Piper betle*
根 Root	86	20.77	姜黄、当归 *Curcuma longa*, *Angelica sinensis*
花 Flower	68	16.43	菊花、金银花 *Chrysanthemum morifolium*, *Lonicera japonica*
果实 Fruit	60	14.49	胡椒、花椒 *Piper nigrum*, *Zanthoxylum bungeanum*
全草 Whole herb	42	10.14	积雪草、鱼腥草 *Centella asiatica*, *Houttuynia cordata*

利湿、通气消胀, 主治咽喉肿痛、风湿关节痛、心慌心悸、头昏头痛、胃脘胀痛, 同时还具有一定的驱蚊效果(国家中医药管理局中华本草编委会, 2005; Sydara et al., 2014; 范汝艳等, 2019; Cao et al., 2020)。此外, 许多植物存在多部位利用的特征, 为相关香料植物的未来经济开发提供了重要参考依据。

2.2 三国香料植物用途和使用方法的多样性

从用途方面来看, 414种香料植物的功能丰富多样, 其中药用植物300种, 涵盖呼吸系统、消化系统、神经系统等多个病症的治疗, 如姜科姜黄属植物姜黄(*Curcuma longa*)常用于缓解关节疼痛; 蔬菜食用类123种, 多作为日常饮食的补充食材, 如唇形科薄荷属植物薄荷(*Mentha canadensis*)可直接作为沙拉配菜; 调味香料类95种, 在烹饪中用于提升食物风味, 如芸香科花椒属植物是辛辣味的重要来源; 药食两用类74种, 体现了“药食同源”的传统理念, 如伞形科当归属植物当归(*Angelica sinensis*)既能入药调理气血, 又可作为炖品辅料, 其他用途还包括驱蚊、芳香茶饮、染料等(表5)。但需说明的是, 上述用途分类存在交叉重叠现象, 即部分物种可同时满足多种用途需求。

在使用方式上, 调查记录的414种热带香料植物呈现多样化, 具体方式因植物特性和用途需求而异, 主要包括煮水喝、炒吃、捣碎包敷、煮汤、凉拌、烧等等多种方法(表6)。其中煮水饮用是应用最广泛的方式之一, 接近总数的50%, 多用于药用或制作芳香茶饮, 如唇形科紫苏属紫苏(*Perilla frutescens*)的叶片煮水可缓解感冒症状。炒制食用和煮汤常用于蔬菜食用类和调味香料类植物, 如姜科山姜属黑果山姜(*Alpinia nigra*)的嫩茎叶经炒制后口感脆嫩, 芸香科柑橘属植物用于煮汤可增添清香; 凉拌适用于一些口感清爽的植物, 如伞形科芫荽属芫荽(*Coriandrum sativum*)的嫩茎叶凉拌后风味独特。捣碎包敷则主要用于药用植物, 通过外敷作用于患处, 如姜科姜花属植物姜花(*Hedychium coronarium*)捣碎包敷可缓解蚊虫叮咬、皮肤红肿或轻微外伤感染。针对不同植物及不同病症, 当地居民会采用差异化的使用方法, 这一现象充分体现了该地区民族传统知识与文化的丰富性。对其进行民族植物学编目, 一方面, 可将这些珍贵的传统知识以书面形式系统保存, 为其传承与保护提供文献依据, 避免因现代社会发展导致的传统知识流失; 另一方面, 所形成的基础数据能为后续相关科学试验的设计及现代化开发利用研究提供扎实的本底支撑。

2.3 三国民族利用香料植物的相似性比较

中国、缅甸、老挝三国不同地区民族所利用的香料植物种类各具特色。在中国西双版纳和普洱地区, 由于其独特的地理环境和深厚的民族文化积淀, 当地不同民族利用的香料植物种类多达264种, 这

表5　中国、缅甸、老挝三国热带香料植物主要用途
Table 5　The main usage of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos

类别 Category	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)	主要用途 Main uses
药用 Medicinal	300	72.46	治疗肠胃、风湿、感冒等(含药食两用74种) Treating gastrointestinal disorders, rheumatism, colds, etc. (including 74 medicinal-edible dual-purpose species)
蔬菜 Vegetable	123	29.71	日常饮食补充 Daily food supplement (including 74 medicinal-edible dual-purpose species)
调味 Seasoning	95	22.95	提升肉类、汤类风味 Enhancing the flavor of meat and soups
驱蚊 Mosquito repellent	25	6.04	燃烧、铺放驱蚊虫 Repelling mosquitoes by burning or placing
茶饮 Tea	16	3.86	泡水作清凉饮料 Making cool drinks by soaking in water

表6　中国、缅甸、老挝三国热带香料植物不同使用方法
Table 6　Different use methods of tropical spice plants in China, Myanmar and Laos

类别 Category	具体方法 Specific methods	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)	适用用途 Applicable uses
加热处理 Heat treatment	煮水喝、做汤、炒吃 Boiling for drinking, making soups, stir-frying	323	78.02	药用、蔬菜、调味 Medicinal, vegetable, seasoning
外用处理 External application	捣碎包敷、涂抹、燃烧 Mashing for compressing, smearing, burning	105	25.36	药用、驱蚊 Medicinal, mosquito repellent
生食/凉拌 Raw/eaten cold	凉拌、生吃、沾剁生 Cold mixing, eating raw, dipping in minced raw meat	85	20.53	蔬菜、调味 Vegetable, seasoning
加工利用 Indivece uses	泡茶、泡酒、染色 Making tea, soaking in wine, dyeing	73	17.63	茶饮、染料、药用 Tea, dye, medicinal

些植物不仅能很好地适应本地生态系统，还与各民族的生产生活形成了紧密的联系。在缅甸，调查到的民族利用香料植物有210种，这可能与缅甸多样的地理和气候条件相关，不同地区的民族在长期的生产生活实践中，逐渐形成了各自独特的植物利用方式。在老挝民族利用香料植物的种类为205种，老挝丰富多样的民族文化，使不同民族对香料植物的利用也各有特色。

通过运用Jaccard相似性指数对上述数据深入分析，结果显示中国、缅甸、老挝三国共用香料植物有72种，中缅、中老、缅老之间香料植物利用相似度分别为0.20、0.21和0.25，这些数据为深入探究香料植物在该地区的分布规律提供了全新的视角。尽管缅甸和老挝两国民族利用的香料植物相似度相对较高，三国民族在香料植物利用方面存在一定重叠，但总体而言，三国民族利用香料植物的相似度偏低，表明不同民族在长期适应各自生态环境和文化背景下形成了独特的植物利用传统，这种差异是文化、生态和经济等多方面因素综合作用的结果。

中国、缅甸、老挝三国地区民族众多，文化背景差异显著。不同民族在漫长的生产生活实践中形成了独特的植物利用传统。例如，傣族、哈尼族和瑶族等民族在香料植物的利用上各有侧重，这种文化多样性在一定程度上导致了香料植物利用的差异(Shen et al., 1988)；在生态方面，中国、缅甸、老挝三国地理环境复杂多样，不同地区的生态位差异显著。以中国西双版纳的热带雨林生态系统与缅甸钦邦的山地生态系统为例，二者存在显著不同，这种生态环境的差异使得香料植物的分布以及利用方式也随之产生差异(陈进, 1998)。除此以外，三国经济发展水平不同，导致对香料植物的利用方式和需求有所不同。例如，中国在香料植物的栽培和加工方面技术相对先进，而缅甸和老挝仍以野生采集为主(Soejarto et al., 2012)。这种经济发展水平的差异，进一步降低了中国、缅甸、老挝三国香料植物利用的相似度。反之，这也意味着三国在香料植物资源利用上具有显著的互补性。

2.4　三国民族利用香料植物的利用价值

基于民族植物学定量分析中的利用价值UV指数的统计结果，可清晰看出中国、缅甸、老挝三国民族利用的香料植物在利用价值上存在差异。其中，

UV指数超过0.2的植物有22种, 从高到低依次为柠檬草(*Cymbopogon citratus*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、广西莪术(*Curcuma kwangsiensis*)、刺芹(*Eryngium foetidum*)、积雪草(*Centella asiatica*)、截形姜(*Zingiber neotruncatum*)、艾纳香(*Blumea balsamifera*)、罗勒(*Ocimum basilicum*)、姜黄(*Curcuma longa*)、蒜(*Allium sativum*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、闭鞘姜(*Costus speciosus*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、白花宫粉羊蹄甲(*Bauhinia variegata* var. *candida*)、胡椒(*Piper nigrum*)、红鸡蛋花(*Plumeria rubra*)、假蒟(*Piper sarmentosum*)、云南石梓(*Gmelina arborea*)、蒌叶(*Piper betle*)、竹叶花椒(*Zanthoxylum armatum*)、阳荷(*Zingiber striolatum*) (附录1)。这些高UV指数植物大多具备药食两用的功能, 充分体现了它们在当地民族日常生活中的重要性。

UV指数处于0.1–0.2之间的香料植物有54种, 其他338种UV指数则小于0.1。高UV指数的香料植物通常具有以下特征: 一是多功能性, 如药食两用; 二是易于获取, 能方便地被当地民族采摘或收集; 三是在民族文化中占据重要地位。以柠檬草为例, 它在傣族传统美食中被广泛用作调味料, 但在哈尼族传统医药中又被用于治疗肠胃疾病(Shi et al., 2024), 这种多功能性使其在不同民族中均具有较高的利用频率。此外, 这些高UV指数植物的生态适应性较强, 能够在研究区域内的多种生态环境中生长, 进一步促进了其广泛应用(陈进, 1998)。从经济角度看, 高UV指数植物具有较高的市场价值和开发潜力, 但目前许多高UV指数的香料植物仍依赖野生资源, 仅有少数实现了从野生采集到人工栽培, 再到市场销售的完整产业链, 这表明在香料植物资源的可持续利用方面仍有较大的发展空间。

2.5 三国民族利用香料植物的栽培、市场和保护情况

除了在野生植物采集方面积累了丰富经验, 傣族、哈尼族和瑶族在野生植物的引种和栽培方面也有着悠久的传统。根据调查, 在研究区域当地民族利用的414种香料植物中, 可从野外采集的有304种, 其中177种完全依赖野生采集, 表明当地民族对野生香料植物资源有较高依赖性, 而这种依赖性可能给当地野生植物资源带来巨大的环境保护压力。

中国、缅甸、老挝三国民间栽培的香料植物有185种, 占比44.69%。野生食用植物是少数民族日常生活的必需品, 在其经济收入中占有重要地位。该地区居民在当地市场销售的野生可食植物达101种, 占比24.40%; 且有超过12%的野生植物在市场上流通, 这可能进一步加剧当地人与自然之间的矛盾(表7)。具体而言, 一方面对野生食用植物的巨大市场需求为当地居民增加了收入, 另一方面也刺激了对野生植物的采集强度, 进而加大了对生物多样性保护的压力。以姜状三七(*Panax zingiberensis*)为例, 当地人用其和鸡肉熬制养生汤, 或者泡入传统土酒做滋补酒。目前姜状三七已被列为濒危物种, 这意味着可能需要投入更多的保护力量, 来缓解这种过度采集带来的潜在压力。然而, 在这些香料植物中, 完全实现从野生到栽培再到市场全链条的种类仅占12%左右。这一数据一方面说明了当地对香料植物有较大的市场需求, 且在可持续利用方面还有较大的研究和发展空间; 另一方面也揭示从依赖野生到人工栽培、从消耗野外资源到产业化种植以满足市场需求过程中, 还有许多研究工作需要进一步开展。因此, 需要加强相关工作, 以实现资源的合理利用和生态环境的保护。

本次调查统计发现414种香料植物中处于保护或受威胁的物种有52种(12.56%)。基于调查所得的利用状况、市场销售信息、资源来源、已有栽培情况、保护等级、受威胁状况等资料, 筛选和推荐了15种在该地区需要进一步深入研究和保护的香料植物(表8), 特别是云南石梓(*Gmelina arborea*)、毛大叶臭花椒(*Zanthoxylum myriacanthum* var.

表7 中国、缅甸、老挝民族利用香料植物资源来源组成
Table 7 Source composition of utilized spice plants in China, Myanmar and Laos

来源 Source	物种数 No of species	比例 Proportion (%)
纯野生 Wild	178	43.00
栽培和市场有售 Cultivated and commercially available	65	15.70
野生和市场有售 Wild and commercially available	51	12.32
野生、栽培和市场有售 Wild, cultivated and commercially available	50	12.08
纯栽培 Cultivated	44	10.63
野生和栽培 Wild and cultivated	26	6.28

表8　筛选和推荐的15种值得进一步深入研究和加强保护的香料植物
Table 8　Fifteen selected spice plants for further research and conservation

序号 Serial number	中文名 Chinese name	科 Family	学名 Scientific name	NPLC	TSLCHP	IUCN	UV
1	姜状三七	Araliaceae	*Panax zingiberensis*	1	EN	EN	0.02
2	香子含笑	Magnoliaceae	*Michelia gioii*	2	EN	DD	0.06
3	土沉香	Thymelaeaceae	*Aquilaria sinensis*	2	VU	VU	0.02
4	茴香砂仁	Zingiberaceae	*Etlingera yunnanensis*	2	VU	LC	0.02
5	紫檀	Leguminosae	*Pterocarpus indicus*	–	CR	EN	0.07
6	毛叶樟	Lauraceae	*Camphora mollifolia*	–	EN	EN	0.03
7	云南石梓	Lamiaceae	*Gmelina arborea*	–	VU	LC	0.20
8	木橘	Rutaceae	*Aegle marmelos*	–	VU	NT	0.14
9	卡西松	Pinaceae	*Pinus kesiya*	–	VU	LC	0.06
10	辣椒砂仁	Zingiberaceae	*Amomum capsiciforme*	–	–	CR	0.08
11	厚叶沉香	Thymelaeaceae	*Aquilaria crassna*	–	–	CR	0.03
12	黄樟	Lauraceae	*Camphora parthenoxylon*	–	–	EN	0.06
13	喙花姜	Zingiberaceae	*Rhynchanthus beesianus*	–	EN	–	0.02
14	毛大叶臭花椒	Rutaceae	*Zanthoxylum myriacanthum* var. *pubescens*	–	VU	–	0.12
15	毛姜花	Zingiberaceae	*Hedychium villosum*	–	VU	–	0.03

NPLC: 国家重点保护野生植物名录; TSLCHP: 中国高等植物受威胁名录; IUCN: 世界自然保护联盟濒危物种红色名录; 1和2: 保护等级; UV: 利用价值; EN: 濒危, VU: 易危, CR: 极危, NT: 近危, LC: 无危, DD: 数据缺乏; –: 未纳入。
NPLC, National List of Protected Wild Plants of China; TSLCHP, Threatened Species List of Higher Plants of China; IUCN, International Union for Conservation of Nature; 1 and 2, Protection levels; UV, Use value; EN, Endangered; VU, Vulnerable; CR, Critically Endangered; NT, Near Threatened; LC, Least Concern; DD, Data Deficient; –, Not included.

pubescens)等利用频率较高的香料植物更加值得关注。

3　结论与展望

中国、缅甸、老挝三国民族利用的香料植物有63科206属414种(含变种), 这与其位于全球生物多样性热点地区紧密相关。前期研究表明, 作为全球语言、文化和生物多样性极为丰富的地区, 东南亚地区的民族植物学研究现状十分薄弱, 大都不为外界所知, 尤其老挝和缅甸相关的研究论文发表十分稀少, 表明该地区仍未充分意识到生物和文化多样性的全部潜力, 需要加强研究力度(Hidayati et al., 2015)。本研究也从香料植物民族传统利用知识的丰富性, 进一步证明了这一观点。未来, 其他具有食用、药用及各类经济、生态价值的资源植物的相关研究也需要进一步加强。

该地区香料植物资源保护与可持续利用中存在诸多问题和挑战。从资源获取的来源来看, 研究地区居民对野生香料植物的依赖比重较高, 存在过度采集情况, 可能会给生态环境和生物多样性保护带来巨大压力。例如, 研究中发现有178种香料植物完全依赖野生采集, 占总数的43%。这种高依赖度不仅可能导致野生资源的枯竭, 还可能对生态系统的稳定性造成威胁。这与中国、老挝、越南三国跨境的江城哈尼族彝族自治县的野生食用植物的民族植物学研究结果一致(Cao et al., 2020), 表明在香料植物资源的保护和可持续利用方面还有较大的研究和技术空白, 特别建议借鉴香樟等香料植物开发与保护的成功经验(刘杨等, 2021; 肖祖飞等, 2022), 一方面应加强香料植物的组培快繁和高产栽培技术研发(姜睿等, 2021), 推广生态可持续栽培模式, 减少对野生资源的依赖; 另一方面应建立完善的民族传统利用资源相关知识的获取、保护和惠益机制(贾韶琦和张巨保, 2024), 将濒危物种纳入地方极小种群重点保护名录(Chang et al., 2025), 限制野生采集, 并通过建立自然保护小区和种质资源迁地保护库, 有效保护其遗传多样性, 促进可持续利用(Ding et al., 2021; Chang et al., 2025)。

本研究完成了全球第一份系统、全面展示中国、缅甸、老挝三国热带地区民族利用香料植物的

民族植物学编目。该编目不仅展示了该地区民族利用香料植物的多样性, 也介绍了其相关食用和药用的传统知识, 为开展适合工业化开发的香料植物筛选, 深入分析其主要成分和生物活性功能, 满足人民日益增长的对美好健康生活的追求以及实现可持续利用当地香料植物资源等方面提供扎实的本底数据和知识原型。然而, 当前香料植物资源的保护现状不容乐观, 野生资源依赖度高和部分物种濒危等问题亟待解决。通过加强快繁和栽培技术研发、建立就地自然保护小区和迁地保护资源库、推动跨国境合作、传统知识惠益分享以及开展公众教育等措施, 可以有效促进香料植物资源的可持续利用和生物多样性保护, 为“一带一路”倡议下的绿色合作提供科学支持。

致谢: 感谢审稿人提供的宝贵修改意见。感谢缅甸林业研究所、老挝生物技术与生态研究所和当地村民的支持和帮助, 在此一并致谢。

ORCID

浦瑀璐 https://orcid.org/0009-0004-3235-3641
周仕顺 https://orcid.org/0000-0001-8935-542X
李仁 https://orcid.org/0000-0003-0810-0359

参考文献

A H (1999) Xishuangbanna Nahani Medicine. Yunnan Nationalities Press, Kunming. (in Chinese) [阿海 (1999) 西双版纳哈尼族医药. 云南民族出版社, 昆明.]

Bai HT, Liu L (2006) The Spice Route. Forest & Humanity, (10), 16–21. (in Chinese) [白红彤, 刘刘 (2006) 香料之路. 森林与人类, (10), 16–21.]

Benz BF, Cevallos JE, Santana FM, Rosales JA, Graf SM (2000) Losing knowledge about plant use in the Sierra de Manantlan Biosphere Reserve, Mexico. Economic Botany, 54, 183–191.

Cao YL, Li R, Zhou SS, Song L, Quan RC, Hu HB (2020) Ethnobotanical study on wild edible plants used by three trans-boundary ethnic groups in Jiangcheng County, Pu’er, Southwest China. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 16, 66.

Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. Science Advances, 1, e1400253.

Chang YH, Zhang RG, Liu Y, Liu YH, Tao LD, Liu DT, Ma YP, Sun WB (2025) Conservation genomics of a threatened subtropical *Rhododendron* species highlights the distinct conservation actions required in marginal and admixed populations. The Plant Journal, 122, e70175.

Chen J (1998) Remarkable achievements in scientific and technological cooperation between Xishuangbanna Tropical Botanical Garden and institutions in Northern Laos. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 13, 391–393. (in Chinese) [陈进 (1998) 西双版纳热带植物园与老挝北部地区科技合作成效显著. 中国科学院院刊, 13, 391–393.]

Cheng BQ, Yu XJ (1995) Yunnan Tropical and Subtropical Spice Plants. Yunnan University Press, Kunming. (in Chinese) [程必强, 喻学俭 (1995) 云南热带亚热带香料植物. 云南大学出版社, 昆明.]

Cheng BQ, Yu XJ, Ding JK (2001) Yunnan Spice Plant Resources and Their Utilization. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [程必强, 喻学俭, 丁靖垲 (2001) 云南香料植物资源及其利用. 云南科技出版社, 昆明.]

Corlett RT (2016) Plant diversity in a changing world: Status, trends, and conservation needs. Plant Diversity, 38, 10–16.

Cunningham AB (2001) Applied Ethnobotany: People, Wild Plant Use and Conservation. Earthscan Publications, London.

DeFilipps RA, Krupnick GA (2018) The medicinal plants of Myanmar. PhytoKeys, 102, 1–341.

Delang CO, Toro M, Charlet-Phommachanh M (2013) Coffee, mines and dams: Conflicts over land in the Bolaven Plateau, southern Lao PDR. The Geographical Journal, 179, 150–164.

Delecti Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae (2004) Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会 (2004) 《中国植物志》. 科学出版社, 北京.]

Ding HB, Quan DL, Zeng XD, Li JW, Tan YH (2021) *Zingiber calcicola* (Zingiberaceae), a new species from a limestone area in south Yunnan, China. Phytotaxa, 525, 65–69.

Ding HB, Zhou SS, Yang B, Li R, Maw MB, Maung KW, Tan YH (2019) Taxonomic studies on *Amomum* Roxburgh s.l. (Zingiberaceae) in Myanmar I: Two new species and two new records for the flora of Myanmar. Phytotaxa, 418, 158–170.

DOTM (Myanmar Ministry of Health, Department of Traditional Medicine) (2000) Medicinal Plants of Myanmar (Vol. 1). Ministry of Health, Yangon.

Fan RY, Gou Y, Wang C, Yang NT, Wang YH (2019) Ethnobotanical survey on mosquito-repellent plant used by Hani people in Xishuangbanna. Guihaia, 39, 359–374. (in Chinese with English abstract) [范汝艳, 苟祎, 王趁, 杨念婷, 王雨华 (2019) 西双版纳哈尼族驱蚊植物的民族植物学调查研究. 广西植物, 39, 359–374.]

Feng JC, Xue DY, Long CL (2014) The concept, theory and method of ethnoecology. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition), 23(4), 5–10. (in Chinese with English abstract) [冯金朝, 薛达元, 龙春林 (2014) 民族生态学的概念、理论与方法. 中央民族大学学报(自然科学版), 23(4), 5–10.]

Geng YF, Wang YH (2024) A brief synthesis of research approaches and theoretical hypotheses in Chinese Ethnobotany. Biodiversity Science, 32, 24002. (in Chinese with English abstract) [耿彦飞, 王雨华 (2024) 浅谈中国民族植物学的研究思路和理论假设. 生物多样性, 32, 24002.]

Gowda V, Kress WJ, Htun T (2012) Two new species of gingers (Zingiberaceae) from Myanmar. PhytoKeys, 13, 5–14.

Hidayati S, Franco FM, Bussmann RW (2015) Ready for phase 5—Current status of ethnobiology in Southeast Asia. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 11, 17.

Huai HY, Hasibagen (2010) Quantitative methods in ethnobotanical research (Ⅱ). Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 39, 417–419. (in Chinese with English abstract) [淮虎银, 哈斯巴根 (2010) 民族植物学研究中的定量方法(Ⅱ). 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 39, 417–419.]

IOTM (Ministry of Public Health, Institute of Traditional Medicine) (2013) Medicinal Plants and Herbs in the Lao People's Democratic Republic (Vol. 1). Ministry of Public Health, Vientiane.

IOTM (Ministry of Public Health, Institute of Traditional Medicine) (2019) Medicinal Plants of the Ex-Situ Medicinal Plants Preserved in Veunkham (Vol. 1). Ministry of Public Health, Vientiane.

IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2015) Authority Files for Habitats & Threats. http://www.iucn.org/themes/ssc/sis/authority.html. (accessed on 2025-10-10)

Jia SQ, Zhang JB (2024) Necessity and response of the special legislation on access and benefit sharing of biological genetic resources. Biodiversity Science, 32, 24383. (in Chinese with English abstract) [贾韶琦, 张巨保 (2024) 生物遗传资源获取与惠益分享专门立法的重启必要与现实回应. 生物多样性, 32, 24383.]

Jiang R, Zhang BH, Peng Y, Li F, Jin ZN, Xiao ZF (2021) Research progress of *Cinnamomum tenuipilum*, an endangered plant. Anhui Agricultural Science Bulletin, 27(16), 80–83, 114. (in Chinese with English abstract) [姜睿, 张北红, 彭艺, 李凤, 金志农, 肖祖飞 (2021) 濒危树种细毛樟研究进展. 安徽农学通报, 27(16), 80–83, 114.]

Kosaka Y, Xayvongsa L, Vilayphone A, Chanthavong H, Takeda S, Kato M (2013) Wild edible herbs in paddy fields and their sale in a mixture in Houaphan Province, the Lao People's Democratic Republic. Economic Botany, 67, 335–349.

Ladio AH, Lozada M (2000) Edible wild plant use in a Mapuche community of northwestern Patagonia. Human Ecology, 28, 53–71.

Ladio AH, Lozada M (2001) Nontimber forest product use in two human populations from northwest Patagonia: A quantitative approach. Human Ecology, 29, 367–380.

Ladio AH, Lozada M (2003) Comparison of wild edible plant diversity and foraging strategies in two aboriginal communities of northwestern Patagonia. Biodiversity & Conservation, 12, 937–951.

Li CY, Feng AG (2014) Research progress and application of edible natural spices. Agricultural Engineering, 4(3), 55–57. (in Chinese with English abstract) [李春艳, 冯爱国 (2014) 食用天然香料的应用及研究进展. 农业工程, 4(3), 55–57.]

Li HM, Ma YX, Aide TM, Liu WJ (2008) Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics. Forest Ecology and Management, 255, 16–24.

Li R, Shine L, Li W, Zhou SS (2020) A new species of *Zingiber* (Zingiberaceae) from Natma Taung National Park, Chin State, Myanmar. PhytoKeys, 138, 131–137.

Liu Y, Qiu HM, Lian JX, Yuan RN, Li Y, Bao XY, Yang J, Zhao L (2021) Research progress on essential oil from *Cinnamomum camphora*. Farm Products Processing, (19), 77–80. (in Chinese with English abstract) [刘杨, 邱慧敏, 廉嘉欣, 袁睿楠, 李莹, 包心怡, 杨晋, 赵立 (2021) 香樟精油研究进展. 农产品加工, (19), 77–80.]

Long CL (2013) Introduction to modern Ethnobotany. Plant Diversity and Resources, 35, 438–442. (in Chinese with English abstract) [龙春林 (2013) 现代民族植物学引论. 植物分类与资源学报, 35, 438–442.]

Maiti P (2016) Global climate change and its effects on biodiversity. Biodiversity Journal, 7, 311–318.

Ong HG, Ling SM, Win TTM, Kang DH, Lee JH, Kim YD (2018) Ethnomedicinal plants and traditional knowledge among three Chin indigenous groups in Natma Taung National Park (Myanmar). Journal of Ethnopharmacology, 225, 136–158.

Pei SJ (2013) Ethnobotany and its modern application research. Plant Diversity and Resources, 35, 397–400. (in Chinese with English abstract) [裴盛基 (2013) 民族植物学及其现代应用研究. 植物分类与资源学报, 35, 397–400.]

Pei SJ (2024) Inheritance of Chinese ethnic cultural-roots, creative development of ethnobotany in China. Journal of West China Forestry Science, 53(4), 1–6. (in Chinese with English abstract) [裴盛基 (2024) 延续中华民族植物文化根脉, 创新发展我国民族植物学. 西部林业科学, 53(4), 1–6.]

Pei SJ, Alan H, Wang YH (2020) Vital roles for ethnobotany in conservation and sustainable development. Plant Diversity, 42, 399–400.

Pollmer U (2000) The spice trade and its importance for European expansion. Migration & Diffusion, 1, 58–72.

Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened species list of China's higher plants. Biodiversity Science, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜,

于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. 生物多样性, 25, 696–744.]

Qin TF, Zhou TS (2011) Development and Utilization of Yunnan Characteristic Natural Spice Resources. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [秦太峰, 周铁生 (2011) 云南特色天然香料资源开发与利用. 中国农业科学技术出版社, 北京.]

Reddy CS, Pasha SV, Satish KV, Unnikrishnan A, Chavan SB, Jha CS, Diwakar PG, Dadhwal VK (2019) Quantifying and predicting multi-decadal forest cover changes in Myanmar: A biodiversity hotspot under threat. Biodiversity and Conservation, 28, 1129–1149.

Shen PQ, Sun HD, Pei SJ (1988) Ethnobotany of flea grass (*Adenosma buchneroides* Bonati), a traditional cultivated plant of the Hani people, Xishuangbanna, Yunnan, China. In: Ethnobiology: Implications and Applications: Proceedings of the First International Congress of Ethnobiology (eds Posey DA, Overal WL), pp. 305–309. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, Brazil.

Shi YR, Zhang XQ, Pei SJ, Wang YH (2024) Ethnopharmacological study on *Adenosma buchneroides* Bonati inhibiting inflammation via the regulation of TLR4/MyD88/NF-κB signaling pathway. Natural Products and Bioprospecting, 14, 36.

Shi YX, Hu, HB, Xu YK, Liu AZ (2014) An ethnobotanical study of the less known wild edible figs (genus *Ficus*) native to Xishuangbanna, Southwest China. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 10, 68.

Shin T, Fujikawa K, Moe AZ, Uchiyama H (2018) Traditional knowledge of wild edible plants with special emphasis on medicinal uses in Southern Shan State, Myanmar. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 14, 48.

Soejarto DD, Gyllenhaal C, Kadushin MR, Southavong B, Sydara K, Bouamanivong S, Xaiveu M, Zhang HJ, Franzblau SG, Tan GT, Pezzuto JM, Riley MC, Elkington BG, Waller DP (2012) An ethnobotanical survey of medicinal plants of Laos toward the discovery of bioactive compounds as potential candidates for pharmaceutical development. Pharmaceutical Biology, 50, 42–60.

State Administration of Traditional Chinese Medicine Editorial Board of Zhonghua Bencao (2005) Zhonghua Bencao: Dai Medicine Volume. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [国家中医药管理局中华本草编委会 (2005) 中华本草·傣药卷. 上海科学技术出版社, 上海.]

Sydara K, Xayvue M, Souliya O, Elkington BG, Soejarto DD (2014) Inventory of medicinal plants of the Lao People's Democratic Republic: A mini review. Journal of Medicinal Plant Research, 8, 1262–1274.

Tanaka N, Aung M (2017) A new species of *Zingiber* (Sect. *Dymczewiczia*: Zingiberaceae) from Northwestern Myanmar. Phytotaxa, 316, 195–199.

Van der Veen M, Morales J (2015) The Roman and Islamic spice trade: New archaeological evidence. Journal of Ethnopharmacology, 167, 54–63.

Xiao ZF, Xing MX, Wei X, Zhang BH, Wang YB, Li F, Jin ZN (2022) Study on tissue culture technology of stem segment of *Cinnamomum camphora* 'ganning 1'. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 38(1), 61–68, 75. (in Chinese with English abstract) [肖祖飞, 邢梦雪, 魏希, 张北红, 王颜波, 李凤, 金志农 (2022) 樟树赣柠1号茎段组织培养研究. 广西科学院学报, 38(1), 61–68, 75.]

Xu YK, Tao GD, Liu HM, Yan KL, Dao XS (2004) Wild vegetable resources and market survey in Xishuangbanna, Southwest China. Economic Botany, 58, 647–667.

Yang J, Wang YH, Luo JF, Long CL (2017) *Piper magen* (Piperaceae), a new species from Yunnan, China. Phytotaxa, 316, 189.

Yang RF, Luo Y, Yang K, Hong L, Zhou XL (2019) Analysis of forest deforestation and its driving factors in Myanmar from 1988 to 2017. Sustainability, 11, 3047.

Zhou TS (2004) Current situation and development prospect of natural spice industry in Yunnan Province. In: Proceedings of the 2004 China Academic Symposium on Flavors and Fragrances, pp. 18–22. Yunnan Spice Research and Development Center, Kunming. (in Chinese with English abstract) [周铁生 (2004) 云南省天然香料产业现状及发展前景. 见: 2004年中国香料香精学术研讨会论文集, pp. 18–22. 云南省香料研究开发中心, 昆明.]

(责任编委: 杨雪飞　责任编辑: 李会丽)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025041

附录 1 中国缅甸老挝民族利用香料植物的民族植物学编目。香料植物科和种的分类和命名遵循 APG IV 系统，其排序根据科的字母顺序，再根据种的字母顺序排列。1. 当地名：C 为钦族，D 为傣族，H 为哈尼族，K 为克钦族，KM 为克木人，L 为老挝人，M 为缅甸人，Y 为瑶族；2. 资源来源：C 是有栽培，M 是市场有售，W 是野生采集；3. UV：UV≥0.2 为高价值物种；4. 参考来源“作者+年份”对应文末参考文献。

Appedix 1 Ethnobotanical Inventory of Spice Plants Utilized by Ethnic Groups in China, Myanmar, and Laos. The classification and nomenclature of spice plant families and species follow the APG IV system, with families arranged alphabetically and species alphabetically within each family. 1. Local names: C = Chin, D = Dai, H = Hani, K = Kachin, KM = Khmu, L = Lao, M = Myanmar, Y = Yao. 2. Resource sources: C = cultivated, M = marketed, W = wild-collected. 3. UV: Species with UV ≥ 0.2 are considered high-value species. 4. Reference sources: “Author + year” refer to the corresponding references at the end of the text.

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
糯米香茶	*Strobilanthes tonkinensis* Lindau	Acanthaceae	D: nuo mi xiang cha; M: la phat mawe; L: lar kyar sanon	草本	茎叶	饮料、驱蚊	泡茶增香；佩戴驱蚊	C M	0.06	(程必强和喻学俭, 1995; 潘玉梅等, 2006; 范汝艳等, 2019; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
菖蒲	*Acorus calamus* L.	Acoraceae	H: lang xia; M: lin lay; K: nan pan si; L:harng khao narm, warn narm	草本	全草	药用（胃痛、利尿、感冒等）	生嚼、包敷、煮水喝	W C M	0.22	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Soejarto et al, 2002; 方利英等, 2006; 潘玉梅等, 2006; Ministry of Health DOTM, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ong et al, 2018; Ministry of Public Health IOTM,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2019; Jianwitchayakul et al, 2019; Ahn et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Zhou et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
狭叶菖蒲	*Acorus calamus* var. *angustatus* Besser	Acoraceae	L: ya di tom kai	草本	根茎	芳香健胃药	煮水喝	C M	0.01	(Phengmala et al, 2023)
金钱蒲	*Acorus gramineus* Soland.	Acoraceae	D: han hao pa; H: long xia; L: hang khao; Y: huang dao	草本	根茎	药用（治疗开窍、健忘、祛湿化痰、癫痫等）	煮水喝	W M	0.08	(阿海, 1999; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Kraisintu, 2003; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; 蔡秀江等, 2018; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
细青皮	*Altingia excelsa* Noronha	Altingiaceae	L:nan ta yok	乔木	茎、树脂	药用(治疗睾丸炎、白癜风和疥疮、祛风健胃、祛痰）	煮水喝	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
土荆芥	*Dysphania ambrosioides* (L.)	Amaranthaceae	H: ho ni sa; L: sa ban thong	草本	嫩茎叶	蔬菜、驱蚊、打虫	开水烫后沾调料食用; 铺放驱蚊	W	0.08	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Kraisintu, 2003; 李秦晋

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Mosyakin & Clemants									等, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2018; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
火葱	*Allium ascalonicum* L.	Amaryllidaceae	L:phuk hom bua deng	草本	叶	制作汤剂、汁液、敷料	作调料蔬菜食用	C	0.03	(Kyin & Lwin, 2015; Dubost et al, 2019; Phengmala et al, 2023)
洋葱	*Allium cepa* L.	Amaryllidaceae	M: kyet thun ni	草本	鳞茎	调味香料、蔬菜; 药用（发烧、耳炎、眼内灌注滴剂、皮肤病）	凉拌或煮汤	C M	0.13	(Ministry of Health DOTM, 2000; 张卫明和肖正春, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; Tin & Wai, 2020; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
藠头	*Allium chinense* G. Don	Amaryllidaceae	D:huo huang; K: sheu; L: chit galo; M: taung yar kyal thar;	草本	全草	蔬菜、药用（健胃）	炒制; 鳞茎腌制食用	C M	0.04	(Ministry of Public Health IOTM, 2018; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
葱	*Allium fistulosum* L.	Amaryllidaceae	K: ka daw ma shal; M: kyet ton ni;L: phack horm bua, phack bua	草本	全草	调味香料；药用（感冒、糖尿病、骨质疏松症、消炎、昆虫或蛇咬伤口等）	煮汤或凉拌	C	0.15	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 刘怡涛和龙春林, 2002; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; 范汝艳等, 2019; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
宽叶韭	*Allium hookeri* Thwaites	Amaryllidaceae	D: pa mi; Y: dong; H: guo ha, gu qi gu ba; M: shue	草本	根、叶	调味蔬菜；药用（消化不良、腹泻）	叶舂制调料；根腌制食用	C M	0.12	(何棠, 2009; 陈光等, 2010; 陶川, 2018; Yang & Yu, 2018; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
蒜	*Allium sativum* L.	Amaryllidaceae	D: he huan; M: kyet ton phyu； L: ga loe phyu; H: si pi; Y: dun bi	草本	叶、鳞茎	调味香料；药用（皮肤感染、驱蚊、支气管炎、肾结石、降血压等）	作牛羊肉调味；泡酒或涂抹	C M	0.24	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Fujikawa et al, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Nyotin, 2008; 陈光等, 2010; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; 陶川, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; 范汝艳等, 2019; Htun et al, 2019; Tin & Wai, 2020; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
韭	*Allium tuberosum* Rottler ex Spreng.	Amaryllidaceae	D:pabian; H: xi ji; Y:dong; L: phack horm pen, phack pen; M:gyu myit	草本	嫩叶、花、根	蔬菜、调味香料；药用（支气管炎、高血压、保胎）	叶作蔬菜；花茎炒食；根泡酒	C M	0.13	(禹平华等, 1985; 阿海, 1999; Nyotin, 2008; 陈光等, 2010; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; 陶川, 2018; Dubost et al, 2019; Htun et al, 2019; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										中国西双版纳州和普洱市调查)
多星韭	*Allium wallichii* Kunth	Amaryllidaceae	C:kung shu	草本	叶	药用（消化不良、头晕）	煮水喝	W	0.02	(Ong et al, 2018; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
清香木	*Pistacia weinmannifolia* J. Poisson ex Franch.	Anacardiaceae	L: nam kieng dam	乔木	全株	调味香料；药用（肺部感染）	鲜叶切碎调味；煮水喝	W	0.05	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Kyin & Lwin, 2015; Kongmany et al, 2018)
槟榔青	*Spondias pinnata* (L. F.) Kurz	Anacardiaceae	D: guo ma guo；H: pai luo si; Y: ga li le biu ,bu guo dian; M: gwe thi, gway thee	乔木	果、嫩茎叶、根、树皮	蔬菜、调味香料；药用（镇心安神、清热解毒、止咳化痰、消肿止痛、心慌心悸等）	生吃、泡酒、煮水喝	W C M	0.15	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Cao et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Tin & Wai, 2020; Moyon & Chara, 2021; Uczaj et al, 2021; Haokip & Panmei, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
假鹰爪	*Artabotrys hexapetalus* (L.f.) Bhandari	Annonaceae	M: kadat ngan, padat nygan, tadaing hmwe	灌木	叶、花、根	药用（叶治霍乱；果根治疟疾）	煮水喝	C	0.02	(Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
阔叶依兰	*Cananga brandisiana* (Pierre) Saff.	Annonaceae	L:may ka seng	乔木	根	治疗发热	冷水浸泡	W	0.01	(Elliotta et al, 2020)
依兰香	*Cananga odorata* (Lam.) Hook.f. & Thomson	Annonaceae	L: kdan nga; M: kadat ngan, saga sein, ylang ylang	乔木	花	药用（高血压、眼睛发炎、眼睛发炎、疟疾、痛风等）	煮水喝、包敷	W C	0.06	(Kraisintu, 2003; Van et al, 2004; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Thantsin et al, 2020; Tin & Wai, 2020)
莳萝	*Anethum graveolens* L.	Apiaceae	M: sa meik, sa mon nyo	草本	嫩茎叶、果实	蔬菜；药用（消化不良、腹泻）	嫩茎叶凉拌；种子调味；煮水喝	C	0.05	(Kyin & Lwin, 2015; Naito et al, 2017; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Zhang et al, 2021)
当归	*Angelica sinensis* (Oliv.) Diels	Apiaceae	Han: danggui	草本	全草	蔬菜、药用（补血活血、调经止痛、润肠通便）	煮肉汤	W C M	0.04	(何棠, 2009; Kyin & Lwin, 2015; 蔡秀江等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018)
旱芹	*Apium graveolens* L.	Apiaceae	M: ta yoke nan nan; Y: yaong	草本	全草	蔬菜、调味香料；药用（高血压、助消化）	茎叶果调味；捣碎喝汁	C M	0.13	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										密支那市调查)
积雪草	*Centella asiatica* (L.) Urban	Apiaceae	C: ranjneh hnah; D: par nuo; H: da gong; KM:la wan ri; M: myin hkwa, myin khwar pin, Y: sha bu luo	草本	全草	蔬菜、药用（清热利湿、解毒消肿、失眠健忘，糖尿病、感冒、发烧等）	凉拌或煮汤	W C M	0.31	(Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; Lamxay et al, 2011; de Boer et al, 2012; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Sydara et al, 2014; Kyin & Lwin, 2015; 蔡秀江等, 2018; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Yang & Yu, 2018; Dubost et al, 2019; Htun et al, 2019; Jianwitchayakul et al, 2019; Cao et al, 2020; Elliotta et al, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Uczaj et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022; Haokip & Panmei, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										邦 Natma Taung 国家公园调查)
芫荽	*Coriandrum sativum* L.	Apiaceae	D:pa bang; Y:yanxi; K: manga; M: nan nan	草本	茎叶	蔬菜、调味香料；药用（头痛、咽喉痛、支气管炎和哮喘等）	茎叶调味	C M	0.15	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Kyin & Lwin, 2015; Naito et al, 2017; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Tin & Wai, 2020; Kawase et al, 2021; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
野胡萝卜	*Daucus carota* L.	Apiaceae	M: mon la ni, u wa yaing	草本	根、果、花	药用（利尿、消化不良等）	煮水喝	W	0.04	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kawase et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
海滨刺芹	*Eryngium caeruleum* M. Bieb.	Apiaceae	Han: hai bin ci qin	草本	根	药用（麻痹症、补益）	煮水喝	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
刺芹	*Eryngium foetidum* L.	Apiaceae	D: pa bong; H: die ma a shuo; K: pan si; L: phak hom pe, hom piang; KM: hong bo bi; M: shan nan nan; Y: long bia jing	草本	叶	调味香料；药用（利尿、水肿、高血压、及蜈蚣、蛇咬伤等）	牛羊肉调味；捣碎包敷；煮水喝	W C M	0.32	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 杨敏杰等, 2005; 李秦晋等, 2007; Nyotin, 2008; 何棠, 2009; 陈光等, 2010; Dubost, 2010; Ghorbani et al, 2011; 郭凤根等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Yang & Yu, 2018; Dubost et al, 2019; Cao et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Uczaj et al, 2021; Zhang et al, 2021; Haokip & Panmei, 2022; Zhang et al, 2022; Khamphilavong et al, 2023; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
茴香	*Foeniculum vulgare* Mill.	Apiaceae	D: paji, jinji; H: mo shuo; M: sa mate yeat, samon sabar; Y: zhe gan dong	草本	嫩茎叶、种子	蔬菜、药用（助消化、催乳等）	嫩茎叶调味；种子调味；煮水喝	C M	0.17	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 张卫明和肖正春, 2007; Nyotin, 2008; Kyin & Lwin, 2015; 蔡秀江, 2018; Defilipps & Krupnick, 2018; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
二管独活	*Heracleum bivittatum* H. de Boissieu	Apiaceae	Y: mu ling wong	草本	根	蔬菜	煮汤、药膳	W	0.01	(Cao et al, 2020)
天胡荽	*Hydrocotyle sibthorpioides* Lam.	Apiaceae	D: pa nuo ruai	草本	叶	蔬菜、药用（清热利湿、祛痰止咳）	凉拌或煮汤	W M	0.05	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 蔡秀江等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Moyon & Chara, 2021)
川芎	*Ligusticum chuanxiong* Hort.	Apiaceae	Han: chuan xiong	草本	根茎	药用（活血行气、祛风止痛）	药膳	C M	0.02	(蔡秀江等, 2018; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
水芹	*Oenanthe javanica* (Blume) DC.	Apiaceae	D: pa an o, pa ne; H: ou guo e xia, ou ge; M: Za	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（感冒发烧）	炒、煮；凉拌或煮汤	W C M	0.16	(肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 方利英等, 2006; 李秦晋

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			lae; Y: gai weng							等, 2007; 何棠, 2009; 郭凤根等, 2018; Shin et al, 2018; Cao et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
杏叶茴芹	*Pimpinella candolleana* Wight et Arn.	Apiaceae	Han: shan dang gui	草本	全草	药用（祛风解表、行气散结等）	药膳	W M	0.01	(蔡秀江等, 2018)
细叶糙果芹	*Trachyspermum ammi* (L.) Sprague	Apiaceae	M: samone hpyu	草本	种子	药用（提高食欲、促进消化等）	煮水喝	W	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018)
滇南糙果芹	*Trachyspermum roxburghianum* (DC.) H. Wolff	Apiaceae	M: kant ba lu.	草本	种子	药用（兴奋剂、强心剂、助消化）	煮水喝	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
白鸡蛋花	*Plumeria alba* L.	Apocynaceae	champa khao	乔木	花、茎	药用（发烧、头痛、子宫痛、糖尿病等）	煮水喝	C	0.06	(Ministry of Public Health IOTM, 2013; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al, 2020; Elliott, 2020; Elliotta et al, 2020)
钝叶鸡蛋花	*Plumeria obtusa* L.	Apocynaceae	D: nuo zhang ba die; M: ka	乔木	花	蔬菜、药用（肝炎）	炒鸡蛋或煮水喝	C M	0.06	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; Kyin & Lwin,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			ti par pan							2015; Yang & Yu, 2018; Ahn et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
红鸡蛋花	*Plumeria rubra* L.	Apocynaceae	D: zhan badie, muo ke zhang ba, guo luo zhang ba die; M: mawk sam ka, mawk sam pailong	乔木	花、叶和树皮	蔬菜、药用（利水化石、清火解毒、通便利尿、哮喘、降血压等）	拌蛋清油炸；煮水喝或洗澡	C M	0.21	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; 陶川, 2018; Ahn et al, 2020; Elliotta et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Zhang et al, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
须药藤	*Stelmacrypton khasianum* (Kurz) Baill.	Apocynaceae	D: jiao ha huang	木质藤本	根	药用（通气止痛、止咳化痰、续筋接骨等）	煮肉汤、煮水喝、药膳	W M	0.02	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 蔡秀江等, 2018)
狗牙花	*Tabernaemontana divaricata* (L.) R.Br. ex	Apocynaceae	L:dok phoud	灌木	全株	药用（清热降压、解毒消肿等）	煮水喝	W C	0.01	(Phengmala et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Roem. & Schult.									
夜来香	*Telosma cordata* (Burm. f.) Merr.	Apocynaceae	Han: ye xiang teng	木质藤本	花、叶子	叶药用	焯水后炒制	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
灰叶冬青	*Ilex tetramera* (Rehder) C.J. Tseng	Aquifoliaceae	H: shi zhong	灌木	叶	药用（跌打损伤、消炎）	捣碎后包敷	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
千年健	*Homalomena occulta* (Lour.) Schott	Araceae	D: mang huang; L: kheeng khaeng par kang; Y: yong miao; M: deng guo	草本	茎	药用（调补水血、祛风止痛、续筋接骨、解毒止痒等）	煮水喝	W M	0.06	(Kraisintu, 2003; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Delang, 2007; 蔡秀江等, 2018; Dubost et al, 2019; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
虎刺楤木	*Aralia armata* (Wall.) Seem.	Araliaceae	D: pa dan; H: gong qia gan da ha, a guo le; Y: dong gong yang	乔木	嫩茎叶	蔬菜	炒或生吃	W M	0.04	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; Cao et al, 2020; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
黄毛楤木	*Aralia chinensis* L.	Araliaceae	Han: ci bao cai	乔木	嫩茎叶, 花序	蔬菜	花苞、嫩叶炒、煮食	W	0.02	(何棠, 2009; 陶川, 2018)
刺五加	*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.) Maxim.	Araliaceae	H: zhu duo; KM: du jiang ke lian	灌木	嫩茎叶；根	药用（骨折、肝炎、祛风除湿、强筋壮骨等）	嫩茎叶做汤；茎叶包敷；根煮水喝	W C M	0.07	(阿海, 1999; 杨敏杰等, 2005; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; 郭凤根等, 2018; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
白簕	*Eleutherococcus trifoliatus* (L.) S.Y. Hu	Araliaceae	D: bian mu, ha bing; H: zhuduo, wu jiao fu, jie dou; L: lep meu nang nam	灌木	嫩茎叶	蔬菜、药用（产后护理、关节炎）	嫩茎叶做汤或沾剁生	W M	0.12	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Cao et al, 2020; Zhou et al, 2023)
南美天胡荽	*Hydrocotyle verticillata* Thunb.	Araliaceae	M: myin khwa gyi	草本	叶	药用（急性肝炎、眼痛、糖尿病、清热解毒、哮喘、腹痛等）	煮汤或凉拌	W M	0.04	(Yang & Yu, 2018; Kyaw et al, 2020; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022)
大参	*Macropanax dispermus* (Blume) Kuntze	Araliaceae	C: bu yi an; Y: a sa ding	乔木	嫩茎叶	蔬菜、药用（发烧、咳嗽等）	煮、炒、煮水喝	W C M	0.02	(Ong et al, 2018; Cao et al, 2020)
波缘大参	*Macropanax undulatus* (Wall. ex G.Don) Seem.	Araliaceae	H:bya da; Y:be bu mya	乔木	嫩茎叶、根	蔬菜、药用（骨折）	煮后凉拌；根煮水喝；叶包敷	W C M	0.03	(Xu et al, 2004; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
姜状三七	*Panax zingiberensis* C.Y. Wu & K.M. Feng	Araliaceae	H: san qi; Y: dang sa	草本	根	蔬菜、药用（跌打损伤、虚痨咳嗽、贫血等）	煮鸡汤、泡酒、药膳	W M	0.02	(Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
多核鹅掌柴	*Heptapleurum brevipedicellatum*	Araliaceae	H: wo mia	乔木	根、茎、叶	药用（流产、头痛）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	(Harms) Lowry & G. M. Plunkett									
中华鹅掌柴	*Heptapleurum chinense* (Dunn) Y. F. Deng	Araliaceae	H: lo ben	乔木	叶	药用（风湿）	捣碎加热后包敷	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
密脉鹅掌柴	*Heptapleurum ellipticum* (Blume) Seem.	Araliaceae	L: yep mu nang	乔木	树皮、叶	药用（风湿、牙痛等）	煮水喝	W	0.05	(Kraisintu, 2003; Defilipps & Krupnick, 2018; Dubost et al, 2019; Elliotta et al, 2020; Phengmala et al, 2024)
鹅掌柴	*Heptapleurum heptaphyllum* (L.) Y. F. Deng	Araliaceae	Han: e zhang chai	乔木	嫩茎叶	蔬菜	炒或生吃	W M	0.03	(Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004)
白背鹅掌柴	*Heptapleurum hypoleucum* Kurz	Araliaceae	C: ma dum ga	乔木	叶	药用（产后护理、月经不调）	产后热浴；煮水喝	W	0.01	(Ong et al, 2018)
刺通草	*Trevesia palmata* (Roxb.) Vis.	Araliaceae	D: pa dang bie; H: bia da; Y: dong gong lu	乔木	嫩茎叶	蔬菜	炒或生吃	W M	0.05	(Xu et al, 2004; Nyotin, 2008; Dubost et al, 2019; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2023)
杜衡	*Asarum forbesii* Maxim.	Aristolochiaceae	Han: du heng	草本	根	药用（散寒解表、祛风除湿、活络止痛等）	煮汤	W M	0.01	(蔡秀江等, 2018)
美形金钮扣	*Acmella calva* (DC.) R.K.Jansen	Asteraceae	L: Park kart; Y:gei bu ya; D:park pie	草本	花、嫩茎叶	蔬菜、药用（溃疡、龋齿）	煮汤、煮水喝	W M	0.02	(Kraisintu, 2003; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										查)
桂圆菊	*Acmella oleracea* (L.) R.K.Jansen	Asteraceae	L:phuk kad	草本	叶、花	药用（口腔疼痛）	作为调味剂	W C M	0.03	(Kyin & Lwin, 2015; Khamphilavong et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
金纽扣	*Acmella paniculata* (Wall. ex DC.) R.K.Jansen	Asteraceae	H: mo na; L: phak khak hua vaen; Y: lai bya, nya men ma	草本	全草	蔬菜、药用（骨折、跌打损伤等）	生吃、捣烂包敷	W M	0.09	(阿海, 1999; Dubost, 2010; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Moyon & Chara, 2021; Uczaj et al, 2021; Haokip & Panmei, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
藿香蓟	*Ageratum conyzoides* L.	Asteraceae	H: mo pu; KM: yu ei; L: nya khi ou; M: kado po, kadu hpo; Y: ma sai yi;	草本	全草	药用（咳嗽、皮肤病等）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.19	(Soejarto et al, 2002; Kraisintu, 2003; Lundh, 2007; de Boer & Lamxay, 2009; Dubost, 2010; Lamxay et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2020; Mya et al, 2021; Chassagne, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
牛蒡	*Arctium lappa* L.	Asteraceae	Han: niu ban zi gen	草本	根	蔬菜、药用（疏风散热、透疹利咽等）	煮汤、药膳	C M	0.03	(何棠, 2009; 蔡秀江等, 2018; Cao et al, 2020)
黄花蒿	*Artemisia annua* L.	Asteraceae	L: nat horm bai noy; M:Nian gmu hin	草本	全草	药用（发烧、疼痛、疟疾、健胃、止盗汗等）	煮水喝	W	0.05	(Kraisintu, 2003; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Hein et al, 2022)
艾	*Artemisia argyi* Lévl. et Van.	Asteraceae	D: ya neng; H: a ha jie duo	草本	根、茎、叶	药用（通气止痛、止血等）；驱蚊	煮水喝或生吃；捣碎涂抹或燃烧、铺放	W	0.07	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 李秦晋等, 2007; Ghorbani et al, 2011; 范汝艳等, 2019)
青蒿	*Artemisia caruifolia* Buch.-Ham. ex Roxb.	Asteraceae	H: yar ka jei daw; L: yite kwar; M: nay kyar yaing	草本	全草	药用（伤口止血、消炎）、驱蚊	捣碎包敷；燃烧或涂抹、铺放	W	0.03	(范汝艳等, 2019; Hein et al, 2022; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
狭叶青蒿（龙蒿）	*Artemisia dracunculus* L.	Asteraceae	M:dona ban	草本	根	药用（镇痛药、催眠药等）；调味	根研末代辣椒作调味品	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
五月艾	*Artemisia indica* Willd.	Asteraceae	C: mu gai	草本	叶	药用（刀伤、皮肤癣、水肿等）	煮水喝、或捣碎包敷	W	0.03	(Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; 据缅甸钦邦 Natma

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Taung 国家公园调查)
白苞蒿	*Artemisia lactiflora* Wall. ex DC.	Asteraceae	L:ya di tom kai	草本	全草	蔬菜；药用（肝、肾疾病；血丝虫病）	嫩茎叶炒食或凉拌	W C M	0.02	(Ministry of Public Health IOTM, 2019; Phengmala, 2023)
野艾蒿	*Artemisia lavandulifolia* DC.	Asteraceae	D: ya min	草本	根、叶	药用（清火解毒、杀虫止痒、利尿排石、理气止痛等）	煮水喝、洗澡	W	0.01	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)
多花蒿	*Artemisia myriantha* Wall. ex Bess.	Asteraceae	H:a ha duo duo; KM:ken la shui	草本	茎、叶	药用（跌打损伤、羊癫疯）	捣碎包敷、煮水热浴	W	0.01	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
蒌蒿	*Artemisia selengensis* Turcz. ex Besser	Asteraceae	Han: lou hao	草本	嫩茎叶	蔬菜	煮汤	W	0.01	(何棠, 2009)
北艾	*Artemisia vulgaris* L.	Asteraceae	L: nat khew, nat naeng	草本	根、茎、叶、花	药用（发烧、中毒、寄生虫感染）	煮水喝	W	0.04	(Kraisintu, 2003; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Aryal et al, 2020)
百能葳	*Bidens acmella* (L.) Lam.	Asteraceae	Han: bai neng wei	草本	根	药用（解毒利湿、止咳定喘、消肿止痛等）	煮水喝、药膳	C M	0.01	(蔡秀江等, 2018)
鬼针草	*Bidens pilosa* L.	Asteraceae	C: kuk shu; D: ya jing bu, ya dong long; H: za qie mo; L: nia kon jarm; Y: ma zhan,	草本	嫩茎叶、根	蔬菜、药用（呼吸道感染、咽喉肿痛等）	炒、煮；煮水喝；凉拌	W	0.15	(阿海, 1999; Kraisintu, 2003; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			ma zai							2018; Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
艾纳香	*Blumea balsamifera* (L.) DC.	Asteraceae	D: na long; H: wo sha la ma yo he jie; M: phon ma thein; L: Nat luang, Nard; Y: lan bu; KM: du de wu en	灌木	根、茎、叶	蔬菜、药用（婴儿疾病、胃痛、除风解毒止痒，通气止痛、痛经、跌打损伤、感冒、皮肤瘙痒等）	煮水喝、洗澡	W C	0.26	(阿海, 1999; Ministry of Health DOTM, 2000; Soejarto et al, 2002; Kraisintu, 2003; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Lundh, 2007; de Boer & Lamxay, 2009; Ghorbani et al, 2011; Lamxay et al, 2011; de Boer et al, 2012; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Hein et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
见霜黄	*Blumea lacera* (Burm. f.) DC.	Asteraceae	L: kheua ay pheng kham	草本	茎叶	药用（肠胃疾病）	煮水喝	W	0.02	(Kongmany et al, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018)
红花	*Carthamus tinctorius* L.	Asteraceae	L: dok kham hong, dok kham foy; M: su pan	草本	叶、花	药用（促进视力、消化、活血消炎、关节肌肉疼等；中和蛇毒）	煮水喝；花序泡酒	C M	0.06	(Fujikawa et al, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; 陶川, 2018; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
飞机草	*Chromolaena odorata* (L.) R. M. King & H. Rob.	Asteraceae	C: vang ca nuh; D: nya fang long; H:ni hong bu du a bo; KM: meng wai; L: nga frang, ya kiew; M: bezat, bizat, jamani chon; Y:man ma	半灌木	根、茎、叶	药用（高血压、消化不良、月经不调等）、驱蚊	煮水喝；捣碎包敷或涂抹	W	0.24	(Soejarto et al, 2002; Kraisintu, 2003; Lundh, 2007; de Boer & Lamxay, 2009; Dubost, 2010; Lamxay et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; Dubost et al, 2019; 范汝艳等, 2019; Elliotta et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Win, 2020; Mya et

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										al, 2021; Chassagne, 2022; Hein et al, 2022; Ling et al, 2022; Phengmala et al, 2024; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
野菊	*Chrysanthemum indicum* Thunb.	Asteraceae	L: phack tang o dok leuang	草本	花	药用（感冒、头痛、高血脂等）	煮水喝	W	0.01	(Ministry of Public Health IOTM, 2013)
菊花	*Chrysanthemum morifolium* Ramat.	Asteraceae	L:aka sewe; K: nan pan; M: gan ta mar	草本	花	蔬菜、饮料	花炖鸡蛋或泡水喝	C M	0.06	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 张卫明和肖正春, 2007; 陶川, 2018; Zhang et al, 2023)
大蓟	*Cirsium spicatum* (Maxim.) Matsum.	Asteraceae	Han: ji ci gen	草本	根	蔬菜	煮鸡汤	W C M	0.01	(何棠, 2009)
两色金鸡菊	*Coreopsis tinctoria* Nutt.	Asteraceae	KM: han ban jian	草本	叶	药用（皮肤病）	捣碎包敷	W	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查.)
野茼蒿	*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore	Asteraceae	C: nga ga ta an; D: ya xie huo; ya ge la; H: ming guo cao; L: a pya mu; Y: ong	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（健脾消肿、清热解毒等）	鲜炒或开水烫后凉拌; 煮水喝	W M	0.17	(Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 何棠, 2009; 蔡秀江等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; 陶

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			ma gun							川, 2018; Aryal, et al, 2020; Cao et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Uczaj et al, 2021; Hein et al, 2022; Zhang et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
鱼眼草	*Dichrocephala integrifolia* (L.f.) Kuntze	Asteraceae	L: kham foi; Y:dong gong ma	草本	嫩茎叶、根	蔬菜、药用（水肿、皮肤瘙痒等）	煮汤; 煮水喝或洗澡	W	0.06	(Xu YK et al, 2004; 何棠, 2009; Dubost, 2010; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
羊耳菊	*Duhaldea cappa* (Buch.-Ham. ex DC.) Anderb.	Asteraceae	D: la hu ma; H: ha zeng ke duo	半灌木	全草或根	蔬菜、药用（风寒感冒、跌打损伤等）	炒吃; 煮水喝	W M	0.04	(阿海, 1999; Xu et al, 2004; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Zhou et al, 2023)
显脉旋覆花	*Duhaldea nervosa* (Wall. ex DC.) Anderb.	Asteraceae	Han: xiao hei yao	草本	根	药用（祛风除湿、活络止痛、健胃消食等）	药膳	W C M	0.01	(蔡秀江等, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
地胆草	*Elephantopus scaber* L.	Asteraceae	D: ya sang xi shuan ha; H: bo ga ga sa; KM: da ong wa; L: khi fay nok khum; M: khu min; ka tu pin, ma tu pin, sin che; Y: ma bie min	草本	全草	蔬菜、药用（疏风清热、利水消肿、肝病、咳嗽等）	煮猪肺、药膳；煮水喝或捣碎喝汁	W M	0.19	(Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Elkington et al, 2014; Kyin & Lwin, 2015; 蔡秀江等, 2018; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Cao et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Kinghorn et al, 2021; Mya et al, 2021; Hein et al, 2022; Phengmala et al, 2024; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
破坏草	*Eupatorium coelestinum* Michx.	Asteraceae	C: saw sha lit; D: nya fan noy; H: shu ji ya bo; Y: fyu hua	草本	叶	驱蚊；药用（水肿、伤口止血、骨折、跌打损伤、皮肤瘙痒等）	燃烧驱蚊；捣碎包敷或煮水喝、洗澡	W	0.07	(Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ong et al, 2018; 范汝艳等, 2019; Phengmala et al, 2024; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
牛膝菊	*Galinsoga parviflora*	Asteraceae	H: tong chui cao	草本	茎叶	药用（镇痛）	煮水喝	W	0.02	(Xu YK et al, 2004; Ghorbani et al, 2011)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Cav.									
茼蒿	*Glebionis coronaria* (L.) Cass. ex Spach	Asteraceae	Han: tong hao	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（清热解毒）	煮汤或凉拌	C M	0.03	(Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Zhang et al, 2021)
多茎鼠麴草	*Gnaphalium polycaulon* Pers.	Asteraceae	L: phark kaep; Y: gei bu	草本	嫩茎叶、花	蔬菜、药用（感冒咳嗽、支气管炎等）	煮后凉拌；煮水喝	W	0.02	(Kraisintu, 2003; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
平卧菊三七	*Gynura procumbens* (Lour.) Merr.	Asteraceae	M: pyamee swae; L:nroj rog	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（糖尿病、高血压、发热、糖尿病、尿路感染、癌症痢疾、肝病等）	煮汤或凉拌；煮水喝	C M	0.06	(Kyin & Lwin, 2015; Yang & Yu, 2018; Dubost et al, 2019; Kyaw et al, 2020; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022)
千瓣葵	*Helianthus decapetalus* L.	Asteraceae	C: kyei bai kha, Nei kya yaing	草本	叶	药用（水肿、手足癣）	煮水洗澡	W	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; Ong et al, 2018)
泥胡菜	*Hemisteptia lyrata* (Bunge) Bunge	Asteraceae	D: wuo guo guo ha	草本	叶	蔬菜	炒吃	W M	0.02	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004)
土木香	*Inula helenium* Hook.f. & Thomson	Asteraceae	H: ha zhen ke dao	草本	根	药用（肾炎）	煮水喝	W	0.01	(阿海, 1999)
六棱菊	*Laggera alata* (D. Don) Sch.-Bip.	Asteraceae	Han: liu leng ju	草本	嫩茎叶	蔬菜、饮料；药用（痢疾）	水煮作茶	W	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 潘玉梅等, 2006; 何棠, 2009)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
翼齿六棱菊	*Laggera crispata* (Vahl) Hepper & J.R.I.Wood	Asteraceae	D: na niu; H: wo sha la ma	草本	全草	药膳；药用（咽喉炎、支气管炎、感冒、哮喘等）；驱蚊	煮肉汤；煮水喝、燃烧或捣碎包敷、驱蚊	W M	0.06	(阿海, 1999; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; 范汝艳等, 2019)
小舌菊	*Microglossa pyrifolia* (Lam.) O. Kuntze	Asteraceae	L: nya khio khuea, nya fa lang khuea	草本	茎、叶	药用（皮肤瘙痒、腿脚酸痛等）	煮水热浴	W	0.04	(Dubost, 2010; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Dubost et al, 2019; Jianwitchayakul et al, 2019)
阔苞菊	*Pluchea indica* (L.) Less.	Asteraceae	L: doork forn; M: kha lu	草本	叶、根	药用（感冒、发热、便秘、骨质疏松、腰痛、扭伤、肿胀和腰痛、风湿等）	煮水喝、热浴或酒泡后擦拭	W	0.03	(Ministry of Public Health IOTM, 2013; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Kyaw et al, 2020)
拟鼠麴草	*Pseudognaphalium affine* (D.Don) Anderb.	Asteraceae	D: park kyaobu, ya nuo fie; H: wo wa na ne, di mei; mi di zha la	草本	嫩茎叶, 花	蔬菜、染料；药用（感冒咳嗽、高血压、毒蛇咬伤等）	花序烙饼；与米粉煎饼；煮水喝或包敷	W M	0.13	(阿海, 1999; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu et al, 2004; 张卫明和肖正春, 2007; 何棠, 2009; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2018; 陶川, 2018; Uczaj et al, 2021; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
密花千里光	*Senecio densiflorus*	Asteraceae	Han: mi hua qian li guang	草本	叶	药用（润肤化脓、皮肤疥疮）	捣碎包敷	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Wall.									
千里光	*Senecio scandens* Buch.-Ham. ex D.Don	Asteraceae	H: she na a wei	草本	全草	药用（风湿骨痛、跌打损伤、皮炎、湿疹、脓包疮、牙痛等）	煮水喝或生吃	W	0.02	(阿海, 1999; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
蟛蜞菊	*Sphagneticola calendulacea* (L.) Pruski	Asteraceae	L: kardum kham; M: nay kyar galay	草本	根、花	药用（肾结石、缺血性心脏病）	煮水喝	W	0.03	(Kraisintu, 2003; Ministry of Health DOTM, 2007; Dubost et al, 2019)
万寿菊	*Tagetes erecta* L.	Asteraceae	KM: na ban jiang; M: dewali pan, kala pan	草本	叶	药用（镇痛、防腐、杀菌等）	捣碎包敷	C	0.04	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
除虫菊	*Tanacetum cinerariifolium* (Trevir.) Sch. Bip.	Asteraceae	M:hsay gan da mar	草本	叶、花	药用（增加食欲、保护心脏、利尿等）、驱蚊杀虫	煮水喝或烧薰	W	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018)
肿柄菊	*Tithonia diversifolia* A. Gray	Asteraceae	KM: bo ban; Y: he bu hor biang	半灌木	根、茎	药用（胸闷腰疼、骨折）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.03	(Dubost et al, 2019; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
夜香牛	*Vernonia cinerea*	Asteraceae	M: kadu pyan	草本	全草	药用（滋补、平喘）	煮水喝	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
大叶斑鸠菊	*Vernonia volkameriifo*	Asteraceae	H:ba sha; D:bi ge ting	灌木	根、叶	蔬菜、药用（身体酸痛、肝炎）	煮汤; 煮水喝或包敷	W	0.01	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	lia (Wall.) DC.									象市调查)
西桦	*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D.Don	Betulaceae	C: kheng, maing baw phyu	乔木	树皮	药用（疼痛、牙痛、咳嗽、呼吸困难、水肿等）	煮水喝；嚼碎含服	W	0.03	(Ong et al, 2018; Dubost et al, 2019; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
蒜香藤	*Mansoa alliacea*（Lam.）A.H.Gentry	Bignoniaceae	L:ka thiam kue	木质木质藤本	叶、茎、根	药用（伤风、发热、咽喉肿痛、蚊虫叮咬、咳嗽等）	煮或鲜用	W C	0.01	(Ling et al, 2022)
芳香破布木	*Cordia fragrantissima* Kurz.	Boraginaceae	M:sandawa,taung kalamet	乔木	木材、树皮、果实	药用（缓解肌肉疼痛、治疗发热等；驱虫、利尿等）	木材研磨制洗剂涂抹；树皮、果实直接使用	W	0.01	(Win, 2020)
铁力木	*Mesua ferrea* L.	Calophyllaceae	K: mai ting; M: guntgaw, gau gau	乔木	花、种子	药用（失眠、心悸、头晕等；收敛止血、胃病、解毒等）	煮水喝或捣碎制成膏状涂抹	C	0.06	(Van Sam et al, 2004; Ministry of Health DOTM, 2007; Defilipps & Krupnick, 2018; Ahn et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Zhang et al, 2021)
金银花	*Lonicera bournei* Hemsl.	Caprifoliaceae	D:maiying，D: mai ying; L: kheua khao saet	木质木质藤本	花	蔬菜、药用（咳嗽、清热解毒、消炎）	泡水喝；水焯后炒食、凉拌或煮粥	W C	0.07	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001；刘怡涛和龙春林, 2002; Kongmany et al, 2018; 陶川, 2018; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
蜘蛛香	*Valeriana jatamansi* Jones	Caprifoliaceae	Han: zhi zhu xiang; M: kan pa lu	草本	根茎	药用（消食健胃、理气止痛等；抗菌、催眠等）	煎剂、药膳	W C M	0.02	(蔡秀江等, 2018; Zhang et al, 2021)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
全缘金粟兰	*Chloranthus holostegius* (Hand.-Mazz.) C.Pei & San	Chloranthaceae	Han: si kuai wa	草本	全草	药用（活血散瘀、舒筋活络、止痛）	药膳	W M	0.01	(蔡秀江等, 2018)
金粟兰	*Chloranthus spicatus* (Thunb.) Makino	Chloranthaceae	H: bo cang mie, bo so mie	草本	根、叶	药用（骨折、外伤、开胃、发热、风湿等）	煮水喝、包敷	W M	0.03	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018)
阿萨姆桐	*Kayea assamica* Prain	Clusiaceae	M:theraphi	乔木	花	药用（减轻身体酷热、头晕、皮肤干燥、发热）	煮水喝	W	0.01	(Kinghorn, 2021)
月光花	*Ipomoea alba* L.	Convolvulaceae	Han:chang e ben yue	木质藤本	花、茎、叶	全株和种子药用	炒制；水煮；干花汤	W	0.02	(Xu YK et al, 2004; Zhang et al, 2023)
闭鞘姜	*Hellenia speciosa* (J. Koenig) S. R. Dutta	Costaceae	D: en dao, mai eng; Y: mu long dong bia; L: dok uong, uong bon; H: nei gong jiu a bo, me gong; M:pha lan aung hmwe	草本	根、茎、叶	蔬菜、药用（肝硬化、肾炎等；清火解毒、消肿止痛等）	炒、煮；捣碎泡水喝、汁水滴耳或包敷疼痛处	W M	0.23	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Kongmany et al, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Yang & Yu, 2018; Dubost et al, 2019; Htun et al, 2019; Jianwitchayakul et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al, 2020; Cao et al, 2020; Elliotta et al, 2020;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Thantsin et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
侧柏	*Platycladus orientalis* (L.) Franco	Cupressaceae	L: hing e, shon harng sing	乔木	叶	药用（登革热、发烧）	煮水喝	W	0.01	(Ministry of Public Health IOTM, 2013)
香附子	*Cyperus rotundus* L.	Cyperaceae	L: nha heo moo, ya hco mou	草本	块茎	药用（健胃消食、补肝、延年益寿）	煮水喝	W	0.07	(Ministry of Public Health IOTM, 2013; Paroda et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Khamphilavong et al, 2021; Chassagne, 2022)
树形杜鹃	*Rhododendron arboreum* Sm.	Ericaceae	C: saak bai	乔木	花	酿酒；药用（高血压、胃痛、肺病等	泡酒喝；与姜、蜂蜜同服	W	0.04	(Kyin & Lwin, 2015; Ong et al, 2018; Win, 2020; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
大白杜鹃	*Rhododendron decorum* Franch.	Ericaceae	Han: du juan hua	乔木	花	蔬菜	花开水漂洗后炒食或煮汤	W	0.03	(何棠, 2009; 陶川, 2018; Zhang et al, 2023)
云上杜鹃	*Rhododendron pachypodum* Balf. f. et W.	Ericaceae	Han: du juan hua	灌木	花	蔬菜	蕊开水煮沸 6 分钟后漂洗，炒食或煮汤	W	0.01	(陶川, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	W. Smith									
杜鹃	*Rhododendron simsii* Planch.	Ericaceae	Han: du juan	灌木	花	蔬菜	炒吃	W M	0.01	(Xu et al, 2004)
金合欢	*Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn.	Fabaceae	M: kin mun gyin; L: kan thin narm	乔木	叶和花	药用（消化不良）	叶或花的汤剂口服，每天600 毫升	W	0.07	(Ministry of Health DOTM, 2000; Xu YK et al, 2004; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kongmany et al, 2018; Ahn et al, 2020; Kinghorn et al, 2021)
白花宫粉羊蹄甲	*Bauhinia variegata* var. *candida* (Roxb.) Voigt	Fabaceae	D:mai xiu bu; H:du pie de pu; L: dok ban; KM: du ge bang; M: mahahlega phyu, palan, swe daw; Y: yang bian fang	乔木	嫩茎叶、花	蔬菜、药用（腹泻痢疾；消炎、通便等）	花去蕊炒食、煮蚕豆或凉拌；晒干备用	W M	0.22	(肖文祥等, 1993; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 潘玉梅等, 2006; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; 陈光等, 2010; Defilipps & Krupnick, 2018; Kongmany et al, 2018; 陶川, 2018; Yang & Yu, 2018; Dubost et al, 2019; Htun et al, 2019; Ahn et al, 2020; Cao et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Haokip & Panmei, 2022; Zhang et al, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Natma Taung 国家公园调查)
大果紫檀	*Pterocarpus macrocarpus* Kurz	Fabaceae	L:mai dou	乔木	木材	建筑、细木工、家具等（具浓郁果香味）	制作工业品	C	0.01	(Phengmala et al, 2023)
大花田菁	*Sesbania grandiflora* (L.) Pers	Fabaceae	L:dok kea khao	乔木	花、树根，树皮	药用（树根祛痰；树皮缓泻；花朵汁治头痛等）	用作香料或调味香料	C	0.01	(Phengmala et al, 2023)
红花羊蹄甲	*Bauhinia purpurea* L.	Fabeaceae	M: maha hlega ni, maha hlega byu, swe daw, swedaw ni	乔木	花	药用（通便）	煮水喝	W	0.03	(Defilipps & Krupnick, 2018; Moyon & Chara, 2021; Khamphilavong et al, 2023)
八角	*Illicium verum* Hook. f.	Illiaceae	H:ba guo; M: na ngut pwint	乔木	果实、叶	调味香料	果叶磨细或捣碎，作肉食品腌制调香配料	C M	0.06	(程必强, 1991; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; Fujikawa et al, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; 陈光等, 2010)
藿香	*Agastache rugosa* (Fisch. et Mey.) O. Kuntze	Lamiaceae	D:sha meng la	草本	全草	药用（消化不良、中暑）	煮水喝	C M	0.04	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
金疮小草	*Ajuga decumbens* Thunb.	Lamiaceae	H: bai mao xiao ku cao	草本	全草	药用（清热解毒、止咳祛痰、利筋养血等）	药膳	W M	0.01	(蔡秀江等, 2018)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
大籽筋骨草	*Ajuga macrosperma* Wall. ex Benth.	Lamiaceae	H: nai zhi ma, wu hui	草本	根、叶	药用（牙龈发炎、牙痛、消炎止血）	生嚼或捣碎加热后含服	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
小冠薰	*Basilicum polystachyon* (L.) Moench	Lamiaceae	M: kala pi sein, pin sein net	草本	根、茎叶、种子	药用（咳嗽、祛痰、健胃消食等）	煮水喝	W	0.02	(Defilipps & Krupnick, 2018; Ong et al, 2018)
臭牡丹	*Clerodendrum bungei* Steud.	Lamiaceae	D:guobing;	灌木	花，嫩叶	蔬菜、驱蚊	花用叶包烧作佐料；嫩叶食用；叶燃烧或捣碎涂皮肤驱蚊	W C	0.07	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 陶川, 2018; 范汝艳等, 2019; Jianwitchayakul et al, 2019; Zhang et al, 2023; Zhou et al, 2023)
臭茉莉	*Clerodendrum chinense* var. *simplex* (Moldenke) S.L. Chen	Lamiaceae	D: bin hao; Y: gong mie gian; KM:la bing; M: pha khar ywet; L: oo shal khar	灌木	花、叶、根	蔬菜、驱蚊、药用（清火解毒、消肿止痛、行气消胀等）	煮、凉拌；叶驱蚊；药用包敷或煮水喝	W C	0.06	(Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 何棠, 2009; 范汝艳等, 2019; Cao et al, 2020; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
腺茉莉	*Clerodendrum colebrookianum* Walp.	Lamiaceae	H:ha ho di zhi a bo;Y:yong mei	灌木	茎叶	药用（胃痛、腹泻）	煮水喝	W	0.03	(Dubost et al, 2019; Moyon & Chara, 2021; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
赪桐	*Clerodendrum japonicum* (Thunb.) Sweet	Lamiaceae	D: bei bing, bing liang； H: de ga pa me	灌木	花和嫩叶	蔬菜、驱蚊	花煮后凉拌、蒸蛋；叶燃烧或捣碎涂皮肤驱蚊	C M	0.08	(禹平华等, 1985; Xu YK et al, 2004; 李秦晋等, 2007; 范汝艳等, 2019; Cao et al, 2020; Elliott, 2020; Zhang et al, 2023; 据缅甸钦邦 Natma Taung

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										国家公园调查)
三对节	*Clerodendrum serratum* (L.) Moon	Lamiaceae	Han: san dui jie	灌木	花	蔬菜	花用叶包烧作佐料	W	0.05	(Paroda et al, 2013; 陶川, 2018; Ahn et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023)
芳香鞘蕊花	*Coleus aromaticus* Benth.	Lamiaceae	C:zeeyar	草本	叶	药用（儿童发烧、咳嗽、感冒、哮喘和关节炎等）	口服新鲜叶子榨出的汁	W	0.01	(Win, 2020)
四方蒿	*Elsholtzia blanda* Benth.	Lamiaceae	D: za ya you ma, nyao ma; H: nong xi ba ha, nie men xi; nei luo bo Y: dan mie	半灌木	全草	饮料、药用（健胃消食、通气止痛、清热利水等）	水煮作茶; 煮水喝或泡酒涂擦	W C M	0.19	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 潘玉梅等, 2006; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Naito et al, 2017; 陶川, 2018; Htun et al, 2019; Cao et al, 2020; Kawase et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Haokip & Panmei, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
东紫苏	*Elsholtzia bodinieri*	Lamiaceae	L:mi xi ka ke we	草本	花序叶	饮料、药用（清热解毒、凉药）	水煮作茶	W	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Vaniot									和龙春林, 2002; Zhang et al, 2023)
香薷	*Elsholtzia ciliata* (Thunb.) Hyland.	Lamiaceae	L: niao mar	草本	花序叶	饮料、药用（清热解毒、发烧头痛等）	水煮作茶	W	0.06	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Kraisintu, 2003; Zhang et al, 2023; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
吉龙草	*Elsholtzia communis*(Coll. et Hemsl.) Diels	Lamiaceae	D: ying ken, yin xin; H: le pei chang	草本	茎叶、花序	蔬菜、调味香料；药用（清火解毒、消食化积）	茎叶切细或干花磨粉调味；煮水喝	W C	0.11	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; Haokip & Panmei, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
野香草	*Elsholtzia cyprianii* (Pavol.) C.Y.Wu & S.Chow	Lamiaceae	Han: ye xiang cao	草本	全草	饮料、药用（消炎）	水煮作茶	W	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 潘玉梅等, 2006)
野苏子	*Elsholtzia flava* (Benth.) Benth.	Lamiaceae	D: ye su zi	灌木	茎叶	蔬菜	嫩茎叶煮汤	W	0.02	(程必强和喻学俭, 1995; 李秦晋等, 2007)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
水香薷	*Elsholtzia kachinensis* Prain	Lamiaceae	D: pa leng; H: lao qiao, lv jie; M: pu si nan; Y: mu duo, ma de dan; L:mort si nail	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（肾炎）	茎叶生食沾剁生；煮水喝	W C M	0.14	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; 杨敏杰等, 2005; 方利英等, 2006; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
野拔子	*Elsholtzia rugulosa* Hemsley	Lamiaceae	D: pu la huo; H: ni ke ni ne; L: khi on pa; Y: bu da za	灌木	茎叶、花序	饮料、药用（感冒头痛、消化不良）	水煮作茶	W M	0.06	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 潘玉梅等, 2006; Kongmany et al, 2018; 陶川, 2018; Cao et al, 2020)
白香薷	*Elsholtzia winitiana* Craib	Lamiaceae	H: lai pi lai cong	半灌木	叶，花	药用（感冒、头痛）	泡酒后喝	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
云南石梓	*Gmelina arborea* Roxb.	Lamiaceae	D: guo suo, mai suo; H: se jie, a yi huo si; L: dok xoh, dok feng	乔木	花、树皮、茎心	染料、药用（除风止痒、清火解毒、通便等）	花给傣族年糕染色；树皮茎心煮水喝	W C M	0.20	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; Van Sam et al, 2004; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 李秦晋等, 2007; 何棠，2009; Kyin & Lwin, 2015; 郭凤根等,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2018; Kongmany et al, 2018; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Ling et al, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
山香	*Hyptis suaveolens* (L.) Poit.	Lamiaceae	L: sap haeng	草本	全草	药用（感冒、杀虫）	煮水喝	W	0.02	(Kraisintu, 2003; Thantsin et al, 2020)
荆芥叶狮耳花	*Leonotis nepetifolia* (L.) R.Br.	Lamiaceae	D: jin gai; M: ah mae ta so	草本	嫩茎叶	蔬菜、药用（消化不良、风绞痛等）	调味蔬菜; 煮水喝	W	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 李秦晋等, 2007; Ministry of Health DOTM, 2007)
益母草	*Leonurus japonicus* Houttuyn	Lamiaceae	D: ya min long; H: a ha jie dao nei; Y: yi mu cao	草本	嫩茎叶、花序	蔬菜、药用（清火解毒、杀虫止痒、利水消肿、调经活血、皮肤瘙痒等）	煮鸡蛋、药膳; 煮水喝或洗澡	W M	0.07	(阿海, 1999; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; 陶川, 2018; Cao et al, 2020)
头序白绒草	*Leucas cephalotes* (Roth) Spreng.	Lamiaceae	M: pint ku htaik peik, pan thone sint	草本	全草	药用（发烧、眼病、贫血、支气管炎、哮喘、消化不良、黄疸、止痒等）	煮水喝	W	0.03	(Ministry of Health DOTM, 2007; Defilipps & Krupnick, 2018; Kyaw et al, 2020)
绣球荆芥	*Loenitis nepatuefolia* N.Br.	Lamiaceae	D: jin gai	草本	嫩茎叶	蔬菜	调味蔬菜	W	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 李秦晋等, 2007)
野薄荷	*Mentha arvensis* L.	Lamiaceae	M: payoke aye, pusi	草本	全草	药用（哮喘、肝炎、肾炎等）	煮水喝	W	0.03	(Defilipps & Krupnick, 2018; Tin & Wai, 2020;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			nan, bu di nan; L:li Tou Pa							Phengmala et al, 2024)
薄荷	*Mentha canadensis* L.	Lamiaceae	D:huan lin, huang neng; H:an ji ba duo; Y:bo huo;	草本	茎叶	蔬菜	茎叶作牛羊肉调味；沾剁生食用	W C M	0.15	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 方利英等, 2006; 李秦晋等, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; 郭凤根等, 2018; Cao et al, 2020)
皱叶留兰香	*Mentha crispata* Schrader ex Willd.	Lamiaceae	D: huo leng; H: luo ci bo kuo; KM: hang duan; M: pu dinar; Y: ma du lu	草本	嫩茎叶	芳香蔬菜、药用（感冒、头痛等）	煮汤、凉拌或生吃	C M	0.06	(Yang & Yu, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2021; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
留兰香	*Mentha spicata* L.	Lamiaceae	C:pu si nan	草本	全草	药用，调味香料	将叶子碾碎并与水混合	C	0.03	(Moyon & Chara, 2021; Ling et al, 2022; Zhang et al, 2022)
冠唇花	*Microtoena insuavis* (Hance) Prain ex Briq.	Lamiaceae	D: ya gan beng	草本	根、叶	药用（理气止痛、健胃消食等）	煮水喝	W	0.01	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
荆芥	*Nepeta cataria* L.	Lamiaceae	D: jingai; KM: la ge lian	草本	嫩茎叶	调味蔬菜	做鱼肉等包烧煮汤	C M	0.05	(程必强等, 2001; Xu YK et al, 2004; 郭凤根等, 2018; Zhang et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
灰罗勒	*Ocimum americanum* L.	Lamiaceae	L: phak kan kam; M: pin sein, pin sein hmway;	草本	全草	药用（控制气痰、消化不良、利尿、去水肿、皮肤病等）	煮水喝或热浴	W C M	0.07	(Dubost, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Elliotta et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Mya et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
罗勒	*Ocimum basilicum* L.	Lamiaceae	D: pa you xing; H: sha leng; K: seain lon; L: bua la phar; M: pin sain; Y: jin gai	草本	嫩茎叶、花序	调味香料、药用（胃胀气、水肿、消化不良等）	嫩茎叶作牛羊肉酸笋包烧调味	C M	0.26	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Kraisintu, 2003; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 杨敏杰等, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Yang & Yu, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; Win, 2020; Kawase et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
疏柔毛罗勒	*Ocimum basilicum* var. *pilosum* (Willd.) Benth.	Lamiaceae	D:guanguo; H: ei se sa la	草本	嫩茎叶、花序	调味香料	嫩茎叶作牛羊肉酸笋包烧调味	C M	0.07	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Zhang et al, 2023)
丁香罗勒	*Ocimum gratissimum* L.	Lamiaceae	L: sau lom deng	灌木	全草	药用（龋齿、感冒）	煮水喝	W C	0.04	(Kraisintu, 2003; Xu YK et al, 2004; Kyin & Lwin, 2015; Ahn et al, 2020)
毛叶丁香罗勒	*Ocimum gratissimum* var. *suave* (Willd.) Hook. f.	Lamiaceae	Han: mao ye ding xiang luo le	灌木	叶	蔬菜	调味香料	W M	0.01	(Xu et al, 2004)
圣罗勒	*Ocimum tenuiflorum* L.	Lamiaceae	L: sa pan lem kao; M: pin sein net, kala pin sein	半灌木	全草	药用（疟疾、支气管炎、哮喘等）	凉拌、炒食、做汤; 煮水喝	W	0.07	(Kraisintu, 2003; Ministry of Health DOTM, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al, 2020; Uczaj et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
牛至	*Origanum vulgare* L.	Lamiaceae	Han: dian xiang ru	半灌木	花序	蔬菜调味香料、药用（预防流感）	花序可作菜肴配料或作调味香料; 煮水喝	W	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 张卫明和肖正春, 2007)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
紫苏	*Perilla frutescens* (L.) Britt.	Lamiaceae	D:a liang	草本	茎、叶、种子	蔬菜、调味香料、药用（除风解毒、止咳化痰、消肿止痛，等）	花嫩叶作配料；种子做粑粑；煮水喝或捣碎包敷	C M	0.14	(禹平华等, 1985; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Nyotin, 2008; Kyin & Lwin, 2015; Naito et al, 2017; 陶川, 2018; Khamphilavong et al, 2021; Kawase et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
野生紫苏	*Perilla frutescens* var. *purpurascens* (Hayata) H. W. Li	Lamiaceae	K: sha nan; M: taung paw hnan	草本	种子	蔬菜、调味香料	捣碎后做香料	C	0.02	(据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
到手香	*Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng.	Lamiaceae	M: ziyar ywet htu	草本	茎、叶	药用（咳嗽、发烧、哮喘、关节炎、耳鸣、耳痛等）	煮水喝	C	0.04	(Ministry of Health DOTM, 2000; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al, 2020; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
广藿香	*Pogostemon cablin* (Blanco) Benth	Lamiaceae	M: tha nat pyit see	半灌木	叶	药用（肾炎、利尿、胃痛等）	煮水喝	W	0.02	(Defilipps & Krupnick, 2018; Phengmala et al, 2023)
刺蕊草	*Pogostemon glaber*	Lamiaceae	H: a pia se ma; L:Sutzi	草本	全株	药用（骨折、疟疾、肠炎等）	煮水喝	W	0.03	((程必强和喻学俭, 1995; Lundh, 2007; Ghorbani et

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Benth.									al, 2011)
夏枯草	*Prunella vulgaris* L.	Lamiaceae	Han: xia ku cao	草本	嫩茎叶、花序	蔬菜、药用（清肝泻火、明目、散结消肿等）	花序和叶炒食、煲瘦肉汤或泡凉茶	W M	0.03	(何棠, 2009; 蔡秀江等, 2018; 陶川, 2018)
牡荆	*Vitex negundo* var. *cannabifolia* (Sieb. et Zucc.) Hand.-Mazz.	Lamiaceae	D: mai jie xie	乔木	全草	药用（清火解毒、止咳化痰、杀虫止痒等）	煮水喝	W	0.03	(Van Sam et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
蔓荆	*Vitex trifolia* L.	Lamiaceae	D: guan di; H: dian ma bian xiang; L: tin nok; M: kyaung pan, Kyaung ban lay	灌木	果实、叶、根	药用（消化不良、腹泻、镇心安神、清火消毒、消肿止痛、中风偏瘫、风湿关节痛、皮肤感染等；中和毒物）	煮水喝、捣碎包敷或取汁擦拭	W	0.11	(阿海, 1999; Ministry of Health DOTM, 2000; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Dubost, 2010; Defilipps & Krupnick, 2018; Jianwitchayakul et al, 2019; Ahn et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Kinghorn et al, 2021; Mya et al, 2021)
钝叶桂	*Cinnamomum bejolghota* (Buch.-Ham.) Sweet	Lauraceae	C: nak zik; H: ma cang, ho tao; K: maza; L: khae moo; M: Na lin gyaw, Lu lin gyaw	乔木	树皮、叶、根	调味香料、药用（肌肉僵硬疼痛、皮疹和皮肤病和关节炎等；毒虫咬伤）	鲜食；干皮调味；捣碎加热包敷或煮水喝	W C	0.12	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; Ministry of Health DOTM, 2000; 程必强等, 2001; Kraisintu, 2003; Van Sam et al, 2004; Ghorbani et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kyaw et al, 2020;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
樟	*Camphora officinarum* Nees	Lauraceae	H: ku mi se; L: li tu mon; M: payuk, payoke pin.	乔木	根、木材、树皮、叶、果实	果实调味；药用（感冒头痛、风湿痛、肠胃炎、皮肤瘙痒等）	捣碎磨粉蘸料；煮水喝或洗澡；提取挥发油或捣碎涂抹	W M	0.11	(阿海, 1999; Kraisintu, 2003; Van Sam et al, 2004; Fujikawa et al, 2007; 何棠, 2009; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Sydara et al, 2014; Defilipps & Krupnick, 2018; Elliott, 2020; Ling et al, 2022)
肉桂	*Cinnamomum cassia* Nees ex Blume	Lauraceae	D: ji ku wei; H:gui pi; L: khae horm	乔木	木材、枝叶、树皮	调味香料、药用（滋补心脏、健胃消食等）	干皮切小块调味肉食品或肉汤	W C M	0.13	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; Kraisintu, 2003; Van Sam et al, 2004; You - kai et al, 2004; 张卫明和肖正春, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Sydara et al, 2014; Moyon & Chara, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
云南樟	*Camphora glandulifera* (Wall.) Nees	Lauraceae	Y: shang yang	乔木	树皮、果	调味香料、药用（消化不良、感冒）	捣碎调味；添加进蜡烛加香；煮水喝	W	0.02	(根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
大叶桂	*Cinnamomum iners* Reinw. ex Blume	Lauraceae	H: ma qiao; L: khae phet	乔木	叶、树皮、根	药用（感冒、咳嗽、发烧、关节疼痛等）	煮水喝；粉碎加热包敷或止血	W M	0.07	(Kraisintu, 2003; Delang, 2007; Dubost, 2010; Ghorbani et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015; Dubost et al, 2019; Elliott et al, 2020)
毛叶樟	*Camphora mollifolia* (H. W. Li) Y. Yang, Bing Liu & Zhi Yang	Lauraceae	D: mai zhong	乔木	叶	蔬菜	调味香料	W M	0.03	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; Thantsin et al, 2020)
黄樟	*Camphora parthenoxylon* (Jack) Nees	Lauraceae	D: mai zhuang huang, mai dang hu; H: shi xiao si; Y: ge long jiang; L:mai tha lo	乔木	果实、根、茎、叶	果实调味；叶药用（清火解毒、消肿止痛、除风利湿、通气消胀等）；驱蚊	果实捣碎调味；叶煮水喝、捣碎包敷或涂皮肤驱蚊	W M	0.06	(Van Sam et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Sydara et al, 2014; 范汝艳等, 2019; Cao et al, 2020; Hein et al, 2022)
香桂	*Cinnamomum subavenium* Miq.	Lauraceae	D: guo bai san; H: cuo pi cuo guo luo; Y: ge long jiang	乔木	茎皮	调味香料	做调味香料牛羊肉等的调味加香	W	0.03	(Van Sam et al, 2004; Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
柴桂	Cinnamomum tamala (Buch.-Ham.) Nees & Eberm.	Lauraceae	H: ho tou pi; M: thit ja boe	乔木	叶、树皮	调味香料、药用（消化不良、口腔溃疡、流感、痢疾、咳嗽等）	煮汤或煮水喝	W M	0.11	(Fujikawa et al, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ong et al, 2018; Shin et al, 2018; Jianwitchayakul et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2019; Moyon & Chara, 2021; Haokip & Panmei, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
细毛樟	*Camphora tenuipilis* (Kosterm.) Y. Yang, Bing Liu & Zhi Yang	Lauraceae	Han: xi mao zhang	乔木	叶	调味香料	鲜叶切碎或捣碎做肉食肉类的调味加香	W	0.03	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭 1995; 程必强等 2001)
锡兰肉桂	*Cinnamomum verum* J.Presl	Lauraceae	M: hmanthin, thit kyabo	乔木	树皮	调味香料、药用（慢性腹泻、利尿、痔疮、淋病等）	捣碎制成膏状涂抹	C	0.07	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Elliott, 2020; Elliott et al, 2020; Win, 2020; Haokip & Panmei, 2022)
月桂	*Laurus nobilis* L.	Lauraceae	M: lae lu	乔木	叶	调味香料	煮汤等时放增香	W	0.01	(Shin et al, 2018)
乌药	*Lindera aggregata* (Sims) Kosterm.	Lauraceae	H: pi ba	灌木	根	药用（心胃气痛、痛经、外伤出血等）	煮水喝、包敷	W	0.01	(阿海, 1999)
香叶树	*Lindera communis* Hemsl.	Lauraceae	D: guo mao	乔木	叶	调味香料	做肉类调味佐料	W M	0.02	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
山鸡椒	*Litsea cubeba*（Lam.）Pers.	Lauraceae	D: sha hai qi; H: xi bi; L: Sea khai ton; Y: ge zhang bi yu	乔木	根、茎皮、叶、果	调味香料、药用（健胃消食、祛风散寒、疮殇肿毒、皮肤痒、产后滋补等；）、驱蚊	幼嫩果实调味；煮水喝或包敷；燃烧、铺放驱蚊	W C M	0.34	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Kraisintu, 2003; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Paroda et al, 2013; 蔡秀江等, 2018; Ong et al, 2018; Dubost et al, 2019; 范汝艳等, 2019; Cao et al, 2020; Elliott, 2020; Elliotta et al, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Haokip & Panmei, 2022; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
清香木姜子	*Litsea euosma* W.W.Smith	Lauraceae	D:mu jiang zi	乔木	果实	调味香料	幼嫩果实做调味香料牛羊肉等的调味加香	W	0.04	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
潺槁木姜子	*Litsea glutinosa* (Lour.) C. B. Rob.	Lauraceae	D: mai mi long; M:Amyauk san bin	乔木	叶、树皮	药用（肠胃疾病、杀虫止痒、祛风除湿、凉血止血、清火解毒、风湿关节痛等）	煮水喝	W C	0.07	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Paroda et al, 2013; Ahn et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Ling et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
长蕊木姜子	*Litsea longistaminata* (Liou) Kosterm.	Lauraceae	L: kok bong lae	乔木	全株	药用（疥疮）	捣碎包敷	W	0.01	(Libman et al, 2006)
滇南木姜子	*Litsea martabanica* (Kurz) J. D. Hooker	Lauraceae	D: sha la bi han; H: shi bi	乔木	根、叶	药用（杀虫止痒、消肿止痛、跌打损伤、风湿关节痛等）	煮水喝、包敷、或泡酒后擦洗	W	0.02	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Ghorbani et al, 2011)
毛叶木姜子	*Litsea mollis* Hemsl.	Lauraceae	Han: mu jiang zi	乔木	果实	调味香料	幼嫩果实做调味香料牛羊肉等的调味加香	W	0.04	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
假柿木姜子	*Litsea monopetala* (Roxb.) Pers.	Lauraceae	L: yang bong; Y: nong gai yang	乔木	茎、叶	药用（消化不良、止血消炎）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.04	(Sydara et al, 2014; Hein et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
香花木姜子	*Litsea panamanja*	Lauraceae	H: mi za mi nu a bo	乔木	叶	药用（皮肤烫伤、感染）	捣碎包敷	W C	0.02	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	(Buch.-Ham. ex Nees) Hook. f.									象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
玉兰叶木姜子	*Litsea semecarpifolia* (Wallich ex Nees) J. D. Hooker	Lauraceae	H: bao can she	乔木	树皮	药用（疟疾）	煮水喝	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
伞花木姜子	*Litsea umbellata (Lour.)* Merr.	Lauraceae	Han: san hua mu jiang zi	乔木	嫩枝叶	调味香料	嫩枝叶做包烧的调味香料	W	0.01	(根据中国西双版纳州和普洱市调查)
滇新樟	*Neocinnamomum caudatum* (Nees) Merr.	Lauraceae	C: khwe htwee pin	乔木	叶	药用（消炎、感冒、妇女产后恢复）	煮水洗澡	W	0.01	(据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
披针叶楠	*Phoebe lanceolata* (Wall. ex Nees) Nees	Lauraceae	H: be qiang; KM: de lang gan; L: pha yven	乔木	根、叶	药用（头晕、胸闷腰疼、跌打损伤、增加食欲等）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.06	(程必强和喻学俭, 1995; Soejarto et al, 2002; 潘玉梅等, 2006; Lamxay et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015; Chassagne, 2022)
紫檀	*Pterocarpus indicus* Willd	Leguminosae	M: pan padauk, Pa tauk; L:Dok Euang, Gen deng	乔木	木材	药用（抗肿瘤、抗菌、抗过敏）	制作工艺品	C	0.07	(Elliott et al, 2020; Elliott, 2020; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2024)
夜香木兰	*Lirianthe coco*	Magnoliaceae	Han:Ye he hua	小乔木	树皮、花	药用（头痛、肝病、风湿性瘫痪）	茶的代用品	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
荷花木兰	*Magnolia grandiflora* L.	Magnoliaceae	K:Ta Daing Mwe	灌木	根、果实、树皮	药用（脓肿、发汗、瘙痒、疼痛）	叶子、幼枝以及花提取精油	W C	0.01	(Mya et al, 2021)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
长喙厚朴	*Magnolia rostrata*	Magnoliaceae	Y:pa zei	乔木	树皮、花	药用（脾胃疾病、食欲不振）	水煮；茶的代用品	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
白兰	*Michelia alba* DC. Syst.	Magnoliaceae	D:zhang hao	乔木	花、根、叶	药用（温肺止咳、行气解郁）	茶用香花；炒制	W C M	0.01	(Zhang et al, 2023)
黄兰含笑	*Michelia champaca* Linn.	Magnoliaceae	M: saka wah; K: laran	乔木	全株	药用（花、叶、果等可作护心脏、控胆汁、减轻呕吐、出血等）	煮水喝	W C	0.04	(Ministry of Health DOTM, 2007; Defilipps & Krupnick, 2018; Thantsin et al, 2020; Zhang et al, 2023)
香子含笑	*Michelia hypolampra* Dandy	Magnoliaceae	D: ma han; H: mar la; Y: ye ba guo	乔木	种子	调味香料、药用（健胃消食、行气消胀、半身不遂）	种子火烤捣碎调味；种子入药煮水喝或包敷	W C M	0.06	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
玉兰	*Yulania denudata* (Desr.) D. L. Fu	Magnoliaceae	Han: bai yu lan	乔木	花	蔬菜	花瓣煮粥、煎炸、煮汤，或加蜂蜜浸泡、熏茶叶	W	0.02	(陶川, 2018; Zhang et al, 2023)
黄葵	*Abelmoschus moschatus* Medicus	Malvaceae	L:portaseua	草本	种子、根	药用（利尿剂、便秘）	种子含挥发油（具特殊香气）	W	0.02	(Zhang et al, 2021; Kawase et al, 2021)
芙蓉花	*Hibiscus mutabilis*	Malvacese	D:nuo san ran	灌木	花	药用（清热解毒）	水煮；做粥	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
玫瑰茄	*Hibiscus sabdariffa* L.	Malvacese	D:nui pa song; M:chin paung;	半灌木	嫩叶、果实	茶用香花、食品染色、饮料、润肤剂	代茶；果实和叶作沙拉 / 汤调味香料；	C	0.07	(Thantsin et al, 2020; Kawase et al, 2021; Uczaj et al, 2021; Ling et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			H:som phor di				嫩叶炸食			2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023)
米仔兰	*Aglaia odorata* Lour.	Meliace	D:ge mai yon yo	小乔木	花、枝叶	药用（促气循环、解抑郁、解酒清肺）	泡茶；枝叶入药	C	0.02	(Van Sam et al, 2004; Zhang et al, 2023)
香椿	*Toona sinensis* (A. Juss.) Roem.	Meliace	D: mai yong heng; H: ye bu; Y: xiang chun	乔木	嫩茎叶	蔬菜、调味香料	叶嫩芽果作肉类剁生调味腌制配料；炒鸡蛋	C M	0.13	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; 杨敏杰等, 2005; 李秦晋等, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; 何棠, 2009; 郭凤根等, 2018; Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
肉豆蔻	*Myristica fragrans* Houtt.	Myristicaceae	D: ma jian; M: zar date hpo, zar pwint	乔木	种子	药用（便秘、消化不良、补土健胃、通气止痛等；）	捣碎泡水喝	C M	0.04	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Defilipps & Krupnick, 2018; Jianwitchayakul et al, 2019; Kyaw et al, 2020)
蓝桉树	*Eucalyptus globulus* Labill.	Myrtaceae	M: hnget chauk	乔木	叶、根、果实	药用（哮喘、便秘、祛痰、鼻炎、皮肤感染溃疡杀菌剂等）	煮水喝或捣碎包敷	C	0.02	(Lundh, 2007; Defilipps & Krupnick, 2018)
白千层	*Melaleuca cajuputi* Powell	Myrtaceae	M:cajeput, Han: bai qian cheng	乔木	叶	药用（痛风、补益心脏、兴奋剂）	叶提取挥发油	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
香桃木	*Myrtus communis* L.	Myrtaceae	L:som po	灌木	叶	药用（身体极热、高烧、恶心、抗菌、	煮沸后饮用	W C	0.01	(Elliott, 2020)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
						化痰、杀寄生虫等）				
丁子香	*Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L.M.Perry	Myrtaceae	D: luo jian; M: lay hnyin	灌木	花蕾，花序	药用（消化不良、降气止痛、驱虫、抗炎、退热、健胃等）	煮水喝	C M	0.02	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Defilipps & Krupnick, 2018)
莲	*Nelumbo nucifera* Gaertn.	Nelumbonaceae	Han: lian hua	草本	花	蔬菜	内包肉馅软炸、炒食、做汤；花瓣焯水去苦味	C	0.01	(陶川, 2018)
延药睡莲	*Nymphaea nouchali* Burm. f.	Nymphaeaceae	Han: Lan lian hua	草本	花、根状茎	食品（根茎提淀粉）；茶用	炒制；茶的代用品	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
素馨花	*Jasminum grandiflorum* L.	Oleaceae	M:myat lay; L:Kheuah Khao Kep	木质木质藤本	花、叶、根	药用（外感发热、胃气不和、腹胀腹泻）	煮水喝；泡茶	C M	0.02	(Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2024)
茉莉花	*Jasminum sambac* Soland. ex Ait.	Oleaceae	Han: mo li hua	灌木	花	蔬菜、茶用	做茉莉花茶；煮粥、炒食或上汤	C M	0.08	(禹平华等, 1985; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 陶川, 2018; Ahn et al, 2020; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; Phengmala et al, 2024)
夜花	*Nyctanthes arbor-tristis* L.	Oleaceae	M: seik pha lu	灌木	花	药用（失眠、嗜睡）	口服 3-6 克干花粉（配糖水煮）	W	0.01	(Ministry of Health DOTM, 2000)
桂花	*Osmanthus fragrans* Lour.	Oleaceae	Han: gui hua	乔木	花	蔬菜、调味	做桂花茶、桂花糖、桂花糕	C	0.02	(陶川, 2018; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
鼓槌石斛	*Dendrobium chrysotoxum* Lindl.	Orchidaceae	D:nuo ma hai	草本	茎、花	药用（滋阴、生津止渴、润肺、疏肝解郁、缓解痉挛疲	与鸡蛋同炒；水煮；炖汤；代茶	C	0.02	(Zhang et al, 2023; Phengmala et al, 2024)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
						劳等）				
香露兜	*Pandanus amaryllifolius* Roxb.	Pandanaceae	Y: bai dui	草本	叶	调味香料；药用（发烧、皮肤病）	煮水用于煮米饭增香	C M	0.08	(Ministry of Health DOTM, 2000; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Ahn et al, 2020; Elliott, 2020; Mya et al, 2021; Uczaj et al, 2021; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
小露兜	*Pandanus fibrosus* Gagnep.	Pandanaceae	H:teoy	草本	叶、果实	药用（小肠疝气）；调味	烹饪调味品（甜点、蒸米饭）	W M	0.01	(Phengmala et al, 2023)
卡西亚松	*Pinus kesiya* Royle ex Gordon	Pinaceae	D: mai bian; L: kok peak, pack horm	乔木	树脂、叶	药用（跌打损伤、腹泻、呕吐、胃痛、牙痛、咳嗽、风湿关节痛等）	煮水喝	W	0.06	(Kraisintu, 2003; Van Sam et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Kongmany et al, 2018; Ong et al, 2018; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
云南松	*Pinus yunnanensis* Franch.	Pinaceae	H: miq xu	乔木	叶	驱蚊	燃烧、捣碎涂抹	W	0.02	(范汝艳等, 2019; Zhang et al, 2023)
荜拔	*Piper longum* L.	Piperaceae	D: li bi; H: ku duo; M: peik chin	草本	叶、果实	蔬菜；药用（祛风除湿、活血止痛等；消化不良、头痛、肌肉僵硬、刺痛和麻木、麻痹、疟疾）	嫩叶沾剁生、混煮调味；煮水喝	W C M	0.17	(肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; Ministry of Health DOTM, 2000; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Fujikawa

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										et al, 2007; 李秦晋等, 2007; Ghorbani et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Jianwitchayakul et al, 2019; Ahn et al, 2020; Kyaw et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
草胡椒	*Peperomia pellucida* (L.) Kunth	Piperaceae	M: kyauk thin pone; L:tshuaj pob tsuas	草本	全草	蔬菜；药用（肝内胆管结石、头痛等；高血压）	煮水喝	W	0.05	(Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Kyaw et al, 2020; Mya et al, 2021; Hein et al, 2022)
豆瓣绿	*Peperomia tetraphylla* (G. Forst.) Hook. & Arn.	Piperaceae	H: bu tu ra; L: ka dom sua	草本	叶	药用（咳嗽、骨折、出血）	煮水喝; 捣碎包敷	W	0.02	(Ghorbani et al, 2011; Kongmany et al, 2018)
卵叶胡椒	*Piper attenuatum* Buch.-Ham.	Piperaceae	M: sa yo	木质藤本	茎	药用（感冒、消化不良）	煮水喝	C M	0.01	(Fujikawa et al, 2007)
蒌叶	*Piper betle* L.	Piperaceae	D: pak hui, wai; H: pa qie a ba; K: bu, buru; M: peik chin thi, kun; L: Bai Phoo	草本	干果；叶	调味香料; 药用(消化不良、化痰、发烧、腹泻、健齿）	干果磨细调味，叶口嚼，叶汁加蜂蜜饮用	W C M	0.20	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Delang, 2007; Ghorbani et al, 2011; Paroda et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										& Krupnick, 2018; Ahn et al, 2020; Elliott et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Yadana et al, 2021; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
苎叶蒟	*Piper boehmeriifolium* (Miq.) C. DC.	Piperaceae	H: pa que; K: shart phal, khan; L lao deng; M: nga yoat kaung, het shae	半灌木	嫩枝叶、根	蔬菜；调味香料；药用（祛风散寒、散瘀消肿、止血镇痛；胃痛、腹泻）	嫩枝叶做汤调味，根煮水或药膳	W C M	0.06	(Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; Zhou et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
荜澄茄	*Piper cubeba* L. f.	Piperaceae	M: sayo pin	木质藤本	全草	药用（健胃消食、杀菌、化痰、去胀气）	煮水喝	W	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018)
黄花胡椒	*Piper flaviflorum* C. DC.	Piperaceae	D: gan gu ling, ke pian, sar kam; H: pa qie qie pi, a ke lu qu; Y: lao mei, jia	木质藤本	茎、嫩茎叶	调味香料; 药用(温通气血、止痒、痛经、藓、胃痛、消化不良）	调料煮汤、煮水喝或包敷	W C M	0.09	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Ghorbani et al, 2011; Cao

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			lao, lao ou							et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
疏果胡椒	*Piper interruptum* Opiz.	Piperaceae	L:sa khan	木质藤本	茎	调味香料	给菜肴调味	W	0.01	(Uczaj et al, 2021)
粗梗胡椒	*Piper macropodum* C. DC.	Piperaceae	H: be dei lo yer	木质藤本	叶，果实	药用（胃痛）	新鲜嚼食	W	0.02	(Ghorbani et al, 2011; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
麻根	*Piper magen* B. Q. *Cheng* ex C. L. Long & Jun Yang	Piperaceae	D: ma gen; L: sa khan; Y:sar kan	木质藤本	根茎	调味香料	火烤后调味肉、凉菜	W C M	0.06	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; Xu et al, 2004; Yamada et al, 2004; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
胡椒	*Piper nigrum* L.	Piperaceae	D: ma pi nuan; L: Phik thai; M: nga yoke kaung	木质藤本	果实、茎、叶	调味香料; 药用(促消化、散寒止痛; 肠胃病、月经不调、牙痛、咳嗽、减肥)	果实晒干磨粉调味; 煮水喝	W C M	0.22	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; Ministry of Health DOTM, 2000; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Delang, 2007; Fujikawa et al, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018; Ahn et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2020; Mya et al, 2021; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
假蒟	*Piper sarmentosum* Roxb.	Piperaceae	D:pa kie, pa xie; H: ju lo; KM: bu ling; L: phak pa; Y: lao luo; pak Ieleud	半灌木	茎、叶	蔬菜；药用（清火解毒、止血、杀虫止痒、除风止痛、牙痛、疥疮、风湿痛）	嫩叶沾剁生或煮杂菜汤，药用煮水喝	W C M	0.22	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Yamada et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Dubost, 2010; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; 郭凤根等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; Elliott, 2020; Uczaj et al, 2021; Chassagne, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
缘毛胡椒	*Piper semiimmersu*	Piperaceae	Han: yuan mao hu jiao	木质藤本	根、叶	药用（骨折）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	m C. DC.									
小叶崖爬香	*Piper sintenense* Hatus.	Piperaceae	D:toy pha;Y:lao bian	木质藤本	叶	调味香料	肉类调味	W	0.02	(根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
蒟子	*Piper yunnanense* Y. C. Tseng	Piperaceae	H: qie ha; da ma ge da	半灌木	嫩枝叶、果实、根	蔬菜; 调味香料; 药用（跌打损伤、祛风散寒、消炎、瘙痒）	嫩枝叶做汤调味, 煮水喝或药膳	W M	0.04	(Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
勐腊毛麝香	*Adenosma buchneroides* Bonati	Plantaginaceae	H: lo za ga wa do; Han: tiao zao cao; L:kirburohi	草本	地上部分	驱蚊	铺放、悬挂	C	0.03	(Gou et al, 2018; 范汝艳等, 2019; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
球花毛麝香	*Adenosma indiana* (Lour.) Merr.	Plantaginaceae	L: chi nai korm	草本	地上部分	药用（感冒、产后催乳、黄疸）	煮水喝或热浴	W	0.02	(程必强等, 2001; Ministry of Public Health IOTM, 2013)
紫苏草	*Limnophila aromatica* (Lam.) Merr	Plantaginaceae	L:khen nang	草本	茎	药用（气郁、食滞、脘腹疼痛、胎气不和）	煮水喝	W	0.02	(Van et al, 2021; Phengmala et al, 2024)
紫花丹	*Plumbago indica* L.	Plumbaginaceae	M: kant choke ni, kangyok	草本	根、茎、叶、花和果实	药用（消化不良、眼病、疥疮、白皮病）	捣碎煮水喝或药膳	W	0.03	(蔡秀江等, 2018; Defilipps & Krupnick, 2018; Kyaw et al, 2020)
白花丹	*Plumbago zeylanica* L.	Plumbaginaceae	M: kant gyoke phyu	半灌木	茎	药用（促消化、腹泻、胃病、疱疹样皮肤病）	捣碎煮水喝; 药膳	W C	0.01	(Zhang et al, 2021)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
香根草	*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty	Poaceae	L:crack scented	草本	根	药用（肌肉疼痛）	煮水喝	W	0.01	(Elliotta, 2020)
柠檬草	*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf	Poaceae	D: sha hai qi; H: pao pi; ge lao dang, po pi la du; K: hkum bang pan; KM: se ke le; M: sabalin, ma hagar kyan sit; Y: ge lao zha	草本	全草	调味香料；药用（腹痛、腹泻、风湿痛、驱蚊、跌打损伤、脓肿、头疼等）	叶捆煮肉汤或包烤生鱼，煮水或包敷，烧熏驱蚊	C M	0.37	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 李秦晋等, 2007; Ministry of Health DOTM, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; 何棠, 2009; 陈光等, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018; 范汝艳等, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; Elliott, 2020; Elliotta et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Tin & Wai, 2020; Ahn et al, 2020; Mya et al, 2021; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022; Hein et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
辣薄荷草	*Cymbopogon jwarancusa* (Jones) Schult.	Poaceae	M: iwarancusa grass, millet, oilgrass	草本	叶、根	药用（风湿、疟疾）	煮水喝、精油涂抹	W C M	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
亚香茅	*Cymbopogon nardus* (Linn.) Rendle	Poaceae	D: xi hai; L: see khai, hua Sce khai khg; M: sabalin hmwe, myet hmwe;	草本	茎叶	调味香料; 药用（麻风病、癫痫、驱虫、关节痛、咳嗽、高血压、头痛）	叶捆煮肉汤或包烤生鱼，煮水喝	C M	0.11	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Delang, 2007; Lundh, 2007; Defilipps & Krupnick, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Elliott, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
枫茅	*Cymbopogon winterianus* Jowitt ex Bor	Poaceae	D:sha hai chun	草本	茎叶	调味香料	叶捆煮肉汤或包烤生鱼	W C M	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 张卫明和肖正春, 2007; Phengmala et al, 2023)
香辣蓼	*Persicaria odorata* (Lour.) Soj ák	Polygonaceae	L:phuk pheo	草本	叶	药用（肿胀、粉刺、消化不良、胃痛）	叶烹调食物	W	0.02	(Khamphilavong, 2021; Phengmala et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
水蓼	*Polygonum hydropiper* L.	Polygonaceae	D:phet phe	草本	嫩茎和叶	药用（祛风利湿、散瘀止痛、解毒消肿）	嫩叶凉拌、做汤或调味	W	0.02	(Xu YK et al, 2004; Nyotin, 2008)
香蓼	*Polygonum viscosum* Buch.-Ham. ex D. Don	Polygonaceae	D: fei man, han fai; H: e nuo si pi; Y: ma liu, nong liu; K: sha pie; M: phat phal	草本	嫩茎叶	调味香料；药用（健胃消食、清火解毒、消化不良、脘腹胀痛、小儿高热惊厥）	鲜茎叶调味肉、包烧鱼，水煮做茶	C M	0.19	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; 陈光等, 2010; 郭凤根等, 2018; Cao et al, 2020; Uczaj et al, 2021; Zhang et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
川梨	*Pyrus pashia* Buch.-Ham. ex D. Don	Rosaceae	D: guo kei gai; H: zha shuo si li; Y: tang liu guo	乔木	花	蔬菜	花漂洗去涩后炒、煮或凉拌，炒肉最佳	W M	0.07	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2023)
木香花	*Rosa banksiae*	Rosaceae	Han: bai ci hua	灌木	花、根、叶	药用（缓解疼痛、止血）	茶用香花	C	0.01	(Zhang et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
月季	*Rosa chinensis* Jacq.	Rosaceae	D: nuo lang, nuo bi long; L: sweat kar say; K: nan pan; M: hnin si	灌木	花	蔬菜、茶饮	花瓣煮粥、泡茶、煮汤、油炸	C M	0.06	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 陶川, 2018; Zhang et al, 2023; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
法国蔷薇	*Rosa gallica* L.	Rosaceae	Han: mei gui hua	灌木	花	观赏；装饰菜肴	装饰菜肴；沙拉	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
玫瑰	*Rosa rugosa* Thunb.	Rosaceae	D: luo min shang	灌木	花	蔬菜；药用（肝胃气痛、风痹、吐血咯血、月经不调、痢疾）	鲜花加红糖浸拌做糕点调味，花作菜肴	C M	0.08	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 张卫明和肖正春, 2007; 陶川, 2018; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
红玫瑰	*Rosa rugosa var. rosea* Rehder	Rosaceae	D: luo min shang	灌木	花	药用（理气解郁、止血、止痛）	茶用香花；制作蛋糕	C	0.01	(Zhang et al, 2023)
冠状栀子	Gardenia coronaria Banks	Rubiaceae	M: kin khat kyi	乔木	花	药用（咯血、腹泻）	口服花汤 50 - 100 毫升	C	0.02	(Ministry of Health DOTM, 2000; Defilipps & Krupnick, 2018)
栀子花	*Gardenia jasminoides* Ellis	Rubiaceae	Han: zhi zi hua; M: zi za wa;	灌木	花	蔬菜、茶饮	花蕾烘干泡茶，花瓣凉拌、炒鸡蛋或煮蛋汤，腌制成蜜饯	W C M	0.06	(何棠, 2009; Kyin & Lwin, 2015; 陶川, 2018; Elliott, 2020; Zhang et al, 2023; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
鸡矢藤	*Paederia foetida* L.	Rubiaceae	KM:du beng shao	木质藤本	根、茎叶	药用（胃病、胸闷腰疼）	煮水喝	W M	0.03	(Haokip & Panmei, 2022; Hein et al, 2022; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
山油柑	*Acronychia pedunculata* (Linn.) Miq.	Rutaceae	H: ba ha a bo; L: pao khaep thong	乔木	根、叶	药用（感冒、发烧、头痛、哮喘、支气管炎）	煮水喝、捣碎包敷、热浴	W	0.03	(Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
木橘	*Aegle marmelos* (L.) Correa	Rutaceae	L: mark toom; M:hpun ja, kia bok, mak phyn, o shit	乔木	果实、叶、根	药用（肠溃疡、头晕、补血补肾、消化不良、腹泻、发烧、支气管炎、驱虫、咳嗽）	煮水喝或泡茶、捣碎煮汤、捣碎喝汁	C M	0.14	(Delang, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Southavong et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kongmany et al, 2018; Jianwitchayakul et al, 2019; Ahn et al, 2020; Elliotta et al, 2020; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Khamphilavong et al, 2023; Phengmala et al, 2023)
臭节草	*Boenninghausenia albiflora* (Hk.) Rchb. Ex Meissn.	Rutaceae	L:cag dawb	草本	全草	药用（食欲不振、解表截疟、活血散瘀、解毒、疟疾、感冒发热、支气管炎、跌打损伤、外伤出血、痈疖疮疡）	将根制成煎剂饮用，或与肉汤一起煮食	W C	0.01	(Dubost et al, 2019)
来檬	*Citrus aurantiifolia* (Christm.) Swingle	Rutaceae	D: ma zhuan; K: shal wai; M: than ba yar thee	灌木	果实、茎、叶、树皮	调味香料；药用（消化不良、呕吐、咳嗽、哮喘、关节疼痛、牙痛、利尿、增进食欲）	叶或果皮作牛羊肉汤等的调味加香或者凉拌；煮水喝	C M	0.15	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; Lundh, 2007; 陈光等, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018; Ministry of Public Health

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										IOTM, 2019; Tin & Wai, 2020; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
酸橙	*Citrus aurantium* Linn.	Rutaceae	M: lein maw	灌木	果、叶	调味香料；水果；药用（刺激食欲、帮助消化、控制呕吐、咳嗽、咽喉痛、哮喘、腹胀）	叶或果皮作牛羊肉等的调味加香	C M	0.07	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Fujikawa et al, 2007; 陈光等, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
箭叶橙	*Citrus hystrix* DC.	Rutaceae	M:shauk nue thee	小乔木	果实	叶调味香料；果实药用（消化不良、清火解毒、消肿止痛、润肺止咳）	叶同鱼等一起油炸加香；果实泡水喝	C M	0.12	(Lundh, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Yang & Yu, 2018; Khamphilavong et al, 2021; Thantsin et al, 2020; Yadana et al, 2021; Zhang et al, 2021; Hein et al, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
墨脱橙	*Citrus latipes* (Swingle) Yu.Tanaka	Rutaceae	M:hailipop	乔木	果实	调味香料	果实用作咖喱香料或增添香气	W	0.01	(Haokip & Panmei, 2022)
柠檬	*Citrus limon* (L.) Osbeck	Rutaceae	D: ma nao; L: mak nao;	灌木	果实、叶	调味香料；药用（健胃消食、清热解毒、	叶或果皮作牛羊肉等的	C M	0.17	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			M: shout thee; Y: lao bu luo			助消化、缓解疲劳、抑制肿瘤、咳嗽、咽喉炎、癫痫、头晕、消炎）	调味加香；煮水喝			2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; 陈光等, 2010; Dubost, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kyaw et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Zhang et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
柚	*Citrus maxima* (Burm.) Osbeck	Rutaceae	D:ma bu, ma jing zhang; K: ma wan she; M: showl pan thi;	乔木	花、果皮叶	调味香料；水果；药用（清火解毒、消肿止痛、凉血止血、利尿通淋、祛风除湿、咽喉肿痛、口舌生疮、咳嗽咳血、小便热涩疼痛、尿血、风湿关节痛）	叶或果皮作牛羊肉等的调味加香；花作柚子花茶；嫩果泡水喝	C M	0.18	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Kyin & Lwin, 2015; 陶川, 2018; K et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
佛手	*Citrus medica var. sarcodactylis* (Hoola van Nooten) Swingle	Rutaceae	D:ma wei	灌木	花、嫩叶、果	调味蔬菜; 药用(清火解毒、止咳化痰、通气止痛、风寒感冒咳嗽、胸闷心悸、脘腹胀痛、头昏)	花可作菜肴配料; 嫩叶和果实煮水喝	C M	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)
香橼	*Citrus medica* L.	Rutaceae	D:ma run; H: si li mia bo, xi lun chui, M: shauk cho thee	乔木	果实、嫩叶	调味香料; 水果; 药用(气逆呕吐、咳嗽、理气止痛、消化不良)	叶或果皮作牛羊肉等的调味加香; 煮水喝	C M	0.15	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 陈光等, 2010; Paroda et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Yang & Yu, 2018; Ahn et al, 2020; Thantsin et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
小黄皮	*Clausena emarginata* Huang	Rutaceae	H: ya sar si pa	灌木	叶	驱蚊	烧、铺放	W	0.01	(范汝艳等, 2019)
假黄皮	*Clausena excavata* Burm.f.	Rutaceae	KM: du ya ge yi er; L: song fa; M: Pyin thaw sein; daw hke, pyin daw thein,	灌木	根、叶、茎	嫩叶蔬菜; 药用(胃病、头痛、皮肤粗糙、保胎、驱虫、控制麻风病)	嫩茎叶煮后凉拌; 煮水喝	W	0.06	(Defilipps & Krupnick, 2018; Shin et al, 2018; Dubost, 2010; Dubost et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			seik nan							省及万象市调查)
黄皮	*Clausena lansium* (Lour.) Skeels	Rutaceae	L:mak fai	灌木	根、叶、果实	药用（腹痛、胃痛、感冒发热）	煮水喝，泡酒，鲜品捣敷	C	0.01	(Uczaj et al, 2021)
光滑黄皮	*Clausena lenis* Drake	Rutaceae	L:sa mat, ntoo dev zi	灌木	根、叶	药用（发烧、跌打损伤、关节痛）	煮水喝或包敷	W	0.02	(Dubost, 2010; Dubost, 2019)
单叶吴萸	*Evodia simplicifolia* Ridl.	Rutaceae	H:ba ha	灌木	根、叶	药用（跌打损伤、骨折）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.01	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
小花山小橘	*Glycosmis parviflora* (Sims) Kurz	Rutaceae	L: som sun	灌木	根、叶	药用（哮喘）	煮水喝	W	0.01	(Kraisintu, 2003)
山小橘	*Glycosmis pentaphylla* (Retz.) DC.	Rutaceae	L: xom xeun, som xuen noy	灌木	果实	药用（肠胃疾病、毒蛇咬伤）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.02	(Lundh, 2007; Kongmany et al, 2018)
光叶山小橘	*Glycosmis craibii* var. *glabra* (Craib) Tanaka	Rutaceae	L: kok ngu ngo	灌木	根	药用（毒蛇咬伤、感染）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.01	(Libman et al, 2006)
象橘	*Limonia acidissima* L.	Rutaceae	D: ma bing han; K: san phak; M: thanakha, thi ha yaza	乔木	根、叶、果实	药用（癫痫、水肿、消化不良、溃疡、发烧、清火解毒、健胃消食、涩肠止泻）	捣碎成粉开水送服或煮水喝	W C M	0.07	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018; Kinghorn et al, 2021;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022)
贡甲	*Macluroden dron oligophlebiu m* (Merr.) T.G. Hartley	Rutaceae	L:pao tong	乔木	根	药用（胃炎）	煮水喝	W	0.01	(Libman et al, 2006)
三桠苦	*Melicope pteleifolia* (Champ. ex Benth.) Hartley	Rutaceae	D: lang wan; H:ba ha, ha sei gu non; L: khom lavan, kok khao may; Y:ma dang; M:ji xiang zhua	灌木	根、茎、叶、花	蔬菜；药用（清热解毒、祛风除湿、消肿止痛、止痒）	花序、嫩茎、叶泡水当凉茶; 煮水喝或擦洗	W M	0.06	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Ghorbani et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; 陶川, 2018; Dubost et al, 2019; Zhang et al, 2023)
大管	*Micromelum falcatum* (Lour.) Tanaka	Rutaceae	L: si mart	灌木	全草	药用（哮喘）	煮水喝	W	0.01	(Kraisintu, 2003)
月橘	*Micromelum hirsutum* Oliv.	Rutaceae	L: kok mak paet pa	灌木	茎	药用（胆结石）	煮水喝	W	0.01	(Libman et al, 2006)
小芸木	*Micromelum integerrimu m* (Buch.-Ham. ex DC.) Wight & Arn. ex M. Roem.	Rutaceae	D: kok kyao	灌木	根	药用（牙痛、口腔溃疡、产妇产后恢复）	煮水喝或热浴	W	0.01	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
九里香	*Murraya exotica* L.	Rutaceae	D: luo mai shuan gao la; M: ku za na	草本	花、根	蔬菜；药用（伤口脓肿、皮肤炎、荨麻疹、发烧发热）	可熏制花茶，菜肴配料，花含芳香油	C	0.09	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; Ministry of Health DOTM, 2000; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 张卫明和肖正春, 2007; Thantsin et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023)
调料九里香	*Murraya koenigii* (L.)	Rutaceae	M: pyin taw thein	灌木	叶、树皮	蔬菜；药用（寄生虫病、支气管炎、哮喘、癌症、糖尿病）	叶煮汤菜的调味香料；药用煮水喝	W C M	0.06	(Ministry of Health DOTM, 2007; Shin et al, 2018; Yang & Yu, 2018; Kyaw et al, 2020; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2022)
华南吴萸	*Tetradium austrosinense* (Hand.-Mazz.) Hartley	Rutaceae	Han: hua nan wu yu	乔木	果实	调味香料	捣碎调味	W	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
楝叶吴萸	*Tetradium glabrifolium* (Champ. ex Benth.) Hartley	Rutaceae	H: ha sai gong nong	乔木	叶	药用（腹泻、骨折）	煮水喝	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
牛糾吴萸	*Tetradium trichotomum* Lour.	Rutaceae	D:yaluhuo; H: nei za bian	乔木	果实和叶	调味香料；药用（胃痛、腹痛、腹泻、感冒、咳嗽、风湿性关节炎、荨麻疹、湿疹、皮肤疮疡）	捣碎做调味香料调味；包敷和煮水喝	W	0.04	(禹平华等, 1985; 阿海, 1999; 何棠, 2009; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
飞龙掌血	*Toddalia asiatica* (Linn.) Lam.	Rutaceae	D: hei ma liu nuo; H: wo jia la son; KW: jiang men; L: nam sa liue; M: maik kacnwe	木质木质藤本	根、茎、叶、果实	调味香料；药用（除风通血止痛、腹泻、止血、麻醉、疥疮、摔伤、骨折、便秘、咳嗽、胃痛、皮肤病）	调味加香；根茎煮水喝或者擦洗	W M	0.11	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Fujikawa et al, 2007; Dubost, 2010; Ghorbani et al, 2011; Kongmany et al, 2018; Dubost et al, 2019; Zhang et al, 2021; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
刺花椒	*Zanthoxylum acanthopodium* DC.	Rutaceae	D:ge ma ga;H: mo zi la, nai zuo; Y: za bu ga biu; C: ting huo; M:Sen ho hling	灌木	叶、果实、根	调味香料；药用（退烧、发汗、痢疾、胃痛、蚊虫蚂蟥叮咬、产后护理、跌打损伤、流感、咳嗽、牙痛）	叶或果皮做牛羊肉野味腌制等调味加香； 根煮水喝或擦洗	W C	0.17	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001；Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 杨敏杰等, 2005; 何棠, 2009; Defilipps & Krupnick, 2018; Ong et al, 2018; Htun et al, 2019; Cao et al, 2020; Haokip & Panmei, 2022; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
毛刺花椒	*Zanthoxylum acanthopodium DC.* var. *timbor* Hook.	Rutaceae	Han: mao ci hua jiao	灌木	叶，果实	调味香料	叶或果皮做牛羊肉野味腌制等调味加香	W	0.05	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 何棠, 2009; Moyon & Chara, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
竹叶花椒	*Zanthoxylum armatum* DC.	Rutaceae	D: bu ga, guo gan; H: nei zuo, ne zao; L: mark maad; M: mike cup; Y: lu ga jian	乔木	果、嫩茎叶、根	调味香料；药用（胃痛、风湿性关节炎、手足癣、发热、消化不良、感冒咳嗽、发烧胃痛、腹泻、霍乱、驱虫）	叶或果皮做牛羊肉调味、腌制等调味加香；包敷或者煮水喝	W M	0.20	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Naito et al, 2017; Shin et al, 2018; Cao et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Uczaj et al, 2021; Haokip & Panmei, 2022; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
毛竹叶花椒	*Zanthoxylum armatum* var. *ferrugineum* (Rehder & E.H. Wilson) C.C.Huang	Rutaceae	H: nai rao	乔木	叶、根	药用（感冒）	煮水喝	W	0.01	(Ghorbani et al, 2011)
花椒	*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.	Rutaceae	D: maga; H:jieha; K: a farp; M: ngout kaung; Y: bu ga	乔木	叶，果实	调味香料	叶或果皮做牛羊肉野味肉食品腌制等调味加香麻辣味原油原料	C M	0.09	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001；刘怡涛和龙春林, 2002; 张卫明和肖正春, 2007; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
毛大叶臭椒	*Zanthoxylum myriacanthum* var. *pubescens* (Huang) Huang	Rutaceae	D: ma qian; H: za la; L: mak keen; mak khaen	乔木	叶果	调味香料；药用（通气除寒、解毒、消肿止痛、毒虫咬伤、疥疮、脓肿、癫狂病）	叶果作牛羊肉等野味的调味香料，果实做肉食品腌制，为傣味的主要调味原料；煮水喝或者泡酒后擦洗	W C M	0.12	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Yamada et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Dubost, 2010; Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
两面针	*Zanthoxylum nitidum* （Roxb.） DC.	Rutaceae	D: hei nan huo; H: xia bei jia a	木质木质藤本	根、茎皮、叶、果	调味香料；药用（风湿性关节痛、跌打肿痛、牙痛、胃痛、毒蛇咬伤）	叶果作牛羊肉等的调味加香；包敷；煮水喝	W	0.05	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)
花椒簕	*Zanthoxylum scandens* Blume	Rutaceae	H: o ne e bi ne si; Y: wei	木质木质藤本	果实	调味香料	做肉类菜调味加香	W	0.02	(Cao YL et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
拟蚬壳花椒	*Zanthoxylum laetum* Drake	Rutaceae	M:bu zu wr	木质木质藤本	叶	调味香料	新鲜食用，也可煮或蒸来制作	W	0.01	(Moyon & Chara, 2021)
勒欓	*Zanthoxylum rhetsa*	Rutaceae	L:ginger, mak khaen	乔木	树皮、果实和叶	药用（哮喘、支气管炎、胸痛、消化	调味品	W C	0.03	(Uczaj et al, 2021; Khamphilavong et al,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	(Roxb.) DC.					不良、胃痛、腹泻、霍乱、心脏病、糖尿病、黄疸、牙痛、眼外伤、口腔炎、风湿、关节炎、痔疮、疖肿、溃疡、毒蛇咬伤）				2023; Phengmala et al, 2023)
檀香	*Santalum album* L.	Santalaceae	D: jian hao; M: natha phu	乔木	茎心	药用（抑菌、皮肤病、发烧、养心安神、健胃消食、理气止痛、心慌心悸、癫狂症、脘腹胀痛、腹泻）	烧或制成膏体涂抹；煮水喝	C M	0.06	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Fujikawa et al, 2007; Paroda et al, 2013; Defilipps & Krupnick, 2018; Ahn et al, 2020; Kyaw et al, 2020)
鱼腥草	*Houttuynia cordata* Thunb.	Saururaceae	D: pa hao dong, pa huai; H: pa he, ge sang la ni; K: hip; KM: du bu wa bu rong; L: are shar valat; Y: ma ding, o din, lu lin gai	草本	茎、叶	蔬菜；药用（肺炎、百日咳、泌尿系统感染、排脓消痈、利尿通淋、流行性腮腺炎）	嫩茎叶沾剁生生食，亦可炒肉或煮汤；煮水喝	W C M	0.24	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 杨敏杰等, 2005; 方利英等, 2006; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Ghorbani et al, 2011; Lamxay et al, 2011; 蔡秀江等, 2018; 郭凤根等, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Cao et al, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Aryal et al, 2020;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Zhang et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
白背枫	*Buddleja asiatica* Lour.	Scrophulariaceae	Han: bai bei feng	灌木	花序	饮料	花序泡水加红糖引当凉茶饮	W	0.01	(陶川, 2018)
密蒙花	*Buddleja officinalis* Maxim.	Scrophulariaceae	D: luo fan; H:a yi ho si, an po; Y: nong sang wan fang; L:hang xu	小乔木	花	蔬菜、染料；药用（咳嗽、火眼、目翳、伤寒、清热泻火、养肝明目）	煮水喝	W C M	0.14	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001；刘怡涛和龙春林, 2002; 潘玉梅等, 2006; 何棠, 2009; 蔡秀江等, 2018; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
中华石龙尾	*Limnophila chinensis* (Osbeck) Merr.	Scrophulariaceae	L: phak kha	草本	全草	药用（清热利尿、凉血解毒、水肿、结膜炎、风疹）	煮汤，混合蔬菜沙拉，作为芳香草本增添风味	W C	0.02	(Uczaj et al, 2021; Van et al, 2021)
大叶石龙尾	*Limnophila rugosa* (Roth) Merrill	Scrophulariaceae	D: pa ma ham,pa ji nu ong; H: shui ba guo; Y:	草本	嫩茎叶	调味香料	茎叶鲜用或干后磨粉做肉食品的调味香料，八角	C M	0.14	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001；Xu et al, 2004; 杨

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
			lan ba bo he				代用品			敏杰等, 2005; 方利英等, 2006; 李秦晋等, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; 郭凤根等, 2018; Cao et al, 2020; Van et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
中国苦木	*Picrasma javanica* Blume	Simaroubaceae	M: nan paw kyawt	乔木	树皮和木材	药用（发热、疟疾、消化不良、腹泻、痢疾、肠道寄生虫、皮肤病）	煮水喝	W	0.01	(Kinghorn et al, 2021)
辣椒	*Capsicum annuum* var. *conoides* (Mill.) Irish	Solanaceae	D: ma pi; H: la pi; Y: long ma long; M:nga yoke	草本	果实	蔬菜；药用（温中散寒、开胃消食、补火强身、腹痛呕吐、咳嗽、哮喘、贫血、消化不良、腹泻）	炒吃；煮水喝或捣碎包敷；用作沙拉、咖喱、汤和其他菜肴的辣椒调味香料	C M	0.14	(禹平华等, 1985; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Naito et al, 2017; Pritchard et al, 2017; Htun et al, 2019; Kawase et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Ling et al, 2022; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
朝天椒	*Capsicum chinense* Jacq	Solanaceae	D: ma ba qi nu; M: Nga yoke	草本	嫩茎叶，果实	调味香料	炒食；鲜品或晒干火烧后捣碎调味	W C M	0.07	(禹平华等, 1985; 李秦晋等, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Tin & Wai, 2020; 根据中国西双版

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
黄灯笼辣椒	*Cestrum nocturnum* L.	Solanaceae	M:bros fhuw	草本	果实	调味香料	鲜食; 与发酵鱼、盐捣成糊状	C	0.01	(Moyon & Chara, 2021)
夜香树	*Styrax tonkinensis* (Pierre) Craib	Solanaceae	D: ge luo huan leng	灌木	花	蔬菜	煮汤	C	0.03	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001)
越南安息香	*Taxus wallichiana* var. *chinensis* (Pilg.) Florin	Styraceae	L: nian khao	乔木	树脂	药用（咳嗽、支气管炎）	煮水喝	W	0.02	(Kraisintu, 2003; Paroda et al, 2013)
尾尖叶柃	*Eurya acuminata* Kobuski	Theaceae	M:sa mu; L:ntoo maj soob	小乔木	叶、根和茎	蔬菜、调味香料; 药用(过敏性皮炎）	制咖喱; 洗澡或涂患处	W	0.02	(Dubost et al, 2019; Aryal et al, 2020)
沉香	*Aquilaria baillonii* Pierre ex Lecomte	Thymelaeaceae	M: thit hmwe, a kyaw; Y: mai gei yang	乔木	茎心，根皮	药用（兴奋剂、壮阳、利尿、伤口愈合）	泡水; 刮皮舂碎包敷	C M	0.06	(Van Sam et al, 2004; Fujikawa et al, 2007; Paroda et al, 2013; Defilipps & Krupnick, 2018; Thantsin et al, 2020; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
柬埔寨沉香	*Aquilaria crassna Pierre* ex	Thymelaeaceae	L:bo hueang	乔木	根、木材	药用（毒性发热）	凉水研磨	W	0.01	(Elliott, 2020)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Lecomte									
厚叶沉香	*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.	Thymelaeaceae	L: mai kesana	乔木	茎心、叶	药用（胃痛）	煮水喝	W	0.03	(Yamada et al, 2004; Dubost, 2010; Dubost et al, 2019)
圆果荨麻	*Urtica parviflora* Roxb.	Urticaceae	H: man ha	灌木	心材	药用（胸腹胀痛、呕吐、跌打损伤）	煮水喝或泡酒	W	0.02	(阿海, 1999; Van Sam et al, 2004)
黄荆	*Vitex negundo* L.	Verbenaceae	Han: yuan guo xun ma	灌木	根	药用（养胃）	提精油	W	0.01	(Defilipps & Krupnick, 2018)
云南草寇	*Alpinia blepharocalyx* K. Schum.	Zingiberaceae	D: ma ga; H: mai du du ma; KM: du ke lei; Y: dong guo yi, ge bo bao	草本	花序、根茎	蔬菜、调味香料；药用（消化不良、胀气、头晕、失去意识、胸闷腰疼）	花序做佐料或炒食、凉拌、包烧；煮水喝	W C M	0.16	(肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Van Sam et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; Fujikawa et al, 2007; 李秦晋等, 2007; Nyotin, 2008; Ghorbani et al, 2011; Southavong et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
节鞭山姜	*Alpinia conchigera* Griff.	Zingiberaceae	D: he ha nuan, ka kyao; M: pade gaw; Y: dong kyang di	草本	根茎	调味香料；药用（健胃消食、解毒、止血）	切碎调味、煮水喝	W	0.06	(刘怡涛和龙春林, 2002; 陶川, 2018; Dubost et al, 2019; Ahn et al, 2020; Khamphilavong et al, 2023; Zhang et al, 2023)
无斑山姜	*Alpinia emaculata* S. Q. Tong	Zingiberaceae	Han: shan jiang	草本	花序	调味香料	炒食、凉拌	W	0.01	(据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
美山姜	*Alpinia formosana* K. Schum.	Zingiberaceae	M: gon min	草本	根茎	药用（骨痛、肠胃疾病）	煮水喝	C	0.18	(Ministry of Health DOTM, 2000; 刘怡涛和龙春林, 2002; Yamada et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Dubost, 2010; Lamxay et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Paroda et al, 2013; Defilipps & Krupnick, 2018; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
大高良姜	*Alpinia galanga* (L.) Willd.	Zingiberaceae	D: he ha; L: kha; H: mei pi; KM: gen sha ge luo, du gen sha er; M: padei kaw gyi, kunsa gamon; Y: kar, dong jiang	草本	花序、嫩茎、块根、叶	蔬菜、调味香料；药用（理气止痛、风湿痛、皮肤瘙痒、痢疾、发烧、胃胀、呕吐）	块茎调味；花序炒食、凉拌；根茎或果实煮水喝或捣碎包敷	W C M	0.12	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Soejarto et al, 2002; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; Paroda et al, 2013; Dubost et al, 2019; Chassagne, 2022; Khamphilavong et al, 2021; Phengmala et al, 2023)
草豆蔻	*Alpinia katsumadai* Hayata	Zingiberaceae	D: he ga; Han: cao dou kou	草本	果实、根茎	药用（行气消胀、温胃止呕、风湿痛）	捣碎泡水喝或者包敷	W	0.05	(程必强和喻学俭, 1995; Xu et al, 2004; 李秦晋等, 2007; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
长柄山姜	*Alpinia kwangsiensis* T. L. Wu et S. J. Chen	Zingiberaceae	D: guo ga; H:me du;Y:dong gui	草本	嫩茎花序	蔬菜；药用（毒虫咬伤、头晕）	嫩茎花序可生吃或舂烂做调味香料；煮水喝或包敷	W M	0.02	(Dubost, 2010; Kyin & Lwin, 2015)
毛瓣山姜	*Alpinia malaccensis* (Burm.f.) Roscoe	Zingiberaceae	L: man kha	草本	根茎	药用（膀胱结石）	煮水喝	W	0.08	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; 李秦晋等, 2007; Moyon & Chara, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
黑果山姜	*Alpinia nigra* (Gaertn.) B.L.Burtt	Zingiberaceae	D: muo ha; M:purii tum dur	草本	根茎、叶	蔬菜、调味香料	嫩茎烹饪; 作香料	W M	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005)
华山姜	*Alpinia oblongifolia* Hayata	Zingiberaceae	Han: hua shan jiang; L:ka ko	草本	根茎	药用（温中暖胃、散寒止痛）	煮水喝	W	0.08	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Kraisintu, 2003; 黄加元, 2005; Lundh, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Moyon & Chara, 2021)
高良姜	*Alpinia officinarum* Hance	Zingiberaceae	L: khar; M: padegaw gale, padei kaw lay	草本	花序、块茎	蔬菜、调味香料; 药用（促消化、消炎、胃痛）	花序蕾炒食、凉拌; 煮水喝	W	0.11	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; Kyin & Lwin, 2015; Khamphilavong et al, 2021; Ahn et al, 2020; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2023)
蜡瓣山姜	*Alpinia oxymitra* K.Schum	Zingiberaceae	L:xyab txhim tsuas	草本	根茎	药用（老人腰痛、虚弱、贫血）	生吃块根	W C M	0.01	(Dubost et al, 2019)
益智	*Alpinia oxyphylla* Miq.	Zingiberaceae	L: ja bi ne mi bo we	草本	花序	蔬菜、调味香料	花序炒食、凉拌	W	0.03	(Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
宽唇山姜	*Alpinia platychilus* K. Schum.	Zingiberaceae	Han: kuang chun shan jiang	草本	花序	蔬菜	水煮后沾调料	W	0.01	(Zhang et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
绿苞山姜	*Alpinia roxburghii*	Zingiberaceae	L:ja bi ne mi bo we	草本	种子	调味香料; 药用(暖胃)	煮水; 作沙拉调料	W	0.08	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; Kyin & Lwin, 2015; Thantsin et al, 2020; Khamphilavong et al, 2023; Zhang et al, 2023)
艳山姜	*Alpinia zerumbet* (Pers.) Burtt. et Smith	Zingiberaceae	Han: yan shan jiang; M:pha lan taung hmwe	草本	果	药用（健胃消食、泻药）	捣碎煮水喝	W	0.04	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)
红壳砂仁	*Amomum neoaurantiacum* T. L. Wu & al.	Zingiberaceae	D: ma niang liang; M:gon min	草本	果实和根茎	药用（健胃消食、理气止痛、清热利尿）	煮水喝	C	0.03	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; Zhang et al, 2023)
爪哇白豆蔻	*Amomum compactum* Soland ex Maton	Zingiberaceae	L: ja bi li mi bo, yi bo wei	草本	花蕾、嫩茎	调味香料	可生吃或舂烂做调味香料	W C	0.12	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; 杨敏杰等, 2005; 郭凤根等, 2018; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
荽味砂仁	*Amomum coriandriodorum* S. Q. Tong & Y.	Zingiberaceae	D: guo hao; H: cao guo; L: yong; Y:ya ma hao	草本	嫩叶、花序	调味香料	鲜叶或干叶捣碎作调味香料; 花序作佐料	C M	0.03	(Dubost, 2010; Haokip & Panmei, 2022; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	M. Xia									
长果砂仁	*Amomum dealbatum* Roxb.	Zingiberaceae	L: mak naeng	草本	根茎	药用（跌打损伤、止血、咳嗽、咽痛）	煮水喝或捣碎包敷	W	0.05	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2023)
野草果	*Amomum koenigii* J. F. Gmelin	Zingiberaceae	D: ma guo H: mi jie Y: ge bo biu	草本	果实、花序	调味香料	做调味辛香作料、蘸料	W	0.11	(禹平华等, 1985; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; 陶川, 2018; Cao et al, 2020; Zhang et al, 2023)
九翅豆蔻	*Amomum maximum* Roxb.	Zingiberaceae	D: he gu; H: ne lao, mi jie; Y: bo di	草本	花序、果实、块茎	蔬菜、调味香料；药用（健胃消食、行气消胀）	煮饭或冲碎调味；嫩茎生吃；果作水果；煮水喝	W M	0.02	(Lamxay et al, 2011; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
细砂仁	*Amomum microcarpum* C. F. Liang et D. Fang	Zingiberaceae	L: mak neng kham, Ka dong; H: me mu	草本	根、茎、叶	药用（发烧、降温）	煮水喝	W	0.04	(Soejarto, 2002; Lundh, 2007; de Boer & Lamxay, 2009; 陶川, 2018)
紫红砂仁	*Amomum purpureorubrum* S. Q. Tong et Y. M. Xia	Zingiberaceae	Han: xiao hong jiang miao	草本	花序	蔬菜	花序作佐料或生吃	W	0.03	(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Kyin & Lwin, 2015; Moyon & Chara, 2021)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
香豆蔻	*Amomum subulatum* Roxb.	Zingiberaceae	D: bo diu meng	草本	根茎	药用（消化不良、风寒感冒、哮喘、呕吐、头昏头疼、食积腹痛）	煮水喝	W	0.05	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Moyon & Chara, 2021)
白豆蔻	*Amomum testaceum* Ridl.	Zingiberaceae	Han: bai dou kou	草本	果实	药用（健胃消食、祛风除湿、止呕）	煮水喝或泡酒	C	0.01	(Libman et al, 2006)
长序砂仁	*Amomum thyrsoideum* Gagnep.	Zingiberaceae	L: naeng daeng	草本	根茎	药用（子宫癌）	煮水喝	W	0.07	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
草果	*Amomum tsaoko* Crevost & Lem.	Zingiberaceae	D:ma hao; Y:ma hao biu; H: cao guo	草本	果实、全株	调味香料；药用（痰积聚、除瘀消食、截疟疾）；提芳香油	捣碎泡开水喝	C M	0.14	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Yamada et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; 张卫明和肖正春, 2007; Ghorbani et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Cao et al, 2020; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查；据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
砂仁	*Amomum villosum* Lour.	Zingiberaceae	H: man bei xi; KM: ken guo; L: mak neen; Y:gin sha men	草本	果实	调味香料；药用（食物中毒、消化不良、胃痛、咳嗽）	煮鸡、药膳；煮水喝或洗澡	C M	0.04	(Kraisintu, 2003; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005)
缩砂密；正名绿壳砂仁	*Amomum villosum* var. *xanthioides* (Wall. ex Bak.) T. L. Wu et S. J. Chen	Zingiberaceae	D: ma niang; L: mark neng	草本	嫩茎、果实、根茎	蔬菜；药用（健胃消食、理气止痛、脘腹胀痛、腹泻）	煮吃；煮水喝	W M	0.01	(据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
云南砂仁	*Amomum yunnanense* S. Q. Tong	Zingiberaceae	H: me luo	草本	根茎	药用（外伤出血）	煮水喝	W C M	0.01	(根据中国西双版纳州和普洱市调查)
辣椒砂仁	*Amomum capsiciforme S. Q. Tong*	Zingiberaceae	Han:la jiao sha ren	草本	果实	调味香料；药用	作牛羊肉鸡等野味的调味香料	W	0.08	(Fujikawa et al, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Ong et al, 2018; Yang & Yu, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Zhang et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查；据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
心叶凹唇姜	*Boesenbergia longiflora* (Wall.) Kuntze	Zingiberaceae	L:sab ntxim	草本	根茎	药用（腹泻、胃痛、男性性功能衰弱、头痛、肌肉紧张）	切食；制酒精浸液；捣敷	W	0.01	(Dubost et al, 2019)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
凹唇姜	*Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf.	Zingiberaceae	M: seik phyuu, sate phoo; C: Seik phoo; L:qhaus	草本	根茎、叶	调味香料；药用（消化不良、咳嗽、口腔溃疡、产后出血）	作缅甸酸辣汤香料；煮水喝	C M	0.07	(Sydara et al, 2014; Dubost et al, 2019; Htun et al, 2019; Jianwitchayakul et al, 2019; Elliott et al, 2020; Kinghorn et al, 2021; Zhang et al, 2022)
姜黄一种	*Curcuma aeruginosa* Roxb.	Zingiberaceae	L: van hua deo	草本	块茎	药用（白带过多、子宫痛）	煮水喝	W	0.03	(Shin et al, 2018; Khaing et al, 2020; Elliott, 2020)
姜黄属一种（芒果姜）	*Curcuma amada* Roxb.	Zingiberaceae	M: ba thae kaw	草本	块茎	调味香料；药用（消化不良）	鲜捣作咖喱料；切片干燥磨粉；泡水喝	W	0.05	(Libman et al, 2006; Elliott, 2020; Kinghorn et al, 2021; Moyon & Chara, 2021; Haokip & Panmei, 2022)
极苦莪术	*Curcuma amarissima* Roscoe	Zingiberaceae	L:warn jai dum	草本	块茎	药用（抗炎、抗氧化、护消化、抗肿瘤）	煮水喝	C M	0.01	(Phengmala et al, 2023)
狭叶姜黄	*Curcuma angustifolia* Roxb.	Zingiberaceae	L: wan di jeb ko, wan di ai	草本	块茎	药用（咳嗽、咽喉炎）	捣碎泡水喝	W	0.14	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; Fujikawa et al, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Shin et al, 2018; Yang & Yu, 2018; Htun et al, 2019; Moyon & Chara, 2021; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023)
郁金	*Curcuma aromatica*	Zingiberaceae	M: mar lar pu, na nyin	草本	块茎、花序	调味香料；药用（活血止痛、行气解郁、	煮咖喱、煮后凉拌；晒干捣	C M	0.04	(Ahn et al, 2020; Chassagne, 2022; Zhang

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Salisb.		gar, taw na nwin			凉血清心、利胆退黄）	碎泡水喝或包敷			et al, 2022; Phengmala et al, 2023)
彩虹姜	*Curcuma aurantiaca* Zijp	Zingiberaceae	H:warn lueng	草本	根茎、花序	蔬菜，药用	幼嫩花序作为蔬菜食用	C	0.02	(Ling et al, 2022; Phengmala et al, 2023)
黑心姜	*Curcuma caesia* Roxb.	Zingiberaceae	C:sa nwin net	草本	根茎	药用（祛风除湿、消肿止痛）	浸酒或水煮服；捣烂调酒外搽	C	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018)
多叶姜黄	*Curcuma comosa* Roxb	Zingiberaceae	M: nan win ga, san win ga, san win yaing	草本	块茎	药用（降压、抗炎、消化不良、减疟热）	粉与蜂蜜混合服	W	0.05	(Xu YK et al, 2004; Dubost et al, 2019; Kinghorn et al, 2021; Phengmala et al, 2023; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
广西莪术	*Curcuma kwangsiensis* S. G. Lee et C. F. Liang	Zingiberaceae	C: cho a lei; M:mar lar phoo	草本	块茎	药用（胃病）	煮水喝	C	0.34	(程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Kraisintu, 2003; Xu et al, 2004; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; Fujikawa et al, 2007; 李秦晋等, 2007; Ministry of Health DOTM, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Paroda et al, 2013; Sydara et al, 2014; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										范汝艳等, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Kyaw et al, 2020; Win, 2020; Moyon & Chara, 2021; Mya et al, 2021; Zhang et al, 2021; Ling et al, 2022; Zhang et al, 2022; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
姜黄	*Curcuma longa* L.	Zingiberaceae	C: ai hre; D: hao ming; H: mai zhi mai xi; K: nam chying; M: nanwin, hsanwin, sa nwin, L: khi min kheun; Y:song wang	草本	块茎、花序	蔬菜、调味香料、染料；药用（清火解毒、杀虫止痒、通气止痛、风湿痛、月经失调、跌打损伤、高烧、心脏病、咳嗽和腹泻）	煮水喝、熏蒸或捣碎包敷	C M	0.25	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Kraisintu, 2003; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; Delang, 2007; Fujikawa et al, 2007; Lundh, 2007; Paroda et al, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Htun et al, 2019; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Elliott, 2020; Khamphilavong et al, 2021; Tin & Wai, 2020;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Kawase et al, 2021; Yadana et al, 2021; Hein et al, 2022; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
莪术	*Curcuma phaeocaulis* Valeton	Zingiberaceae	D: wan hai nao;H: a men niu; KM: jia guo yi; L: khmaem darm; M: tein pwar gamon, sa nwin	草本	块茎	染料；药用（宫颈癌、外阴癌、跌打肿痛、清火解毒、风湿痛、筋痛、肠胃炎、胃痛、消化不良、咳嗽、骨折）	煮水喝或捣碎包敷	C M	0.06	(Dubost, 2010; Ong et al, 2018; Khamphilavong et al, 2021; Phengmala et al, 2023; Zhou et al, 2023; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
观音姜	*Curcuma roscoeana* Wall.	Zingiberaceae	C: nga thing myu; L: khi min	草本	块茎	药用（消化不良、跌打损伤、腹胀）	捣碎成粉泡水喝或包敷	W	0.01	(据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
顶花莪术	*Curcuma yunnanensis* N. Liu et S. J. Chen	Zingiberaceae	M: sa non phar	草本	块茎	药用（肠胃疾病、背痛、腹痛）	煮水喝	C	0.03	(Fujikawa et al, 2007; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018)
印尼莪术	*Curcuma zanthorrhiza* Roxb.	Zingiberaceae	L:warn suk mod louk	草本	块茎	药用（抗炎、抗菌、提免疫、促消化）	煮水喝	C M	0.03	(Dubost et al, 2019; Elliott et al, 2020; Phengmala et al, 2023)
绿豆蔻	*Elettaria cardamomum* (L.)	Zingiberaceae	M: pha lar sein	草本	种子	药用（头痛、泌尿系统疾病、心脏病）	加热后捣碎泡水喝	C M	0.02	(Xu et al, 2004; Zhang et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Maton									
瓷玫瑰	*Etlingera elatior* (Jack) R. M. Sm.	Zingiberaceae	J:miebumienai; Han: huoju jiang	草本	花序	蔬菜	可作时鲜蔬菜	C M	0.07	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; 程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Cao et al, 2020; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
茴香砂仁	*Etlingera yunnanensis* (T. L. Wu & S. J. Chen) R. M. Smith	Zingiberaceae	D: ma niang bu, hen dun; H: mi jie; Y: ge bo; KM: ge le bo bi	草本	根茎、花序	调味香料；药用（清火解毒、利尿、健胃消食、中暑、脘腹胀痛）	根茎或花序作调味香料；煮水喝	W	0.02	(李秦晋等, 2007; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
舞花姜	*Globba racemosa* Smith	Zingiberaceae	D: qin teng; M: pa dain ngo	草本	花序嫩茎	蔬菜	花序及嫩茎可作时鲜蔬菜	W C	0.02	(Southavong et al, 2013; Kongmany et al, 2018)
双翅舞花姜	*Globba schomburgkii* Hook. f.	Zingiberaceae	L: khing pa	草本	果实、根茎	药用（胃炎、消化不良）	煮水喝	W	0.01	(Xu YK et al, 2004)
黄白姜花	*Hedychium chrysoleucum* Hook	Zingiberaceae	D: muodaihong; H: meyexiu	草本	叶	蔬菜、调味香料	烹饪调味	W C	0.01	(Zhang et al, 2023)
红姜花	*Hedychium coccineum* Buch.-Ham. ex Sm.	Zingiberaceae	D：dai heng hao, nuodai huomu	草本	块茎、花序	观赏；药用（咳嗽、哮喘、便秘、腰痛、麻木）	炒制；水煮	C	0.14	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 国家中医药管理局《中华

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; Kyin & Lwin, 2015; 陶川, 2018; Win, 2020; Moyon & Chara, 2021; Mya et al, 2021; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
姜花	*Hedychium coronarium* Koen.	Zingiberaceae	D:dai hen go, luo dai heng; H: me ye xiu; K: nan pan; M: ngey pan;	草本	嫩茎、花序、根茎	蔬菜；药用（清火解毒、止咳平喘、祛风除湿、活血止痛、利尿通淋、风湿痛）	花序炒食、凉拌；煮水喝或捣碎包敷	W C M	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; Ahn et al, 2020)
黄姜花	*Hedychium flavum* Roxb.	Zingiberaceae	Han: huang jiang hua	草本	花、根茎	蔬菜；药用（健胃、咳嗽）	花水焯后炒煮凉拌均可；根茎煮水喝	W	0.02	(方利英等, 2006; 李秦晋等, 2007)
圆瓣姜花	*Hedychium forrestii* Diels	Zingiberaceae	Han: jiang hua	草本	花	蔬菜	花可作时鲜蔬菜	W	0.02	(Ahn et al, 2020; Mya et al, 2021)
姜花属一种	*Hedychium gracile* Roxb.	Zingiberaceae	K:pade kaw	草本	根、果实、茎	药用（痢疾、腹泻、胃痛）	煲汤调味	W C	0.02	(Ghorbani et al, 2011; Kyin & Lwin, 2015)
草果药	*Hedychium spicatum* Sm.	Zingiberaceae	H: mai qie	草本	根茎	药用（跌打损伤、消炎、月经出血、伤口出血、滋补、哮喘、肾病）	煎汤、浸酒、捣碎包敷	W	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; Ghorbani et al, 2011)
毛姜花	*Hedychium villosum* Wall.	Zingiberaceae	H: mai qie	草本	根茎	药用（祛风止咳、跌打损伤）	捣碎包敷	W	0.03	(Kyin & Lwin, 2015; Yang & Yu, 2018; Zhang et al, 2021)
白花山柰	*Kaempferia candida*	Zingiberaceae	M: pa dat sar	草本	花、块茎	芳香蔬菜；药用（消化不良、外伤出血）	煮后凉拌、煮水喝	C	0.03	(Defilipps & Krupnick, 2018; Yang & Yu, 2018;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
	Wall.									Zhang et al, 2021)
紫花山柰	*Kaempferia elegans* (Wall.) Baker	Zingiberaceae	M: kun ka do	草本	叶、块茎	叶作蔬菜；块茎药用（消化不良、痢疾）	凉拌或煮水喝	C M	0.19	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; 黄加元, 2005; 杨敏杰等, 2005; Ministry of Health DOTM, 2000; Kraisintu, 2003; Delang, 2007; 张卫明和肖正春, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Kyin & Lwin, 2015; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Kyaw et al, 2020; Pham et al, 2021; Zhang et al, 2022; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
山柰	*Kaempferia galanga* L.	Zingiberaceae	D: wan huang; K: nan pan; L: varn horm; M: kun sar go mon	草本	花序、块茎	调味香料；药用（清热解毒、消肿止痛、通气血、眼痛、伤口、头晕、消化不良）	做肉类煮汤、凉拌的调味香料；捣碎喝汁	W C M	0.09	(Kyin & Lwin, 2015; Dubost et al, 2019; Ahn et al, 2020; Elliott, 2020; Kyaw et al, 2020; Win, 2020; Pham et al, 2021; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
小花山柰	*Kaempferia parviflora* Wall. ex Baker	Zingiberaceae	M: nan win nat	草本	根茎	药用（癌症、延年益寿）	煮水喝	W C M	0.12	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; Kyin & Lwin, 2015; Dubost et al, 2019; Khaing et al, 2020; Khamphilavong et al, 2021; 王佳佳等, 2020; Pham et al, 2021; Hein et al, 2022; Phengmala et al, 2023)
海南三七	*Kaempferia rotunda* L.	Zingiberaceae	D: yuan shan nai	草本	嫩茎根茎	调味香料；药用	花观赏；根茎作调料	W	0.04	(Dubost et al, 2019; Ahn et al, 2020; Pham et al, 2021Dubost et al, 2019; Ahn et al, 2020; Pham et al, 2021; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
喙花姜	*Rhynchanthus beesianus* W. W. Smith	Zingiberaceae	Han: ai jiang	草本	根茎	药用（胃痛、肠胃疾病）	煮水喝	W M	0.02	(Kyin & Lwin, 2015; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
喙花姜属一种	*Rhynchanthus longiflorus* Hook.f.	Zingiberaceae	C: lone shin	草本	块茎	药用（健胃消食、祛风、咳嗽）	煮水喝	W	0.01	(Fujikawa et al, 2007)
土田七	*Stahlianthus involucratus* (King ex Baker) Craib ex Loesener	Zingiberaceae	M:malar new	草本	根茎	药用（散瘀消肿、活血止血、行气止痛、跌打瘀痛、风湿痛、吐血）	捣敷；研末撒或调敷	W C M	0.01	(Shukurova et al, 2020)
髯毛姜	*Zingiber barbatum* Wall.	Zingiberaceae	M:meik thalin, pwe au	草本	根茎	药用（抗炎、镇痛、痛风、关节痛）	捣碎喝汁	W M	0.04	(禹平华等, 1985; Xu YK et al, 2004; 郭凤根等, 2018; Hein et al, 2022)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
珊瑚姜	*Zingiber corallinum* Hance	Zingiberaceae	D:guo ha	草本	花序嫩茎	蔬菜	花序嫩茎可作蔬菜食用	W C	0.05	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 黄加元, 2005; 陶川, 2018; Zhang et al, 2023)
多毛姜	*Zingiber densissimum* S. Q. Tong et Y. M. Xia	Zingiberaceae	Han: ye jiang	草本	花序	蔬菜、调味香料	可作蔬菜食用亦可作调味作料	W	0.03	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
脆舌姜	*Zingiber fragile* S. Q. Tong	Zingiberaceae	D: zhonghiag	草本	嫩茎叶	蔬菜	火烧后凉拌	W M	0.04	(程必强和喻学俭, 1995; 程必强等, 2001; 黄加元, 2005; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查)
勐海姜	*Zingiber menghaiense* S. Q. Tong	Zingiberaceae	D: dor ke yao	草本	块茎	蔬菜，调味香料	作辛香调料	W	0.02	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002)
蘘荷	*Zingiber mioga* (Thunb.) Rosc.	Zingiberaceae	Han: rang he	草本	花序	蔬菜、调味香料	生吃或煮品调味	C	0.01	(据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
拿马山姜	*Zingiber natmataungense* S.S.Zhou & R.Li	Zingiberaceae	C: ma ye	草本	块茎	药用（跌打损伤、感冒咳嗽）	捣碎后煮水喝或包敷	W C	0.02	(Ghorbani et al, 2011; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
截形姜	*Zingiber neotruncatum* T. L. Wu & al	Zingiberaceae	Han: xiang jiang	草本	根	调味香料	煮牛羊肉汤	W C M	0.27	(禹平华等, 1985; 程必强, 1991; 程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; 刘怡涛和龙春林, 2002; Kraisintu, 2003; 国家中医药管理局《中华本草》编委会,

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										2005; 张卫明和肖正春, 2007; 陈光等, 2010; Dubost, 2010; Lamxay et al, 2011; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Sydara et al, 2014; Kyin & Lwin, 2015; Moyon & Chara, 2021; Defilipps & Krupnick, 2018; Kyaw et al, 2020; Zhang et al, 2021; Zhang et al, 2021; Phengmala et al, 2023; Zhang et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
姜	*Zingiber officinale* Roscoe	Zingiberaceae	D: ge xin, wang, king; H: cao zhi; K: loain sein; KM: la wei; L: khing; M: ginger; Y: zong	草本	根茎、叶、花序	调味香料; 药用(风寒感冒、咳嗽、咽喉痛、胃寒呕吐、风湿痛)	去腥调味; 花序炒; 煮水喝或捣碎包敷	C M	0.19	(程必强等, 2001; Soejarto et al, 2002; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 李秦晋等, 2007; Htun et al, 2019; Cao et al, 2020; Elliott, 2020; Elliott et al, 2020; Ahn et al, 2020; Tin & Wai, 2020; Kawase et al, 2021; Zhang et al, 2021; Chassagne, 2022;

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
										Phengmala et al, 2023; Zhou et al, 2023; Phengmala et al, 2024; 根据中国西双版纳州和普洱市调查)
圆瓣姜	*Zingiber orbiculatum* S. Q. Tong	Zingiberaceae	D: nuo eng, zhong gu; H: suo ya mi jie; Y: ge bo bu	草本	嫩茎块根	蔬菜、调味香料	花序食用；块茎调味	W	0.14	(程必强, 1991; 肖文祥等, 1993; Fujikawa et al, 2007; Ministry of Public Health IOTM, 2013; Sydara et al, 2014; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Ong et al, 2018; Ministry of Public Health IOTM, 2019; Kyaw et al, 2020; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查; 据缅甸钦邦 Natma Taung 国家公园调查)
紫色姜	*Zingiber purpureum* Rosc	Zingiberaceae	D: bu lei; K: min tha ra; L: van phai,warn fai; M: meik tha lin;	草本	花和块茎	调味香料；药用（花护肤、产后恢复、健胃消食、风湿痛、咳嗽、哮喘、麻风病、除虫）	煮水喝或捣碎包敷	W C M	0.04	(Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; Lundh, 2007; Phengmala et al, 2023)
红冠姜	*Zingiber roseum* (Roxb.) Roscoe	Zingiberaceae	D: wang fei	草本	嫩茎	蔬菜	嫩茎可做时鲜蔬菜	W M	0.05	(程必强和喻学俭, 1995; 刘怡涛和龙春林, 2002; 黄加元, 2005; 杨敏杰等, 2005; Zhang et al, 2023)

中文名	植物学名	科名	当地名	生长习性	部位	用途	使用方法	资源来源	UV	参考来源
阳荷	*Zingiber striolatum* Diels	Zingiberaceae	Han: yang he	草本	花序嫩茎	蔬菜	花序嫩茎可作蔬菜食用	W	0.20	(程必强和喻学俭, 1995; 阿海, 1999; 程必强等, 2001; Xu et al, 2004; Xu YK et al, 2004; 黄加元, 2005; 国家中医药管理局《中华本草》编委会, 2005; Delang, 2007; 李秦晋等, 2007; 何棠, 2009; Dubost, 2010; Kyin & Lwin, 2015; Defilipps & Krupnick, 2018; Kongmany et al, 2018; Kyaw et al, 2020; Phengmala et al, 2023; 根据中国西双版纳州和普洱市调查; 据老挝北部南塔省、丰沙里省、乌多姆赛省及万象市调查; 据缅甸克钦邦葡萄地区和密支那市调查)
红球姜	*Zingiber zerumbet* (L.) Smith	Zingiberaceae	D:wang bu fei; H: bei le xie nei; K: nan pan si; L: van fai, ka theu; M: zin byu bin, linne gyi	草本	花序、嫩茎、根茎	蔬菜、药用（祛风解毒、咳嗽、消化不良、腹痛）	花序嫩茎可作蔬菜食用; 煮水喝	W C M	0.02	(Dubost et al, 2019; Ahn et al, 2020)

参考文献

A H (1999) Xishuangbanna Nahani Medicine. Yunnan Nationalities Press, Kunming. (in Chinese) [阿海 (1999) 西双版纳哈尼族医药. 云南民族出版社, 昆明.]

Ahn TH, Goh YB, Jin HY, Bae JG, Lee KC (2020) A study on the collection and utilization of Myanmar plants as garden plants. Korean Journal of Plant Resources, 33, 404-416.（in Korean with English abstract）[안태현, 고여빈, 진혜영, 배준규, 이기철 (2020) 정원소재로서의 미얀마 유용 및 관상식물 수집·활용에 관한 연구. 한국자원식물학회지, 33, 404-416.]

Aryal K, Moe AT, Hein PP, Bay YHS, Htay T, Aung HW, Shakya B, Yang XF, Yi SL (2020) Wild and non-cultivated edible plants and their contribution to local livelihoods in Putao, Myanmar. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, 25-40.

Cai XJ, Zhou K, Huang MY, Jiang JL, Kang GJ (2018) Investigation of medicinal plant resources of Pu'er folk custom "Eating Medicinal Roots on Dragon Boat Festival in May". Chinese Journal of Ethnopharmacology and Ethnomedicine, 27, 138-146. (in Chinese) [蔡秀江, 周葵, 黄美艳, 姜俊玲, 康国娇 (2018) 普洱民俗“五月端午吃药根”的药用植物资源调查. 中国民族民间医药, 27, 138-146.]

Cao YL, Li R, Zhou SS, Song L, Quan RC, Hu HB (2020) Ethnobotanical study on wild edible plants used by three trans-boundary ethnic groups in Jiangcheng County, Pu'er, Southwest China. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 16, 66.

Chen G, You CL, Hu ZR, Shen D, Li LH, Liu X (2010) Investigation and analysis of local varieties of major crops in Xishuangbanna ethnic minority areas. Journal of Plant Genetic Resources, 11, 335-342. (in Chinese with English abstract) [陈光, 游承俐, 胡忠荣, 沈镝, 李立会, 刘旭 (2010) 西双版纳少数民族地区主要作物地方品种调查与分析。植物遗传资源学报, 11, 335-342.]

Cheng BQ (1991) Edible spice plants of the Xishuangbanna ethnic minority. Flavour Fragrance Cosmetics, (03), 27-31. (in Chinese) [程必强 (1991) 西双版纳少数民族的食用香料植物. 香料香精化妆品, (03), 27-31.]

Cheng BQ & Yu XJ (1995) Yunnan tropical and subtropical spice plants. Yunnan University Press, Kunming. (in Chinese) [程必强和喻学俭 (1995) 云南热带亚热带香料植物. 云南大学出版社, 昆明.]

Cheng BQ, Yu XJ, Ding JK (2001) Yunnan spice plant resources and their utilization. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [程必强, 喻学俭, 丁靖垲 (2001) 云南香料植物资源及其利用. 云南科技出版社, 昆明.]

De Boer H & Lamxay V (2009) Plants used during pregnancy, childbirth and postpartum healthcare in Lao PDR: A

comparative study of the Brou, Saek and Kry ethnic groups. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 5, 25.

De Boer HJ, Lamxay V, Björk L (2012) Comparing medicinal plant knowledge using similarity indices: A case of the Brou, Saek and Kry in Lao PDR. Journal of Ethnopharmacology, 141, 481-500.

DeFilipps RA & Krupnick GA (2018) The medicinal plants of Myanmar. PhytoKeys, 102, 1-341.

Delang OC (2007) The role of medicinal plants in the provision of health care in Lao PDR. Journal of Medicinal Plants Research, 1, 50-59.

Dubost JM (2010) Medicinal plants used in Nam Kan National Park: an ethnobotanical survey in Hmong, Lue and Lamet communities. Gibbon Experience Project, Vientiane, 1-30.

Dubost JM, Phakeovilay C, Her C, Bochaton A, Elliott E, Deharo E, Xayvue M, Bouamanivong S, Bourdy G (2019) Hmong herbal medicine and herbalists in Lao PDR: Pharmacopeia and knowledge transmission. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 15, 27.

Elkington BG, Phiapalath P, Sydara K, Somsamouth V, Goodsmith NI, Soejarto DD (2014) Assessment of the importance of medicinal plants among communities around Khiat Ngong of southern Laos. Journal of Environmental Biology, 35, 607-615.

Elliott E, Chassagne F, Aubouy A, Deharo E, Souvanasy O, Sythamala P, Sydara K, Lamxay V, Manithip C, Torres JA, Bourdy G (2020) Forest Fevers: Traditional treatment of malaria in the southern lowlands of Laos. Journal of Ethnopharmacology, 249, 112187.

Elliott EM (2021) Potent Plants, Cool Hearts: A Landscape of Healing in Laos (Ph.D), UCL (University College London), London.

Fan RY, Gou Y, Wang C, Yang NT, Wang YH (2019) Ethnobotanical survey on mosquito-repellent plants used by Hani people in Xishuangbanna. Guihaia, 39, 359-374. (in Chinese with English abstract) [范汝艳, 苟祎, 王趁, 杨念婷, 王雨华 (2019) 西双版纳哈尼族驱蚊植物的民族植物学调查研究. 广西植物, 39, 359-374.]

Fang LY, Liu HM, Cui JY, Xu ZF (2006) Traditional utilization of wetland plants in Dai villages of Xishuangbanna. Biodiversity Science, (04), 300-308. (in Chinese with English abstract) [方利英, 刘宏茂, 崔景云, 许再富 (2006) 西双版纳傣族村寨对湿地植物的传统利用. 生物多样性, (04), 300-308.]

Fujikawa K, Oo HP, Din A, Khaing K, Okada M (2007) A botanical inventory in Myanmar (1): Market research of herbal medicine. Journal of Japanese Botany, 82, 309-315.

Ghorbani A, Langenberger G, Liu F, Sauerborn J (2011) Ethnobotanical study of medicinal plants utilized by Hani ethnicity in Naban River Watershed National Nature Reserve, Yunnan, China. Journal of Ethnopharmacology, 134, 651-667.

Gou Y, Fan RY, Pei SJ, Wang YH (2018) Before it disappeared: Ethnobotanical study of fleagrass (Adenosma buchneroides), a traditional aromatic plant used by the Akha people. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 14, 79.

Guo FG, Wang SY, Zhang YH (2000) Wild vegetable resources in Xishuangbanna. Chinese Wild Plant Resources, (03), 31-32. (in Chinese) [郭凤根, 王仕玉, 张应华 (2000) 西双版纳的野生蔬菜资源. 中国野生植物资源, (03), 31-32.]

Haokip LL, Panmei R (2022) Lesser-known wild edible plants used by Thadou-Kuki tribe of Indo-Myanmar region, Manipur, India. Biodiversitas, 23, 3991-3998.

He T (2009) Wild vegetable plant resources in Pu'er City. Forest By-Product and Speciality in China, (03), 84-87. (in Chinese) [何棠 (2009) 普洱市野生蔬菜植物资源. 中国林副特产, (03), 84-87.]

Hein PP, Arunachalam K, Fu Y, Zaw M, Yang YP, Yang XF (2023) Diversity of medicinal plants and their therapeutic usages of Kachin people (Jinghpaw) in the central part of Kachin State, Myanmar. Journal of Ethnopharmacology, 302, 115921.

Htun N, Win SS, Reh P (2019) Some plants used by Kayah Tribe in Loikaw Area, Kayah State. Dagon University Commemoration of 25th Anniversary Silver Jubilee Research Journal, 9, 342-348.

Huang JY (2005) Utilization status and development prospects of Zingiberaceae plant resources in Xishuangbanna. Chinese Wild Plant Resources, (02), 26-27, 30. (in Chinese with English abstract) [黄加元 (2005) 西双版纳姜科植物资源的利用现状与开发前景. 中国野生植物资源, (02), 26-27, 30.]

Jianwitchayakul P, Aung SS, Aye T, Zarli M, Myint ZM, Mu AA (2018) Investigation on biodiversity and ethnobotany in Mon State, Republic of the Union of Myanmar. □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□ (□□□□.), 6, 11-20.

Kawase M, Saw OM, Niwa K, Nishikawa T (2021) A field study on plant genetic resources of Chin State, Myanmar, in February 2019. Asia and Oceania Journal of Plant Conservation and Resource (AREIPGR), 37, 114-142.

Khaing ZT, Aung YMS, Aung YM (2020) A comparative study of phytochemical constituents and antioxidant activities of rhizomes of Curcuma aeruginosa Roxb. and Kaempferia parviflora Wall. Medicine, Chemistry, Environmental Science, 3, 2059-2067.

Khamphilavong K, Lili Z, Yongxiang K, Hua L, Awais M (2021) Ethnobotanical study on wild edible plants and their traditional use in Vientiane Province, Lao P.D.R. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-139060/v1]

Khamphilavong K, Zhang L, Soukkhavong M, Awais M, Kang Y (2023) Ethnobotanical study on the utilization of medicinal plants by the Phouthai ethnic group in Khammouan Province, Lao PDR. International Journal of Probiotics and Dietetics, 3, 32-45.

Kinghorn AD, Falk H, Gibbons S, Kobayashi J, Asakawa Y, Liu JK (2021) Progress in the Chemistry of Organic Natural Products. Springer, Berlin [Online]. Available: http://www.springer.com/series/10169

Kongmany S, Mouachanh X, Onevilay S (2018) Medicinal Plants of Northern Laos (Volume 1). Daejeon, Republic of Korea: Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology, 1-280.

Kraisintu K (2003) The status of medicinal and aromatic plants in Cambodia, Laos, the Philippines, Thailand and Vietnam. Medicinal Plants and Their Utilization.International Centre for Science and High Technology, Trieste, pp. 3-54.

Kyaw YMM, Bi YF, Oo TN, Yang XF (2020) Traditional medicinal plants used by the Mon people in Myanmar. Journal of Ethnopharmacology, 265, 113253.

Kyin ML & Lwin MKT (2015) Medicinal Plant List of Myanmar (Second Edition). FAME Publishing House, Yangon, Myanmar.

Lamxay V, de Boer HJ, Björk L (2011) Traditions and plant use during pregnancy, childbirth and postpartum recovery by the Kry ethnic group in Lao PDR. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 7, 14.

Li QJ, Liu HM, Xu YK, Chen J, Xu ZF (2007) Changes and causes analysis of wild vegetable species used by the Dai people in Xishuangbanna. Yunnan Plant Research, (04), 467-478. (in Chinese with English abstract) [李秦晋, 刘宏茂, 许又凯, 陈剑, 许再富 (2007) 西双版纳傣族利用野生蔬菜种类变化及原因分析. 云南植物研究, (04), 467-478.]

Libman A, Bouamanivong S, Southavong B, Sydara K, Soejarto DD (2006) Medicinal plants: An important asset to health care in a region of Central Laos. Journal of Ethnopharmacology, 106, 303-311.

Ling TC, Inta A, Armstrong KE, Little DP, Tiansawat P, Yang YP, Phokasem P, Tuang ZK, Sinpoo C, Disayathanoowat T (2022) Traditional knowledge of textile dyeing plants: A case study in the Chin ethnic group of Western Myanmar. Diversity, 14, 1065.

Liu YT & Long CL (2002) Preliminary study on edible flowers of various ethnic groups in Yunnan. Plant Diversity, (01), 41-56. (in Chinese) [刘怡涛和龙春林 (2002) 云南各民族食用花卉的初步研究. 云南植物研究, (01), 41-56.]

Łuczaj Ł, Lamxay V, Tongchan K, Xayphaktsa K, Phimmakong K, Radavanh S, Kanyasone V, Pietras M, Karbarz M (2021) Wild food plants and fungi sold in the markets of Luang Prabang, Lao PDR. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 17, 6.

Lundh E (2007). Plant use in ante- and postpartum health care in Lao PDR. Master's thesis, Department of Systematic

Botany, Uppsala University, Sweden.

Ministry of Public Health, IOTM (2013). Medicinal Plants and Herbs in the Lao People's Democratic Republic (Volume 1). Ministry of Public Health, IOTM, Vientiane, Lao PDR.

Ministry of Public Health, IOTM (2018). Handbook of Medicinal Plants of Lao PDR (Volume 1). Ministry of Public Health, IOTM, Vientiane, Lao PDR.

Ministry of Public Health, IOTM (2019). Medicinal Plants of the Ex-Situ Medicinal Plants Preserved in Veunkham (Volume 1). Ministry of Public Health, IOTM, Vientiane, Lao PDR.

Moe TM & Hlaing AT (2019) Some useful plants as traditional medicine in Kyaing Tong Township. Proceedings of the 2nd Myanmar-Korea Conference, pp. 406-413, Conference Organizing Committee, Yangon, Myanmar.

Moyon WA & Chara E (2021) Indigenous fishing methods of the Moyon tribe of Manipur (India) and Myanmar. Society & Sustainability, 3, 54-67.

Mya Z, Mu AA, Myint ZM, Aye T, Aung SS, Jianwitchayakul P (2021) Quantitative ethnobotanical study of medicinal plants used by Karen people of Wah-Theinkha Village in Kawmhu Township, Myanmar. Interdisciplinary Research Review, 16 18-22.

Myanmar Ministry of Health, Department of Traditional Medicine (2000) Medicinal Plants of Myanmar (Volume 1). Ministry of Health, Department of Traditional Medicine, Yangon, Myanmar.

Myanmar Ministry of Health, Department of Traditional Medicine (2007) Medicinal Plants of Myanmar (Volume 2). Ministry of Health, Department of Traditional Medicine, Yangon, Myanmar.

Naito K, San San Aye, Min San Thein, Aung Phyoe Hein, Takei E, Osada T, Domon E, Watanabe K, Kawase M (2017) A field study to explore plant genetic resources in the Sagaing Region and Shan State of Myanmar in 2016. Asia and Oceania Journal of Plant Conservation and Resource, 33, 265-293.

Nyotin N (2008) Some edible wild and cultivated plants used as food for Palaung Tribe in Kyaukme Township. Universities Research Journal, 1, 167-182.

Ong GH, Ling SM, Win TTM, Kang DH, Lee JH, Kim YD (2018) Ethnomedicinal plants and traditional knowledge among three Chin indigenous groups in Natma Taung National Park (Myanmar). Journal of Ethnopharmacology, 225, 136-158.

Pan YM, Liu HM, Xu ZF (2006) Study on the utilization of traditional beverage plants by the Dai people in Xishuangbanna. Plant Diversity, 28, 653-664.(in Chinese with English abstract) 潘玉梅, 刘宏茂, 许再富 (2006) 西双版纳傣族传统饮料植物利用的研究. 云南植物研究, 28, 653-664.

Paroda R, Dasgupta S, Bhag Mal, Ghosh S P, Pareek S K (2013) Proceedings of the Expert Consultation on Promotion of Medicinal and Aromatic Plants in the Asia-Pacific Region. Bangkok, Thailand: Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions (APAARI) & Food and Agriculture Organization of the United Nations - Regional Office for Asia and the Pacific (FAO RAP).

Pham NK, Nguyen HT, Nguyen QB (2021) A review on the ethnomedicinal uses, phytochemistry and pharmacology of plant species belonging to Kaempferia L. genus (Zingiberaceae). Pharmaceutical Sciences Asia, 48, 1-24.

Phengmala K, Saensouk S, Saensouk P, Souladeth P (2023) Ethnobotany of Hmong ethnic groups in Bolikhamxay Province, Central Laos PDR. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 51, 13284.

Phengmala K, Saensouk S, Saensouk P, Souladeth P (2024) Ethnobotanical study of medicinal plants used by Lao ethnic group in Central Laos. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 52, 13633.

Pritchard B, Vicol M, Rammohan A (2017).A mixed-methods analysis of homegardens in rural Myanmar. [International Colloquium paper]. Proceedings of the International Colloquium on Initiatives in Critical Agroecology Studies, The Hague, Netherlands: International Institute of Social Studies (CENFUNG ICAS eTXaLDe).

Sam HV, Nanthavong K, Kessler PJA (2004) Trees of Laos and Vietnam: A field guide to 100 economically or ecologically important species. Blumea, 49, 201-349.

Shin T, Fujikawa K, Moe AZ, Uchiyama H (2018) Traditional knowledge of wild edible plants with special emphasis on medicinal uses in Southern Shan State, Myanmar. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 14, 48.

Shukurova MK, Asikin Y, Chen Y, Kusano M, Watanabe KN (2020) Profiling of volatile organic compounds in wild indigenous medicinal ginger (Zingiber barbatum Wall.) from Myanmar. Metabolites, 10, 243-256.

Soejarto DD, Pezzuto JM, Fong H, Tan GT, Zhang HJ, Tamez P, Aydoğmus Z, Chien NQ, Franzblau SG, Gyllenhaal C, Regalado J, Hung Nv, Vu HD, Hiep Nt, Xuan Lt, Nong VH, Nguyen M, Bich TQ, Lộc PT, Vu BM, Southavong BH, Sydara K, Bouamanivong S, O'Neill MJ, Lewis J, Dietzman G (2002) An international collaborative program to discover new drugs from tropical biodiversity of Vietnam and Laos. Natural Product Sciences, 8, 1-15.

Southavong B, Sydara K, Souliya O, Phonglavong K (2013) Medicinal Plants and Herbs in the Lao People's Democratic Republic (Volume 1). Naxaithong Printing House, Vientiane, Laos.

State Administration of Traditional Chinese Medicine Editorial Board of Zhonghua Bencao (2005) Zhonghua Bencao: Dai Medicine Volume. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [国家中医药管理局《中华本草》编委会 (2005) 中华本草·傣药卷. 上海科学技术出版社, 上海.]

Sydara K, Xayvue M, Souliya O, Elkington BG, Soejarto DD (2014) Inventory of medicinal plants of the Lao People’s

Democratic Republic: A mini review. Journal of Medicinal Plant Research, 8, 1262-1274.

Tao C (2018) Study on edible flower resources and their application in Pu'er, Yunnan. Journal of Pu'er University, 34, 1-8. (in Chinese) [陶川 (2018) 云南普洱食用花卉资源及应用研究. 普洱学院学报, 34, 1-8.]

Thantsin K, San KAA, Aye YY (2020) Essential improvement of non-timber forest products in Myanmar. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 591, 012031.

Tin YY, Wai TT (2020) Ethnobotanical study on some Myanmar snacks found in Banmaw City, Kachin State. Banmaw University Research Journal, 11, 304-332.

Van HT, Do TT, Lun TN, Le VS, Doan VD (2021) Chemical constituents and antibacterial activities of essential oils from aerial parts of three Limnophila species (Scrophulariaceae) in Southern Vietnam. Research Journal of Chemistry and Environment, 25, 12-19.

Wang JJ, Hu JM, Chen J, Xia NH. (2020) Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and toxicology of Kaempferia parviflora. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 28, 651-660. (in Chinese with English abstract)[王佳佳, 胡继敏, 陈娟, 夏念和(2020) 黑姜的化学成分、药理作用及毒理学研究进展. 热带亚热带植物学报, 28, 651-660.]

Win TTM (2020) Ethnobotanical study of medicinal plants among four Chin indigenous groups in Tedim Township, Northern Chin State, Myanmar. Maubin University Research Journal, 11, 284-295.

Xiao WX, Xiao LY, Ma XX (1993) Phenophase of wild plants in Xishuangbanna and the “food culture” of ethnic minorities. Chinese Wild Plant Resources, (02), 37-42. (in Chinese)[肖文祥, 肖来云, 马信祥(1993) 西双版纳野生植物的物候期与少数民族的 “食文化”. 中国野生植物资源, (02), 37-42.]

Xu YK, Tao GD, Liu HM, Yan KL, Dao XS (2004) Wild vegetable resources and market survey in Xishuangbanna, Southwest China. Economic Botany, 58, 647-667.

Yadana, Lwin HH, Aung AA (2021) Ethnomedicinal study of some edible plants in Kalwin Village, Myeik Township. Myanmar Academy of Arts and Science, 426-433.

Yamada K, Yanagisawa M, Kono Y, Nawata E (2004) Use of natural biological resources and their roles in household food security in Northwest Laos. Southeast Asian Studies, 41, 426-443.

Yang MJ, Zhang LQ, Li XX, Qin R, Zhang SZ, Gong YJ, Liu FW (2005) Wild edible spice plant resources in Yunnan. China Vegetables, (04), 32-33. (in Chinese)[杨敏杰, 张丽琴, 李锡香, 秦荣, 张思竹, 龚亚菊, 刘发万 (2005) 云南野生食用香料植物资源. 中国蔬菜, (04), 32-33.]

Yang XF, Yu Z (2018) Typical vegetables in Myanmar. University of Science and Technology of China Press, Hefei, Anhui,

China.

Yu PH, Xu ZF, Huang YL. (1985) Investigation and study of traditional cultivated plants in Dai villages in Xishuangbanna. Plant Diversity, (02), 169-186. (in Chinese)[禹平华, 许再富, 黄玉林 (1985) 西双版纳傣寨传统栽培植物的调查研究. 云南植物研究, (02), 169-186.]

Zhang DD, Karuppusamy A, Wang YH, Zhang Y, Yang J, Pyae Phyo Hein, Aye Mya Mon, Li JW, Angkhana I, Yang XF. (2021) Evaluation on antidiabetic properties of medicinal plants from Myanmar. The Scientific World Journal, 1424675.

Zhang Q, Cheng Z, Fan YX, Zhang DZ, Wang MM, Zhang JH, Sarana S, Wu XJ, Long CL (2023) Ethnobotanical study on edible flowers in Xishuangbanna, China. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 19, 43.

Zhang WM & Xiao ZC (2007) Development and utilization of spice plant resources in China. Southeast University Press, Nanjing. (in Chinese)[张卫明, 肖正春 (2007) 中国辛香料植物资源开发与利用. 东南大学出版社, 南京.]

Zhang Y, Fu Y, Yang XF, Aye MM, Pyae PH, Li JW, Yunn MMK, Thae TS, Bandana S, Kamal A, Yi SL. (2022) Vegetables from local markets in Myanmar. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu.

Zhang Y, Li JW, San MM, Whitney CW, San TT, Yang XF, Mon AM, Hein PP (2021) The secret of health in daily cuisine: Typical healthy vegetables in local markets in Central Myanmar. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 16, 73.

Zhou H, Zhang JQ, Brian S. Kirbis, Zi Mula, Zhang W, Kuang YZ, Huang Q, Yin L. (2023) Ethnobotanical study on medicinal plants used by Bulang people in Yunnan, China. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 19, 38.

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25487, pages 1–12
doi: 10.17520/biods.2025487
cstr: 32101.14.biods.2025487

•生物编目•

南海翼足类物种多样性与分布

梁竣策[1,2], 李开枝[1,3*], 谭烨辉[1,2]

1. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境与岛礁生态全国重点实验室, 广东省应用海洋生物学重点实验室, 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站, 广东大亚湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站, 广东深圳 518121

摘要: 翼足类隶属于软体动物门腹足纲异鳃亚纲, 终生营浮游生活, 是海洋浮游动物的重要类群, 我国关于该类群的生物多样性与分布研究较为缺乏。南海具有河口、陆架、深海海盆和岛礁等多种生境, 海洋生物多样性高。本研究基于2022–2023年在南海开展4个航次所采集的浮游动物样品, 结合体视显微镜与扫描电子显微镜观察, 对物种进行鉴定与形态描述, 旨在厘清南海翼足类物种多样性及其分布格局。共鉴定翼足类26种, 隶属于13科18属。发现4个中国海新记录种, 即优雅小龟螺(*Diacavolinia elegans*)、加氏蝴蝶螺(*Desmopterus gardineri*)、四褶背鳃螺(*Notobranchaea tetrabranchiata*)和克氏长吻螺(*Cliopsis krohnii*), 并进行详细的形态描述。南海翼足类物种组成存在明显的区域差异: 陆架区物种最为丰富, 岛礁区物种较少; 近岸区翼足类丰度较高但多样性较低, 开阔深海则呈现丰度较低而多样性较高的特征; 垂直分布上, 翼足类主要富集于0–200 m水层, 其丰度与多样性随深度增加显著降低。此外, 不同生态区域间的优势种组成存在差异, 反映出翼足类对不同生境的生态适应策略。本研究更新了南海翼足类的物种名录, 提供了详细的分布信息, 能为南海浮游动物分类学、生物多样性研究以及海洋生态系统监测提供重要的基础资料。

关键词: 翼足类; 浮游动物; 新记录种; 生物多样性; 南海

梁竣策, 李开枝, 谭烨辉 (2026) 南海翼足类物种多样性与分布. 生物多样性, 34, 25487. doi: 10.17520/biods.2025487; cstr: 32101.14.biods.2025487.
Liang JC, Li KZ, Tan YH (2026) Species diversity and distribution of pteropods in the South China Sea. Biodiversity Science, 34, 25487. doi: 10.17520/biods.2025487; cstr: 32101.14.biods.2025487.

Species diversity and distribution of pteropods in the South China Sea

Junce Liang[1,2], Kaizhi Li[1,3*], Yehui Tan[1,2]

1 *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3 *Daya Bay Marine Biology Research Station, Chinese Academy of Sciences, National Field Observation and Research Station (Guangdong Daya Bay) for Marine Ecosystem, Shenzhen, Guangdong 518121, China*

ABSTRACT

Aims: Pteropods (Mollusca: Gastropoda) play a key role in marine ecosystems, contributing to critical processes such as the marine food web and carbon cycle. However, their diversity and distribution in the South China Sea remain poorly understood. To address these gaps and enhance the understanding of their regional biogeography, this study aimed to systematically investigate the species diversity and spatial distribution patterns of pteropods (Mollusca: Gastropoda) in the South China Sea.

Methods: Zooplankton samples were collected during four cruises across various ecological regions, including estuarine, shelf, basin, and island/reef areas of the South China Sea between 2022 and 2023. Species were identified based on morphological examination using stereomicroscopy and scanning electron microscopy. Ecological indices, including abundance, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index, were calculated to analyze

收稿日期 Received: 2025-12-06; 接受日期 Accepted: 2026-02-14
基金项目: 中国科学院战略生物资源计划能力建设项目(KFJ-BRP-017-095; CAS-TAX-24-044)、广东省科技计划项目(2023B1212060047; 2024B1212040008; 2025A1515012008)和科技基础资源调查专项(2025FY101400) Supported by the Biological Resources Program, Chinese Academy of Sciences (KFJ-BRP-017-095; CAS-TAX-24-044), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2023B1212060047; 2024B1212040008; 2025A1515012008), and Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China (2025FY101400)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: likaizhi@scsio.ac.cn

community structure.
Results: A total of 26 pteropod species belonging to 13 families and 18 genera were identified, including four new records for the South China Sea: *Diacavolinia elegans*, *Desmopterus gardineri*, *Notobranchaea tetrabranchiata*, and *Cliopsis krohnii*. Notable regional heterogeneity was observed: the Pearl River Estuary-western South China Sea shelf showed the highest species richness (22 species), while the Northern South China Sea islands and reefs had the lowest (6 species). Horizontally, coastal areas exhibited higher abundance but lower diversity, whereas open-sea areas showed the reverse pattern. Vertically, pteropods were predominantly concentrated in the 0–200 m layer, with abundance and diversity declining sharply with depth. The composition of dominant species varied markedly among different ecological regions.
Conclusion: This study updates the species checklist of pteropods in the South China Sea and reveals clear spatial partitioning in their community structure, reflecting adaptations to distinct habitats. The findings provide essential baseline data for understanding regional marine biodiversity and monitoring ecosystem changes in this marginal sea.
Key words: Pteropoda; zooplankton; new records; species diversity; South China Sea

翼足目(俗称翼足类)隶属于软体动物门腹足纲异鳃亚纲, 终生营浮游生活。该类群在全球海洋中广泛分布。根据World Register of Marine Species网站(http://www.marinespecies.org/)统计, 目前已知种类超过200种。由于翼足类的分布格局易受环境因子影响, 且世代周期短、更替迅速, 使其成为研究物种多样性与生态适应的理想实验材料(Bednaršek et al., 2021; Choo et al., 2021)。在海洋生态系统中, 翼足类发挥着多重关键作用: 它们通过滤食浮游植物和微生物, 成为连接初级生产者与高营养级生物的重要纽带; 在碳循环方面, 翼足类通过分泌黏液网、产生粪便颗粒以及死亡后钙质外壳的沉降, 有效促进有机碳与无机碳向深海输送, 深度参与海洋生物泵与碳酸盐泵过程(Lalli & Gilmer, 1989)。此外, 翼足类对环境变化(如温度与pH值波动)高度敏感, 因此也被视为指示水团变动和海洋生态系统健康状况的重要指标生物(Bednaršek et al., 2016)。

南海是西太平洋最大的边缘海之一, 地跨热带与亚热带, 海域辽阔、地形复杂, 涵盖河口、陆架、深海和岛礁等多种生境类型。其水文环境受季风驱动, 环流结构呈季节性转换: 冬季表现为气旋式环流, 夏季则转为反气旋式环流(黄企洲等, 1992)。同时, 黑潮分支、广东沿岸流、中尺度涡旋及沿岸上升流等过程相互交织, 共同塑造了南海多变的物理海洋环境(Shu et al., 2018)。南海通过吕宋海峡与太平洋相连, 经马六甲海峡与印度洋相通, 构成重要的生物迁移通道, 也被视为全球海洋生物多样性的热点区域之一(Ng & Tan, 2000)。这种复杂的水文背景造就了多样化的营养条件与栖息环境, 从而为南海浮游软体动物多样性的形成与维持奠定了重要基础。

我国海域翼足类多样性研究起步于张福绥(1964), 其对中国近海的浮游软体动物进行了系统整理与描述, 共报道翼足类35种及6个变种。然而, 由于翼足类在海洋中数量相对较少, 标本难以保存, 相关研究长期未受到足够重视, 后续名录更新工作几乎停滞。南海的相关研究尤为薄弱, 除Rottman (1976)在南海西南部记录到*Cavolinia inflexa*和*Clio cuspidate*外, 未见其他新增报道, 且上述记录缺乏形态学证据支持。尽管我国已出版多部涉及翼足类的浮游动物名录, 如《中国海洋生物名录》《中国海洋生物种类与分布》《中国海洋生物图集》等(黄宗国, 2008; 刘瑞玉, 2008; 黄宗国和林茂, 2012), 但所收录种类多基于已有报道, 形态仍主要依赖简化的外部特征描绘。此外, 目前国内使用的物种名录中仍存在较多同物异名与拼写错误, 且相关研究多集中于近岸浅海区域, 对深海及特殊生境种类的认知较为有限, 整体研究进展相对缓慢。在分布方面, 研究结果多依赖早期的零星记录, 缺乏系统性、大范围的调查, 尤其对翼足类在不同生境下种类组成与分布格局了解不足(Rottman, 1976; 戴燕玉, 1995; 胡剑等, 2008)。针对以上我国南海翼足类研究存在的不足, 本研究基于2022–2023年在南海4个航次所采集的浮游动物样品, 涵盖河口、陆架、海盆和岛礁等多种生态区域, 结合历史分布记录, 旨在系统解析南海翼足类的物种多样性及其分布格局, 更新其分类名录, 以期丰富南海浮游动物分类学与生物多样性的研究。

1 材料与方法

浮游动物样品主要依托以下4个航次采集获得: 南海东北部-吕宋海峡航次(2022年)、珠江口-南海西部共享航次(2023年)、南海北部岛礁航次(2022年)以及南海南部岛礁航次(2023年)。各航次信息详见表1。南海北部岛礁航次采用浅水II型浮游生物网(网目孔径160 μm), 南海南部岛礁航次采用浅水I型浮游生物网(网目孔径500 μm), 于表层5 m以浅水体进行水平拖网采集。珠江口-南海西部共享航次使用网目孔径300 μm的浮游生物网开展垂直拖网: 当水深超过200 m时, 自200 m深拖至表层; 水深不足200 m时, 则从底至表全水柱垂直拖网。南海东北部-吕宋海峡航次则采用网目孔径300 μm的Maxi型多联网, 进行浮游动物分层采样, 设置9个标准水层(0–25 m、25–50 m、50–100 m、100–200 m、200–300 m、300–400 m、400–600 m、600–800 m和800–1,000 m)。所有航次使用的浮游生物网网口均配备流量计, 以精确计算滤水体积。

为防止传统福尔马林固定方法对翼足类外壳造成的腐蚀, 样品使用5%硼酸钠中和的福尔马林溶液固定保存(Heyman, 1981)。在实验室内, 标本使用Nikon SMZ18体视显微镜进行形态学观察和拍照, 参照张福绥(1964)、van der Spoel (1976)、Boltovskoy等(1999)以及World Register of Marine Species网站进行核对勘误, 将种类尽量鉴定到种。对于样品的外壳、齿舌等硬质材料, 经解剖分离、超声清洗、乙醇脱水和干燥喷金等一系列处理, 最终使用Hitachi S-3400N扫描电镜观察拍照(Bednaršek et al., 2012)。

基于优势度指数(Y)确定优势种, 定义$Y \geq 0.02$的物种为优势种(徐兆礼和陈亚瞿, 1989)。群落多样性采用Shannon-Wiener多样性指数(H') (Shannon, 1948)和Pielou均匀度指数(J) (Whittaker, 1972)进行分析。计算公式如下:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \tag{1}$$

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i, P_i = \frac{n_i}{N} \tag{2}$$

$$J = \frac{H'}{H_{\max}}, H_{\max} = \ln S \tag{3}$$

表1 本研究各航次及调查海域信息

Table 1 Information of cruises and the surveyed sea areas in this study

航次名称 Cruise	采样日期 Sampling date	调查海域 Surveyed sea area	站位水深 Station water depth	采样方式 Sampling method	网目孔径 Mesh size
南海北部岛礁航次 Northern South China Sea islands and reefs cruise	2022.05.22–06.12	南海中西部及南海北部自粤东沿岸至台湾海峡南部的岛礁邻近水域(简称南海北部岛礁) Offshore waters of islands in the central-western and northern South China Sea, from the eastern Guangdong coast to the southern Taiwan Strait (abbreviated as northern South China Sea islands and reefs)	大部分站位不超过30 m Most stations shallower than 30 m	水平拖网 Horizontal trawl (0–5 m)	160 μm
南海南部岛礁航次 Southern South China Sea islands and reefs cruise	2023.05.22–06.13	南海西部及南沙群岛周边岛礁海域(简称南海南部岛礁) Offshore waters of islands in the western South China Sea and around the Nansha Islands (abbreviated as southern South China Sea islands and reefs)	大部分站位不超过30 m Most stations shallower than 30 m	水平拖网 Horizontal trawl (0–5 m)	500 μm
珠江口-南海西部共享航次 Pearl River Estuary-western South China Sea cruise	2023.10.05–10.28	珠江口、南海西北部陆架至西沙群岛海区(简称珠江口-南海西部陆架) Pearl River Estuary, northwestern South China Sea continental shelf to the Xisha Islands area (abbreviated as Pearl River Estuary-western South China Sea shelf)	从陆架区不足100 m延伸至大洋区超过1,000 m Ranging from less than 100 m on the shelf to over 1,000 m in the oceanic zone	垂直拖网(水深 > 200 m时, 从200 m拖至表层; 水深 < 200 m时, 从底至表层) Vertical trawl (from 200 m depth to surface when water depth > 200 m; from bottom to surface when water depth < 200 m)	300 μm
南海东北部-吕宋海峡航次 Northeastern South China Sea-Luzon Strait cruise	2022.09.05–09.24	南海中东部及巴士海峡以西海盆区域(简称南海东北部海盆) Central-eastern South China Sea and the basin area west of the Bashi Channel (abbreviated as northeastern South China Sea basin)	所有站位水深均超过1,000 m All stations deeper than 1,000 m	垂直连续分层拖网 Vertical stratified trawl (0–25 m, 25–50 m, 50–100 m, 100–200 m, 200–300 m, 300–400 m, 400–600 m, 600–800 m, 800–1,000 m)	300 μm

其中, n_i为第i种在调查区域内的个体数, N为调查区域内所有翼足类总个体数, f_i为第i种在各站位出现的频率。P_i为第i种的个体数与该站翼足类总个体数的比值, S为翼足类总种数。

2 结果与讨论

2.1 南海翼足类物种组成

本研究在南海共记录到翼足类26个物种(附录1, 附录2), 隶属于13科18属。其中, 笔帽螺属(*Creseis*)记录的种数最多, 为3种; 其次是长角螺属(*Clio*)、龟螺属(*Cavolinia*)、蝴蝶螺属(*Desmopterus*)、蜷螺属(*Limacina*)、皮鳃螺属(*Pneumoderma*)、隐棘厚唇螺属(*Telodiacria*)各有2种。其余11个属, 包括厚唇螺属(*Diacria*)、小龟螺属(*Diacavolinia*)、扁蜷螺属(*Heliconoides*)、玻杯螺属(*Hyalocylis*)、水肌螺属(*Hydromyles*)、背鳃螺属(*Notobranchaea*)、拟海若螺属(*Paraclione*)、长轴螺属(*Peracle*)、锥棒螺属(*Styliola*)、长吻螺属(*Cliopsis*)和扁齿螺属(*Thliptodon*), 均只记录到1种。与历史文献记录相比, 4种为中国海新记录种, 分别为优雅小龟螺(*Diacavolinia elegans*)、加氏蝴蝶螺(*Desmopterus gardineri*)、四褶背鳃螺(*Notobranchaea tetrabranchiata*)和克氏长吻螺(*Cliopsis krohnii*)。

从总体组成来看, 笔帽螺属、扁蜷螺属、蜷螺属和长轴螺属的多个物种在各调查区均有广泛分布, 而其他多数物种则表现出明显的区域分布特征, 如龟螺属的物种仅见于南海南部岛礁和珠江口-南海西部陆架, 长角螺属物种则仅记录于珠江口-南海西部陆架和南海东北部海盆。不同生态区的物种组成差异显著。珠江口-南海西部陆架记录的物种数最为丰富, 为22种, 其中6个物种仅出现于该区域: 驼龟螺(*Cavolinia gibbosa*)、优雅小龟螺、厚唇螺(*Diacria trispinosa*)、地中海皮鳃螺(*Pneumoderma mediterraneum*)、锥棒螺(*Styliola subula*)和克氏长吻螺。相比之下, 南海北部岛礁的物种组成最为简单, 仅发现6个物种, 且以广布性的种类为主, 物种多样性显著低于其他海域。

本研究调查范围广泛, 涵盖了岛礁、河口、陆架及海盆等关键生态区域, 环境异质性高, 不同生态区之间的物种组成差异显著。然而, 由于各海域在网孔孔径大小、采样深度及采样时间等方面存在差异, 导致不同区域间的翼足类群落难以直接比较。与南海历史文献记录相比, 本研究所记录的物种数量有所下降。这一差异可能源于以下几方面原因: 一是采样方法、时空尺度及物种鉴定技术的不一致; 二是翼足类本身数量稀少且呈斑块状分布, 部分历史记录种类在本调查中可能未能采集到; 三是部分历史记录物种存在同物异名问题, 需进行归并。此外, 本研究结果也暗示南海翼足类群落可能正经历明显的退化过程, 这一趋势很可能与近年来南海区域面临的气候变化和渔业活动加剧等环境压力密切相关(田思泉等, 2024)。例如, 水温上升、营养盐输入变化及栖息地扰动等因素, 可能共同改变了翼足类的生存环境, 进而影响其繁殖、发育与空间分布(Engström-Öst et al., 2019; Xiang et al., 2021)。

南海翼足类的物种数量高于邻近的东海和台湾海峡(徐兆礼, 2005; 胡剑等, 2008; 罗文增和劳柏瑄, 2016), 表现出更为显著的热带属性。与纬度相近的墨西哥湾相比, 尽管两地物种组成较为相似, 但南海的物种数相对较低, 这可能与两海域间不同的水动力环境有关(López-Arellanes et al., 2018)。同样, 南海翼足类的数量也低于开阔大洋, 这可能归因于其半封闭的海域特性导致水体交换能力受限, 从而在一定程度上阻碍了部分热带物种的自由迁入(Lemus-Santana et al., 2014; Janssen et al., 2019)。

2.2 南海翼足类优势种

南海不同生态区之间翼足类的优势种类组成存在差异(表2)。其中, 珠江口-南海西部陆架生态区的优势种数量最多, 达到7种。尽管采样网孔大小存在差异, 南海北部岛礁与南海南部岛礁区的优势种组成较为相似, 均仅包含笔帽螺属和(扁)蜷螺属的物种。而在南海东北部海盆区, 尖笔帽螺(*Creseis acicula*)和马蹄蜷螺(*Limacina trochiformis*)并未成为优势种, 取而代之的是泡蜷螺(*Limacina bulimoides*)和球形水肌螺(*Hydromyles globulosus*)。珠江口-南海西部陆架区的优势种组成介于岛礁区与南海东北部海盆区之间, 既保留了岛礁区常见的优势种, 也包含了海盆区的代表性种类——球形水肌螺和泡蜷螺。

尖笔帽螺与马蹄蜷螺是南海浅水区典型的广布种, 在南北部岛礁及陆架区均占据优势地位, 但

表2　各生态区翼足类优势种组成
Table 2　Composition of dominant species of pteropods in each ecological region

生态区 Ecological region	优势种 Dominant species
南海北部岛礁 Northern South China Sea islands and reefs	尖笔帽螺 *Creseis acicula* 胖螅螺 *Heliconoides inflatus* 马蹄螅螺 *Limacina trochiformis*
南海南部岛礁 Southern South China Sea islands and reefs	尖笔帽螺 *Creseis acicula* 锥笔帽螺 *Creseis conica* 芽笔帽螺 *Creseis virgula* 马蹄螅螺 *Limacina trochiformis*
珠江口-南海西部陆架 Pearl River Estuary-western South China Sea shelf	尖笔帽螺 *Creseis acicula* 锥笔帽螺 *Creseis conica* 芽笔帽螺 *Creseis virgula* 胖螅螺 *Heliconoides inflatus* 球形水肌螺 *Hydromyles globulosus* 泡螅螺 *Limacina bulimoides* 马蹄螅螺 *Limacina trochiformis*
南海东北部海盆 Northeastern South China Sea basin	锥笔帽螺 *Creseis conica* 芽笔帽螺 *Creseis virgula* 胖螅螺 *Heliconoides inflatus* 球形水肌螺 *Hydromyles globulosus* 泡螅螺 *Limacina bulimoides*

在深水海盆区未成为优势种。这一结果与已有研究相符, 两者通常在生产力较高、环境波动剧烈的近岸海域繁盛, 且多栖息于海洋表层(López-Arellanes et al., 2018; Liang et al., 2025)。本研究表明, 这两个物种不仅在近岸区域优势显著, 在岛礁浅水区也分布广泛, 进一步反映出其对不同环境的高度适应性。相比之下, 锥笔帽螺(*Creseis conica*)、胖螅螺(*Heliconoides inflatus*)和芽笔帽螺(*Creseis virgula*)的分布则更倾向于深水大洋环境。已有研究指出它们偏好高温高盐的水体条件(Bé & Gilmer, 1977; 罗文增和劳柏瑄, 2016; Liang et al., 2025)。这些物种不仅分布于生产力较高的北部岛礁浅水区, 也广泛存在于环境复杂的陆架区, 甚至在营养贫瘠的深水海盆区仍能保持优势地位。如此宽的生态幅表明它们对从近岸到大洋的多种环境均具有良好的适应能力。泡螅螺和球形水肌螺的分布则更为特化, 仅在较深的陆架区与海盆区成为优势种。戴燕玉(1995)曾记录泡螅螺的分布深度可达500 m; Rottman (1976)指出该物种对盐度极为敏感, 极少出现在低盐环境中; 而van der Spoel (1976)的记载显示, 球形水肌螺常在亚热带大洋区以较高丰度出现。这类分布模式表明, 这两者对寡营养的深水和大洋环境具有独特的生态适应策略。

2.3　南海翼足类新记录种

2.3.1　优雅小龟螺 *Diacavolinia elegans* van der Spoel, Bleeker & Kobayasi, 1993 (图1)

Diacavolinia elegans van der Spoel, Bleeker & Kobayasi, 1993: 136, pl. 1, fig. 11.

分类地位: 腹足纲 Gastropoda Cuvier, 1795; 翼足目 Pteropoda Cuvier, 1804; 龟螺科 Cavoliniidae J. E. Gray, 1850; 小龟螺属 *Diacavolinia* van der Spoel, 1987。

观察标本: SCSMBC240415, 1个个体, 2023年珠江口-南海西部共享航次, 112.92° E, 15.00° N, 水深0–200 m, 液氮保存。

形态特征: 壳质透明, 呈淡紫色, 整体略呈三角形。背部略为隆起, 中央背肋发达, 侧背肋次之, 未见外侧隆起结构。背唇喙部存在凹刻, 吻部短窄且中空, 但未形成明显沟槽。腹唇中等大小, 其中部具一明显凹陷; 腹肋发育相对较弱, 数量约20条。胚壳稍突出。侧棘呈钩状, 略向背方弯曲并朝侧向突出。唇瓣缺失, 唇肩较小; 壳口宽大, 背缘锐利, 腹缘略为增厚。

中文名来源: 中文名“优雅小龟螺”与拉丁种加词“elegans”相对应, 体现了该物种背唇优雅流畅的形态特征, 呈现典型的抛物线形。

地理分布: 印度-太平洋海域、印度洋、大西洋、南海。

讨论: van der Spoel等(1993)基于细微的形态结构差异, 将原属于龟螺属的长吻龟螺(*Cavolinia longirostris*)拆分为22个物种和2个新型(forma), 并归入小龟螺属, 优雅小龟螺即为其中之一。与原始描述相比, 本研究所鉴定的样本在背唇喙部具有一明显凹刻, 而原始文献中并未提及该特征。然而, 根据原始文献所附检索表, 即便喙部有凹刻仍可检索至该种, 提示该特征可能并非其关键的鉴定依据。我国有关小龟螺属的形态学研究目前仅见于张福绥(1964)对其中两个物种的报道。经对其形态图版重新研判, 其中一种为角长吻龟螺(*Diacavolinia angulata*), 其外壳具有显著的隆起结构, 据此可与优雅小龟螺相区分; 另一种则因缺少腹面图, 无法观察到唇肩这一重要鉴别特征, 故难以确定其具体归属。近年来, 不少研究尝试利用分子手段验证van der Spoel等(1993)对该属的分类体系。有观点指出,

优雅小龟螺可能与该属其他若干种类实为同一物种(Maas et al., 2013; 李海涛等, 2020)。然而, 由于相关研究数量有限且尚未形成系统, 目前这些验证仍处于初步探索阶段。

本种为全球性热带-亚热带广布种。在太平洋, 其分布范围涵盖印度尼西亚海域及其东部太平洋(van der Spoel et al., 1993); 在大西洋, 则主要分布于墨西哥湾以及西大西洋的亚热带开阔水域(van der Spoel et al., 1993; Shedler et al., 2023)。这样的分布格局反映出该物种对温暖海水环境的良好适应性。

2.3.2 加氏蝴蝶螺 *Desmopterus gardineri* Tesch, 1910 (图2)

Desmopterus gardineri Tesch, 1910: 168, pl. 12, figs. 1–2.

分类地位: 腹足纲 Gastropoda Cuvier, 1795; 翼足目 Pteropoda Cuvier, 1804; 蝴蝶螺科 Desmopteridae Chun, 1889; 蝴蝶螺属 *Desmopterus* Chun, 1889。

观察标本: SCSMBC240416, 1个个体, 2022年南海东北部-吕宋海峡航次, 115.00° E, 18.00° N, 水深800–1,000 m, 甲醛保存。

形态特征: 该物种无外壳及外套腔。身体呈圆柱形, 前部粗大, 后部渐细。头部向腹面弯曲形成短吻, 与椭圆形游泳鳍所在平面近乎垂直。鳍盘上的肌束呈垂直交叉排列, 分布稀疏, 界限清晰。

中文名来源: 中文名“加氏”取自本物种发现者J. Stanley Gardiner教授的姓氏, 以致敬其贡献。

地理分布: 印度洋、大西洋、南海。

讨论: 目前该物种仅发现1个标本。从标本的保存状况来看, 存在一定程度的腐烂, 导致部分形态结构受损。加氏蝴蝶螺的原始描述中曾提及表皮具红色腺体(Tesch, 1910), 但在本研究观察的标本中未发现该特征。尽管如此, 根据其肌带的数量与分隔特征, 仍可明确判断该标本与常见种蝴蝶螺(*Desmopterus papilio*) (图2d)存在显著差异: 前者肌束数量较少, 形态较为宽大且轮廓清晰; 而蝴蝶螺的肌带则更为密集, 并在游泳鳍的中央区域表现出明显的融合趋势。

该物种曾一度被视为印度洋的特有物种, 广泛分布于整个海域(van der Spoel, 1976)。然而, 其后在大西洋也有记录(Wormelle, 1962)。与蝴蝶螺相比, 该物种的数量相对较少, 且分布呈现出更为显著的斑块化特征(Sakthivel, 1972)。

2.3.3 四褶背鳃螺 *Notobranchaea tetrabranchiata* Bonnevie, 1913 (图3)

Notobranchaea tetrabranchiata Bonnevie, 1913: 63, figs. 52–55, pl. 8, figs. 61–62; Pruvot-fol, 1926: 34, pl. 1, figs. 14–15, pl. 3, fig. 85; van der Spoel & Iersel, 1985: 31, fig. 1.

Prionoglossa tetrabranchiata (Bonnevie, 1913): Tesch, 1950: 27, 42, figs. 15–16, 26; van der Spoel, 1970: 119.

分类地位: 腹足纲 Gastropoda Cuvier, 1795; 翼足目 Pteropoda Cuvier, 1804; 背鳃螺科 Notobranchaeidae Pelseneer, 1886; 背鳃螺属 *Notobranchaea* Pelseneer, 1886。

观察标本: SCSMBC240417, 1个个体, 2022年南海东北部-吕宋海峡航次, 117.00° E, 18.75° N, 水深800–1,000 m, 甲醛保存。

形态特征: 头部短厚, 与躯干直接相连, 无明显颈部, 其内部可见两对退化的口锥。侧足叶水平着生于颈部区域; 后足叶狭窄, 末端尖锐。身体呈半透明状, 内脏结构可透过体壁清晰可见, 内脏团未完全延伸至尾部末端。翅前缘具暗绿色色素沉积, 基部较窄, 末端宽大呈截平状。侧鳃缺失, 尾鳃具4道波浪状褶皱, 表面无附属结构, 各褶皱在末端汇合并形成结节。齿舌包含约30列横排齿片。中央齿呈半月形, 表面具齿状突起。每侧约具5枚侧齿。钩短而粗壮, 呈弯曲状, 末端锐利。

中文名来源: 中文名“四褶”对应其种加词“*tetrabranchiata*”, 源于该物种最显著的鉴别特征——其尾鳃具4道褶皱。

地理分布: 印度洋、大西洋、西太平洋、南海。

讨论: 本种最关键的鉴别特征在于其中央齿呈锯齿状, 这一点可与中国近海分布的背鳃螺(*Notobranchaea macdonaldi*)明确区分, 后者的中央齿为单尖型(张福绥, 1964)。此外, 本种尾鳃具有4个褶皱, 这一特征可作为与同属其他物种相区别的重要形态依据。van der Spoel和Iersel (1985)曾指出该种并非完全缺失口锥, 而是具有两对明显退化的口锥结构, 认为以口锥有无作为区分*Prionoglossa*与*Notobranchaea*属的关键鉴别特征并不可靠, 因

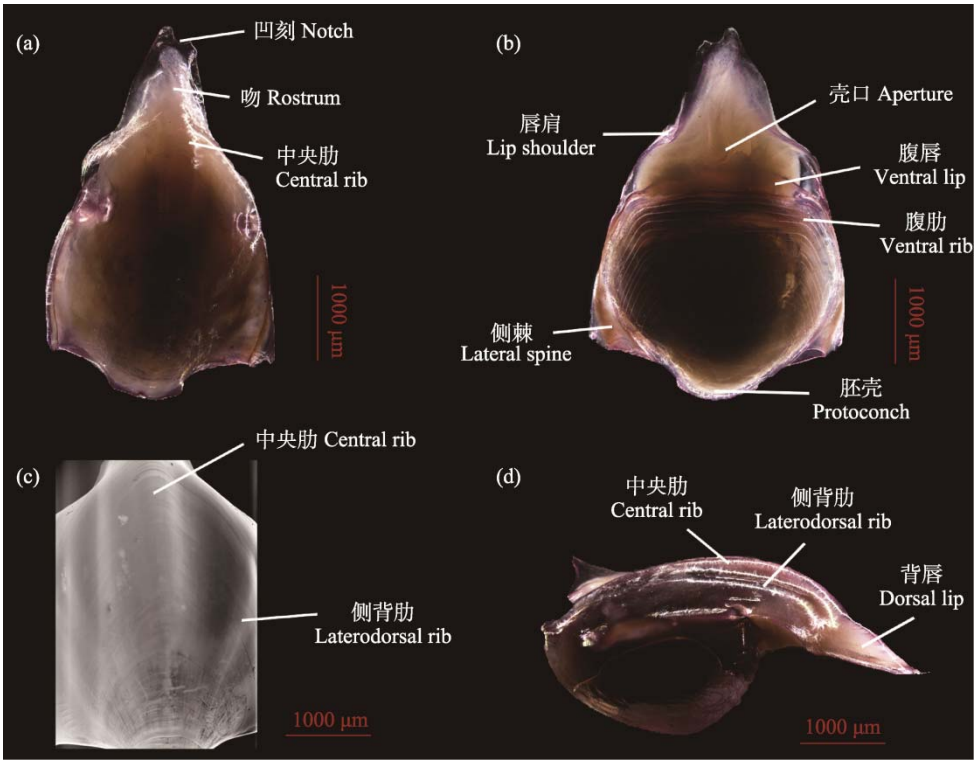


图1 优雅小龟螺的形态结构。**(a)**背面观; **(b)**腹面观; **(c)**背面的扫描电镜图; **(d)**侧面观。
Fig. 1 The morphological structure of *Diacavolinia elegans.* (a) Dorsal view; (b) Ventral view; (c) Scanning electron micrograph of the dorsal side; (d) Lateral view.

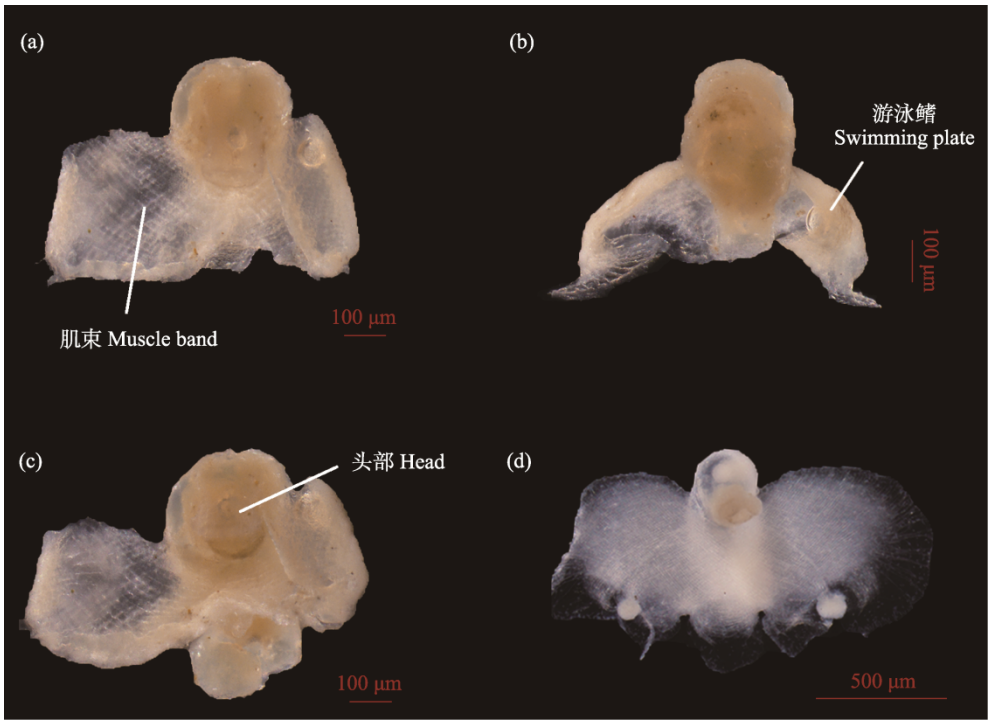


图2 加氏蝴蝶螺的形态结构。**(a)**腹面观; **(b)**顶面观; **(c)**底面观; **(d)**蝴蝶螺的形态图。
Fig. 2 The morphological structure of *Desmopterus gardineri.* (a) Ventral view; (b) Apical view; (c) Basal view; (d) Morphological illustration of *Desmopterus papilio*.

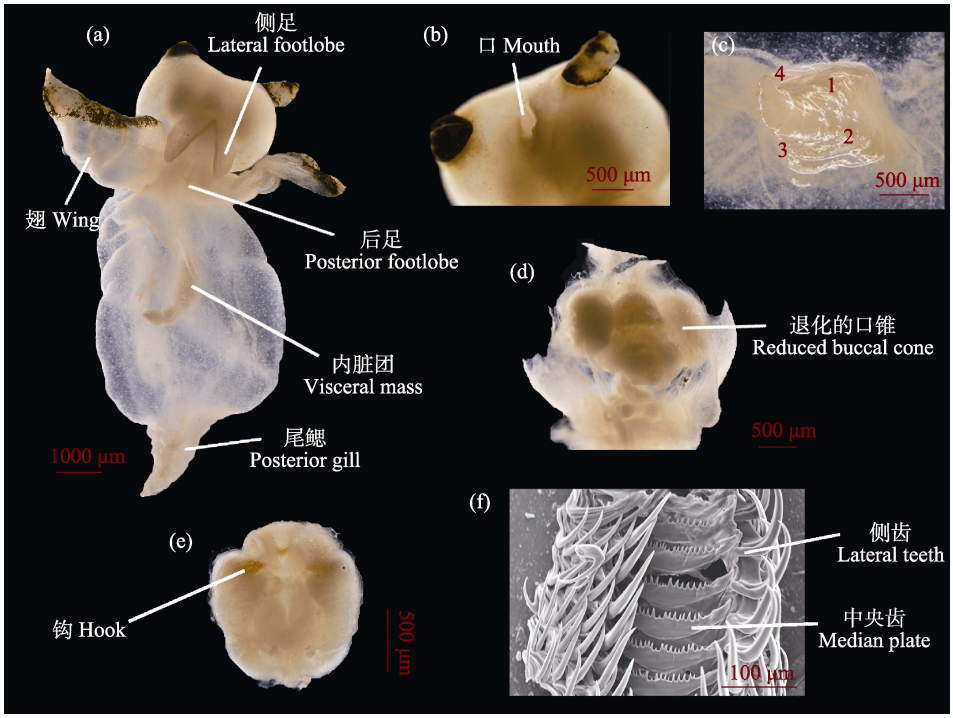


图3　四褶背鳃螺的形态结构。(a)正面观; (b)头部; (c)尾鳃, 数字代表褶皱数; (d)退化的口锥; (e)口球和钩囊; (f)齿舌。
Fig. 3　The morphological structure of *Notobranchaea tetrabranchiata*. (a) Frontal view; (b) Head; (c) Posterior gill, with numbers indicating the number of crests; (d) Reduced buccal cone; (e) Buccal mass and hook sac; (f) Radula.

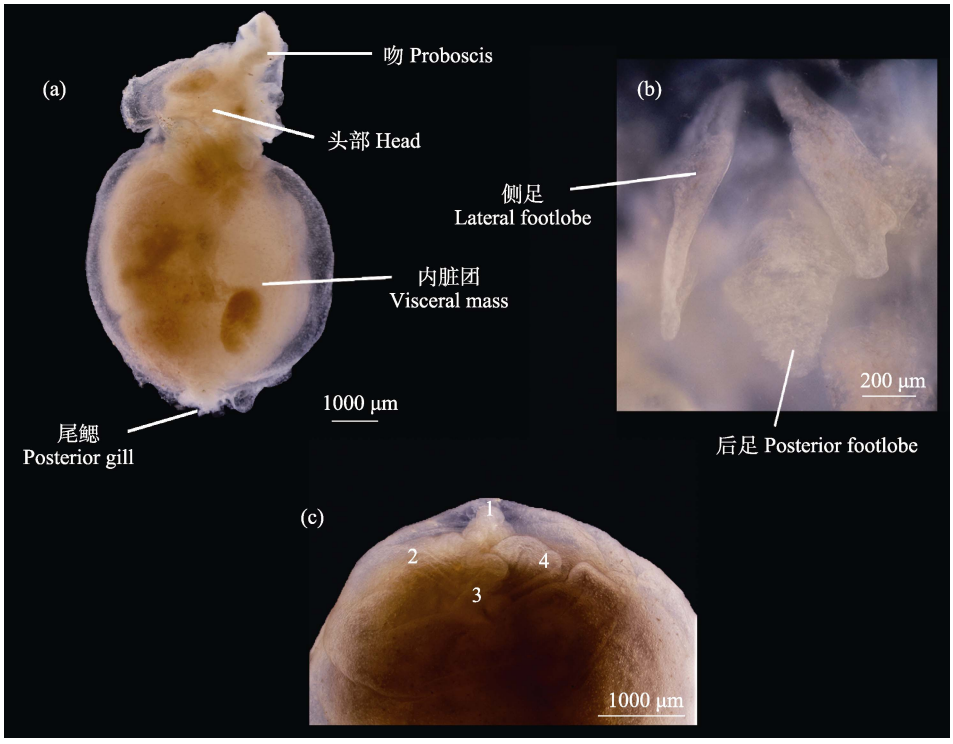


图4　克氏长吻螺的形态结构。(a)正面观; (b)侧足和后足; (c)尾鳃, 数字代表褶皱数。
Fig. 4　The morphological structure of *Cliopsis krohnii*. (a) Frontal view; (b) Lateral and posterior footlobe; (c) Posterior gill, numbers indicate the number of crests.

此对*Prionoglossa*属的有效性提出质疑, 并将该种重新归入*Notobranchaea*属。本研究观察的标本中, 两对口锥均已退化为小球状结构, 进一步支持了van der Spoel和Iersel (1985)的观点。

该种的现有记录较为稀少, 主要分布于大西洋、印度洋及西太平洋(van der Spoel, 1976), 同时在60° N附近以及南大洋等冷水海域也有零星记录(van der Spoel, 1973; Ballesteros et al., 2025)。

2.3.4 克氏长吻螺 *Cliopsis krohnii* Troschel, 1854 (图4)

Cliopsis krohnii Troschel, 1854: 222, pl. 10, figs. 1–12; Tesch, 1950: 10, figs. 2A–C.

Cliopsis krohni [sic]: Massy, 1917: 236; Morton, 1957: 3, fig. 4.

分类地位: 腹足纲 Gastropoda Cuvier, 1795; 翼足目 Pteropoda Cuvier, 1804; 长吻螺科 Cliopsidae O. G. Costa, 1873; 长吻螺属 *Cliopsis* Troschel, 1854。

观察标本: SCSMBC240417, 1个个体, 2023年珠江口-南海西部共享航次, 113.83° E, 19.50° N, 水深0–200 m, 液氮保存。

形态特征: 体表透明, 身体呈椭圆形, 后部接近球形, 头部相对较小。侧足叶宽大, 后足叶较小, 不具吸盘腕或口锥结构, 吻部较为细长。内脏团呈黄褐色, 几乎充满整个体腔。无侧鳃, 尾鳃具4条短而细的辐射状褶皱, 无边缘附属结构。鳃周及身体中部散布有深色色素细胞。

中文名来源: 中文名“克氏”取自德国动物学家August David Krohn的姓氏, 以致敬其贡献。

地理分布: 地中海、太平洋、大西洋、南海。

讨论: 本种最显著的特征是吻部极长, 据van der Spoel (1976)观察, 吻部在翻出时可达体长的两倍甚至更长。该种曾依据尾鳃的褶皱数量及是否具有边缘附属物被划分为3个形态型(morpha), 但后续研究将其归并为单一形态的物种。该物种广泛分布于全球温带和热带海域, 在地中海尤为常见, 然而在印度洋的记录则较为有限(Barnich & Uthe, 1998; Boltovskoy et al., 1999; Suzuki, 2005; López-Cabello et al., 2024)。

2.4 南海翼足类多样性分布

2.4.1 岛礁区域翼足类多样性分布

南海北部岛礁翼足类的丰度、多样性指数和均匀度指数在表层分布上表现出明显的空间异质性。物种丰度在台湾海峡南部最高, 达1,157.08 ind./100 m^3, 而在其他区域普遍偏低。与丰度分布格局相反, Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数的高值区主要分布于离岸较远的中部岛礁; 而靠近台湾海峡、离岸较近的岛礁区域, 其多样性和均匀度指数则相对较低。这一分布特征表明, 近岸岛礁区虽然丰度较高, 但物种组成相对单一; 而远海岛礁尽管丰度较低, 却具有更高的物种多样性和更为均匀、稳定的群落结构。

南海南部岛礁海域的表层翼足类丰度存在两个明显的高值区: 一个是位于16° N附近, 丰度可达410.78 ind./100 m^3; 另一个是位于10° N附近, 丰度可达422.14 ind./100 m^3。整体而言, Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数的分布趋势较为一致, 其高值区主要集中在9.5°–10° N的纬度区间内。值得注意的是, 上述两个丰度高值区均对应着极低的多样性指数与均匀度指数。这暗示了在这些高生产力区域, 极少数优势物种占据了绝对主导地位, 导致群落结构呈现出高度单一化的特征。

2.4.2 河口-陆架区翼足类多样性分布

在珠江口-南海西部陆架海域, 翼足类的丰度高值区主要分布于珠江口西侧及海南岛南部, 丰度分别高达1,074.29 ind./100 m^3和587.00 ind./100 m^3。其余区域丰度相对较低且分布较为均匀。相比之下, Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数的高值区主要集中分布于16°–20° N之间的开阔水域, 呈现出明显的斑块状分布格局。

2.4.3 深海海盆翼足类多样性分布

在南海东北部海盆, 翼足类的丰度及群落多样性指数在垂直方向上表现出明显的分层特征(表3)。总体来看, 丰度、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数均随深度增加而呈现降低的趋势。丰度的高值区主要分布于200 m以浅的上层水体, 最大平均值出现在0–25 m水层, 达93.58 ind./100 m^3; 而在200 m以下, 翼足类丰度急剧下降并维持在极低水平。与丰度变化趋势相似, Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数在0–200 m的表层和次表层保持较高水平, 反映出真光层内物种组成丰富且分布均匀; 而在200 m以深的水体中, 随着物种数减少, 多样性指数和均匀度

表3　南海东北部海盆翼足类丰度、Shannon-Wiener多样性指数及Pielou均匀度指数的垂直分布

Table 3　Vertical distribution of pteropod abundance, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index in the northeastern South China Sea basin

水层 Layer (m)	丰度 Abundance (ind./100 m^3)			Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index			Pielou均匀度指数 Pielou evenness index		
	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum
0–25	93.58	169.23	23.08	2.00	2.74	1.46	0.89	1.00	0.81
25–50	61.27	93.33	26.67	1.93	2.45	1.15	0.90	0.98	0.72
50–100	75.70	241.94	22.58	2.11	2.99	0.87	0.82	0.98	0.55
100–200	11.04	20.69	0.00	1.47	2.16	0.00	0.76	0.95	0.00
200–300	5.45	29.11	0.00	0.58	1.58	0.00	0.43	1.00	0.00
300–400	4.32	19.67	1.18	0.60	2.22	0.00	0.36	1.00	0.00
400–600	2.25	4.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
600–800	0.39	1.53	0.00	0.13	1.00	0.00	0.13	1.00	0.00
800–1,000	0.29	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

指数显著下降, 部分深层站位甚至降至零, 表明深海环境中翼足类群落结构趋于单一化。

从水平分布格局来看, 南海翼足类在岛礁区与陆架区均呈现出近岸丰度高而多样性低、远海丰度低而多样性高的特征。这样的分布模式在热带和亚热带海域已被多次观察到(胡剑等, 2008; Koppelmann et al., 2013; López-Arellanes et al., 2018)。近岸海域受陆源径流和沿岸流系影响, 营养盐输入较多, 初级生产力较高, 这种富营养化环境对物种组成具有明显的筛选作用。在食物资源充足的条件下, 少数适应性强、具机会主义生存策略的种类能够迅速增殖, 形成数量上的绝对优势, 从而导致群落多样性降低、均匀度下降(Liang et al., 2025)。相比之下, 开阔水域尽管翼足类丰度较低, 但群落结构更为多样和稳定, 这是由于多数热带翼足类属于暖水种, 更适应高温高盐的大洋环境(Lalli & Gilmer, 1989)。此外, 开阔水域的环境通常营养贫乏, 生境相对稳定, 有利于更多物种共存(Hutchinson, 1961)。值得注意的是, 在南海南部岛礁, 大部分区域翼足类丰度较低, 呈现出典型的热带大洋贫营养群落特征; 但局部区域出现了显著的丰度高值中心, 反映出岛屿质量效应所带来的生产力提升, 该效应的发生具有明显的条件依赖性(de Santana Campelo et al., 2019)。

在垂直尺度上, 翼足类主要聚集于表层水体, 深层则较为稀少, 这与戴燕玉(1995)在南海中部的研究结果基本一致。这一分布模式主要受食物供给的控制, 大多数有壳翼足类以浮游植物和微型浮游动物为食(Lalli & Gilmer, 1989), 其垂直分布常与叶绿素*a*浓度密切耦合。随着水深增加, 温度和溶解氧含量也逐渐降低, 抑制了多数暖水性翼足类的代谢与繁殖能力(Maas et al., 2016; Engström-Öst et al., 2019), 温跃层的存在进一步强化了这一限制。此外, 许多翼足类的外壳成分为文石。在深海环境中, 随着压力上升和pH值降低, 海水的文石饱和度下降。当水深超过文石饱和深度时, 其碳酸钙外壳面临溶解风险(Bednaršek et al., 2017), 这构成了限制翼足类向深水扩散的关键化学障碍。

致谢: 本研究得到国家动物标本资源库的资助。感谢柯志新研究员提供南海东北部-吕宋海峡航次的浮游动物样品; 感谢李刚研究员提供南海南部岛礁和南海北部岛礁航次的样品; 同时感谢陈志云正高级工程师在论文撰写过程中给予的悉心指导。谨致谢忱。

ORCID

李开枝 https://orcid.org/0000-0003-2073-8988
谭烨辉 https://orcid.org/0000-0002-6378-2156

参考文献

Ballesteros M, Hopkins A, Salicrú M, Nimbs MJ (2025) Heterobranch Sea Slugs (Mollusca, Gastropoda) from the Southern Ocean: Biodiversity and Taxonomy. Diversity, 17, 330.

Barnich R, Uthe D (1998) The Gymnosomata (Gastropoda: Opisthobranchia) in the plankton of the French Mediterranean coast. Vie et Milieu, 48, 15–24.

Bé A, Gilmer R (1977) A zoogeographic and taxonomic review of euthecosomatous Pteropoda. In: Oceanic Micropaleontology (ed. Ramsay ATS), pp. 733–808. Academic Press, London.

Bednaršek N, Feely RA, Tolimieri N, Hermann AJ, Siedlecki SA, Waldbusser GG, McElhany P, Alin SR, Klinger T, Moore-Maley B, Pörtner HO (2017) Exposure history determines pteropod vulnerability to ocean acidification along the US West Coast. Scientific Reports, 7, 4526.

Bednaršek N, Harvey CJ, Kaplan IC, Feely RA, Možina J (2016) Pteropods on the edge: Cumulative effects of ocean acidification, warming, and deoxygenation. Progress in Oceanography, 145, 1–24.

Bednaršek N, Naish KA, Feely RA, Hauri C, Kimoto K, Hermann AJ, Michel C, Niemi A, Pilcher D (2021) Integrated assessment of ocean acidification risks to pteropods in the northern high latitudes: Regional comparison of exposure, sensitivity and adaptive capacity. Frontiers in Marine Science, 8, 671497.

Bednaršek N, Tarling GA, Bakker DC, Fielding S, Cohen A, Kuzirian A, McCorkle D, Lézé B, Montagna R (2012) Description and quantification of pteropod shell dissolution: A sensitive bioindicator of ocean acidification. Global Change Biology, 18, 2378–2388.

Boltovskoy D, Dadon JR, van der Spoel S (1999) Pteropoda. In: South Atlantic Zooplankton (ed. Boltovskoy D), pp. 649–706. Backhuys Publishers, Leiden.

Choo LQ, Bal TMP, Goetze E, Peijnenburg KTCA (2021) Oceanic dispersal barriers in a holoplanktonic gastropod. Journal of Evolutionary Biology, 34, 224–240.

Dai YY (1995) A preliminary study on pteropods and heteropods in central South China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 17(6), 111–116. (in Chinese) [戴燕玉 (1995) 南海中部翼足类和异足类生态的初步研究. 海洋学报, 17(6), 111–116.]

de Santana Campelo RP, Bonou FK, de Melo M Jr, Diaz XFG, Bezerra LEA, Neumann-Leitão S (2019) Zooplankton biomass around marine protected islands in the tropical Atlantic Ocean. Journal of Sea Research, 154, 101810.

Engström-Öst J, Glippa O, Feely RA, Kanerva M, Keister JE, Alin SR, Carter BR, McLaskey AK, Vuori KA, Bednaršek N (2019) Eco-physiological responses of copepods and pteropods to ocean warming and acidification. Scientific Reports, 9, 4748.

Heyman RP (1981) Narcotisation, fixation and preservation experiments with marine zooplankton. Verslagen en Technische gegevens, 28, 1–36.

Hu J, Xu ZL, Zhu DD (2008) Seasonal changes of ecological characteristics of pelagic mollusc in Yangtze River estuary. Journal of Fishery Sciences of China, 15, 976–983. (in Chinese with English abstract) [胡剑, 徐兆礼, 朱德弟 (2008) 长江口海域浮游软体动物生态特征的季节变化. 中国水产科学, 15, 976–983.]

Huang QZ, Wang WZ, Li YS, Li CW, Mao M (1992) General situation of the current and eddy in the South China Sea. Advances in Earth Science, 7(5), 1–9. (in Chinese with English abstract) [黄企洲, 王文质, 李毓湘, 李志伟, 毛明 (1992) 南海海流和涡旋概况. 地球科学进展, 7(5), 1–9.]

Huang ZG (2008) Marine Species and Their Distribution in China. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [黄宗国 (2008) 中国海洋生物种类与分布. 海洋出版社, 北京.]

Huang ZG, Lin M (2012) An Illustrated Guide to Species in China's Seas. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [黄宗国, 林茂 (2012) 中国海洋生物图集. 海洋出版社, 北京.]

Hutchinson GE (1961) The paradox of the plankton. The American Naturalist, 95, 137–145.

Janssen AW, Bush SL, Bednaršek N (2019) The shelled pteropods of the northeast Pacific Ocean (Mollusca: Heterobranchia, Pteropoda). Zoosymposia, 13, 305–346.

Koppelmann R, Kullmann B, Lahajnar N, Martin B, Mohrholz V (2013) Onshore-offshore distribution of Thecosomata (Gastropoda) in the Benguela Current upwelling region off Namibia: Species diversity and trophic position. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 93, 1625–1640.

Lalli CM, Gilmer RW (1989) Pelagic Snails: The Biology of Holoplanktonic Gastropod Mollusks. Stanford University Press, Redwood City.

Lemus-Santana E, Sanvicente-Anorve L, Hermoso-Salazar M, Flores-Coto C (2014) The holoplanktonic Mollusca from the southern Gulf of Mexico. Part 2: Pteropods. Cahiers de Biologie Marine, 55, 241–258.

Li HT, He J, Jiang CC, Chen ZY, Zhou P (2020) Taxonomy and DNA barcoding in genera *Cavolinia* and *Diacavolinia* from the Indian Ocean and Northwest Pacific Ocean. Haiyang Xuebao, 42, 79–86. (in Chinese with English abstract) [李海涛, 何静, 姜重臣, 陈志云, 周鹏 (2020) 印度洋、西北太平洋龟螺属和小龟螺属种类的分类及DNA条形码鉴定. 海洋学报, 42, 79–86.]

Liang JC, Liu Y, Li KZ, Tan YH, Liu JX, Xiong PL, Zhong Y (2025) Spatio-temporal patterns of holoplanktonic mollusc assemblages and indicator species of hydrodynamic conditions in the northwestern South China Sea. Ecological Informatics, 90, 103206.

Liu RY (2008) Checklist of Marine Biota of China Seas. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘瑞玉 (2008) 中国海洋生物名录. 科学出版社, 北京.]

Lo WT, Lau BS (2016) Seasonal dynamics of planktonic pteropods in the Taiwan Strait, western North Pacific Ocean. Biodiversity Science, 24, 757–766. (in Chinese with English abstract) [罗文增, 劳柏瑄 (2016) 台湾海峡浮游翼足类群聚之季节动态. 生物多样性, 24, 757–766.]

López-Arellanes H, Funes-Rodríguez R, Flores-Coto C, Zavala-García F, Espinosa-Fuentes ML (2018) Comparison of pteropod assemblages and their relationship with

environmental variables in the southern Gulf of Mexico. Journal of Molluscan Studies, 84, 386–396.

López-Cabello Z, Coria-Monter E, Monreal-Gómez MA, Salas-de-León DA, Durán-Campos E, Gracia A (2024) Four new records of gymnosome pteropods (Pteropoda, Gymnosomata) in the Campeche Canyon, southern Gulf of Mexico. Check List, 20, 233–241.

Maas AE, Blanco-Bercial L, Lawson GL (2013) Reexamination of the species assignment of *Diacavolinia* pteropods using DNA barcoding. PLoS ONE, 8, e53889.

Maas AE, Lawson GL, Wang ZA (2016) The metabolic response of thecosome pteropods from the North Atlantic and North Pacific Oceans to high CO_2 and low O_2. Biogeosciences, 13, 6191–6210.

Ng PKL, Tan KS (2000) The state of marine biodiversity in the South China Sea. The Raffles Bulletin of Zoology, 8 (Suppl.), 3–7.

Rottman M (1976) Euthecosomatous pteropods (Mollusca) in the Gulf of Thailand and the South China Sea: Seasonal distribution and species associations. Naga Report, 4, Part 6, 1–117.

Sakthivel M (1972) Studies on *Desmopterus* Chun 1889 species in the Indian Ocean. “Meteor” Forschungsergebnisse, Reihe D: Biologie, 10, 46–57.

Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27, 379–423.

Shedler S, Seibel B, Vecchione M, Griffin D, Judkins H (2023) Abundance and distribution of large calcareous thecosome pteropods in the northern Gulf of Mexico. American Malacological Bulletin, 39, 8–18.

Shu YQ, Wang Q, Zu TT (2018) Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea. Science China Earth Sciences, 61, 560–571.

Suzuki A (2005) A new record of *Cliopsis krohnii* (Gastropoda: Gymnosomata: Cliopsidae) on the coast of Utro, Hokkaido, in the Sea of Okhotsk. Chiribotan, 35, 130–131.

Tesch JJ (1910) Pteropoda and Heteropoda. Transactions of the Linnean Society of London 2nd Series: Zoology, 14, 165–189.

Tian SQ, Liu XX, Hua CX, Wang Y, Du HY (2024) Fishery resources status and their management challenges in the South China Sea. Journal of Shanghai Ocean University, 33, 786–798. (in Chinese with English abstract) [田思泉, 柳晓雪, 花传祥, 王寅, 杜涣洋 (2024) 南海渔业资源状况及其管理挑战. 上海海洋大学学报, 33, 786–798.]

van der Spoel S (1973) *Pneumodermopsis teschi* n. sp., and notes on some other Pteropoda of the “Thor” Expeditions 1903–1910 (Gastropoda). Bulletin Zoologisch Museum, 3, 53–58.

van der Spoel S (1976) Pseudothecosomata, Gymnosomata and Heteropoda (Gastropoda). Bohn, Scheltema & Holkema, Utrecht.

van der Spoel S, Bleeke J, Kobayasi H (1993) From *Cavolinia longirostris* to twenty-four *Diacavolinia* taxa, with a phylogenetic discussion (Mollusca, Gastropoda). Bijdragen tot de Dierkunde, 62, 127–166.

van der Spoel S, Iersel P (1985) Note on the taxonomy of the family Notobranchaeidae and description of *Notobranchaea bleekerae* n. sp., a species new to science (Gastropoda, Pteropoda). Basteria, 49, 29–36.

Whittaker RH (1972) Evolution and measurement of species diversity. Taxon, 21, 213–251.

Wormelle RL (1962) A survey of the standing crop of plankton of the Florida Current. VI. A study of the distribution of the pteropods of the Florida Current. Bulletin of Marine Science, 12, 95–136.

Xiang CH, Ke ZX, Li KZ, Liu JX, Zhou LB, Lian XP, Tan YH (2021) Effects of terrestrial inputs and seawater intrusion on zooplankton community structure in Daya Bay, South China Sea. Marine Pollution Bulletin, 167, 112331.

Xu ZL (2005) Species composition and diversity of pteropods in the East China Sea. Biodiversity Science, 13, 168–173. (in Chinese with English abstract) [徐兆礼 (2005) 东海浮游翼足类(pteropods)种类组成和多样性研究. 生物多样性, 13, 168–173.]

Xu ZL, Chen YQ (1989) Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. Journal of Ecology, 8(4), 13–15. (in Chinese with English abstract) [徐兆礼, 陈亚瞿 (1989) 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系. 生态学杂志, 8(4), 13–15.]

Zhang FS (1964) The pelagic molluscs off the China coast. I. Classification of pteropods, heteropods, and pelagic snails. Studia Marina Sinica, 5, 125–226. (in Chinese with English abstract) [张福绥 (1964) 中国近海的浮游软体动物. I. 翼足类、异足类及海蜗牛类的分类研究. 海洋科学集刊, 5, 125–226.]

(责任编委: 董云伟　责任编辑: 闫文杰)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025487

附录1 中国海翼足类种类名录。1、2、3、4分别代表南海北部岛礁、南海南部岛礁、珠江口-南海西部陆架和南海东北部海盆。SCS、ECS、YS分别代表南海、东海和黄海。黑体标示物种代表本研究中实际记录到的种类; 非黑体名称则为历史文献中有记载, 但未在本研究中出现的种类。

Appendix 1 Checklist of pteropod species in the China Sea. 1, 2, 3, and 4 represent the northern South China Sea islands and reefs, the southern South China Sea islands and reefs, the Pearl River Estuary-western South China Sea continental shelf, and the northeastern South China Sea basin, respectively. SCS, ECS, and YS represent the South China Sea, the East China Sea, and the Yellow Sea, respectively. Species observed in this study are shown in bold; those not observed but with historical records are shown in regular font.

亚目 Suborder	科 Family	属 Genus	种 Species	中国海分布 Distribution in the China Sea	中国南海分布 Distribution in the South China Sea
真壳亚目 Euthecosomata	蜓螺科 Limacinidae	蜓螺属 *Limacina*	**泡蜓螺 *Limacina bulimoides* (A. d'Orbigny, 1835)**	南海、东海 SCS, ECS	2、3、4
			马蹄蜓螺 *Limacina trochiformis* (A. d'Orbigny, 1835)	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	1、2、3、4
	扁蜓螺科 Heliconoididae	扁蜓螺属 *Heliconoides*	**胖蜓螺 *Heliconoides inflatus* (A. d'Orbigny, 1835)**	南海、东海 SCS, ECS	1、2、3、4
	笔帽螺科 Creseidae	笔帽螺属 *Creseis*	**尖笔帽螺 *Creseis acicula* (Rang, 1828)**	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	1、2、3、4
			锥笔帽螺 *Creseis conica* Eschscholtz, 1829	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	1、2、3、4
			芽笔帽螺 *Creseis virgula* (Rang, 1828)	南海、东海 SCS, ECS	1、2、3、4
		锥棒螺属 *Styliola*	**锥棒螺 *Styliola subula* (Quoy & Gaimard, 1827)**	南海、东海 SCS, ECS	3
		钝笔帽螺属 *Boasia*	环箍笔帽螺 *Boasia chierchiae* (Boas, 1886)	南海、东海 SCS, ECS	–
	玻杯螺科 Hyalocylidae	玻杯螺属 *Hyalocylis*	**玻杯螺 *Hyalocylis striata* (Rang, 1828)**	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	2、3、4

亚目 Suborder	科 Family	属 Genus	种 Species	中国海分布 Distribution in the China Sea	中国南海分布 Distribution in the South China Sea
	蛆状螺科 Cuvierinidae	蛆状螺属 *Cuvierina*	蛆状螺 *Cuvierina columnella* (Rang, 1827)	南海、东海 SCS, ECS	–
	长角螺科 Cliidae	长角螺属 *Clio*	**袋长角螺 *Clio recurva* (Children, 1823)**	南海 SCS	3、4
			矛头长角螺 *Clio pyramidata* Linnaeus, 1767	南海、东海 SCS, ECS	3、4
			尖棘长角螺 *Clio cuspidata* (Bosc, 1801)	南海 SCS	–
	龟螺科 Cavoliniidae	厚唇螺属 *Diacria*	**厚唇螺 *Diacria trispinosa* (Blainville, 1821)**	南海、东海 SCS, ECS	3
		隐棘厚唇螺属 *Telodiacria*	**肋厚唇螺 *Telodiacria costata* (Pfeffer, 1879)**	南海、东海 SCS, ECS	2、3
			四齿厚唇螺 *Telodiacria quadridentata* (Blainville, 1821)	南海、东海 SCS, ECS	2、3、4
		龟螺属 *Cavolinia*	**龟螺 *Cavolinia tridentata* (Forsskål, 1775)**	南海、东海 SCS, ECS	2
			驼龟螺 *Cavolinia gibbosa* (A. d'Orbigny, 1835)	南海 SCS	3
			球龟螺 *Cavolinia globulosa* J. E. Gray, 1850	南海、东海 SCS, ECS	–
			钩龟螺 *Cavolinia uncinata* (A. d'Orbigny, 1835)	南海、东海 SCS, ECS	–

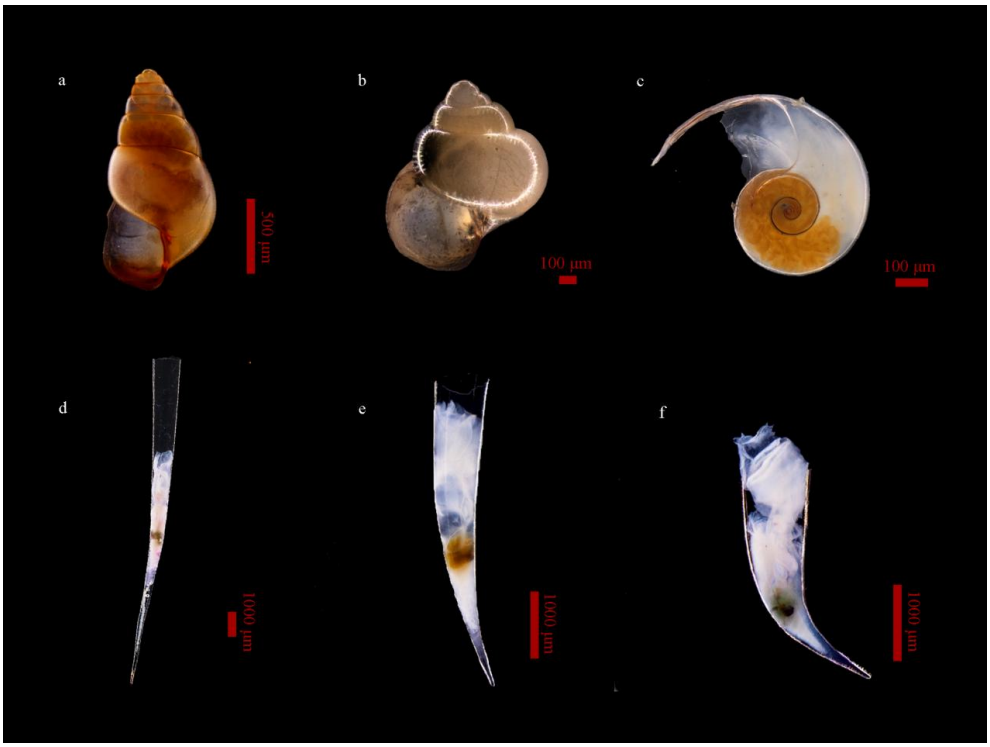
亚目 Suborder	科 Family	属 Genus	种 Species	中国海分布 Distribution in the China Sea	中国南海分布 Distribution in the South China Sea
			宽弯龟螺 *Cavolinia labiata* (A. d'Orbigny, 1835)	南海、东海 SCS, ECS	–
			Cavolinia inflexa (Lesueur, 1813)(未定中文名)	南海 SCS	–
		小龟螺属 *Diacavolinia*	**优雅小龟螺 *Diacavolinia elegans* van der Spoel, Bleeker & Kobayasi, 1993**	南海 SCS	3
			角长吻小龟螺 *Diacavolinia angulata* (Souleyet, 1852)	南海、东海 SCS, ECS	–
假壳亚目 Pseudothecosomata	长轴螺科 Peraclidae	长轴螺属 *Peracle*	**长轴螺 *Peracle reticulata* (A. d'Orbigny, 1835)**	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	1、2、3、4
	舴艋螺科 Cymbuliidae	舴艋螺属 *Cymbulia*	舴艋螺 *Cymbulia peronii* Blainville, 1818	南海、东海 SCS, ECS	–
			三窦舴艋螺 *Cymbulia tricavernosa* F.-S. Zhang, 1964	南海 SCS	–
		冕螺属 *Corolla*	冕螺 *Corolla ovata* (Quoy & Gaimard, 1833)	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	–
	蝴蝶螺科 Desmopteridae	蝴蝶螺属 *Desmopterus*	**蝴蝶螺 *Desmopterus papilio* Chun, 1889**	南海、东海 SCS, ECS	3、4
			加氏蝴蝶螺 *Desmopterus gardineri* Tesch, 1910	南海 SCS	4

亚目 Suborder	科 Family	属 Genus	种 Species	中国海分布 Distribution in the China Sea	中国南海分布 Distribution in the South China Sea
裸体亚目 Gymnosomata	皮鳃科 Pneumodermatidae	皮鳃螺属 *Pneumoderma*	**皮鳃螺 *Pneumoderma violaceum* A. d'Orbigny, 1836**	南海、东海 SCS, ECS	2、3、4
			地中海皮鳃螺 *Pneumoderma mediterraneum* van Beneden, 1838	南海 SCS	3
			异盘皮鳃螺 *Pneumoderma heterocotylum* Tesch, 1904	南海 SCS	–
		拟皮鳃螺属 *Pneumodermopsis*	拟皮鳃螺 *Pneumodermopsis ciliata* (Gegenbaur, 1855)	南海、东海 SCS, ECS	–
			寡齿拟皮鳃 *Pneumodermopsis paucidens* (Boas, 1886)	南海、东海 SCS, ECS	–
			多盘拟皮鳃螺 *Pneumodermopsis polycotyla* (Boas, 1886)	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	–
			大盘拟皮鳃螺 *Pneumodermopsis macrocotyla* F.-S. Zhang, 1964	南海 SCS	–
		无鳃螺属 *Abranchaea*	无鳃螺 *Abranchaea chinensis* F.-S. Zhang, 1964	东海、黄海 ECS, YS	–
	水肌螺科 Hydromylidae	水肌螺属 *Hydromyles*	**球形水肌螺 *Hydromyles globulosus* (Rang, 1825)**	南海、东海 SCS, ECS	2、3、4
	海若螺科 Clionidae	拟海若螺属 *Paraclione*	**拟海若螺 *Paraclione longicaudata* (Souleyet, 1852)**	南海、东海、黄海 SCS, ECS, YS	2、4

亚目 Suborder	科 Family	属 Genus	种 Species	中国海分布 Distribution in the China Sea	中国南海分布 Distribution in the South China Sea
		扁齿螺属 *Thliptodon*	**透明扁齿螺 *Thliptodon diaphanus* (Meisenheimer, 1902)**	南海、东海 SCS, ECS	3、4
	背鳃螺科 Notobranchaeidae	背鳃螺属 *Notobranchaea*	**四褶背鳃螺 *Notobranchaea tetrabranchiata* Bonnevie, 1913**	南海 SCS	4
			背鳃螺 *Notobranchaea macdonaldi* Pelseneer, 1886	南海、东海 SCS, ECS	–
	长吻螺科 Cliopsidae	长吻螺属 *Cliopsis*	**克氏长吻螺 *Cliopsis krohnii* Troschel, 1854**	南海 SCS	3

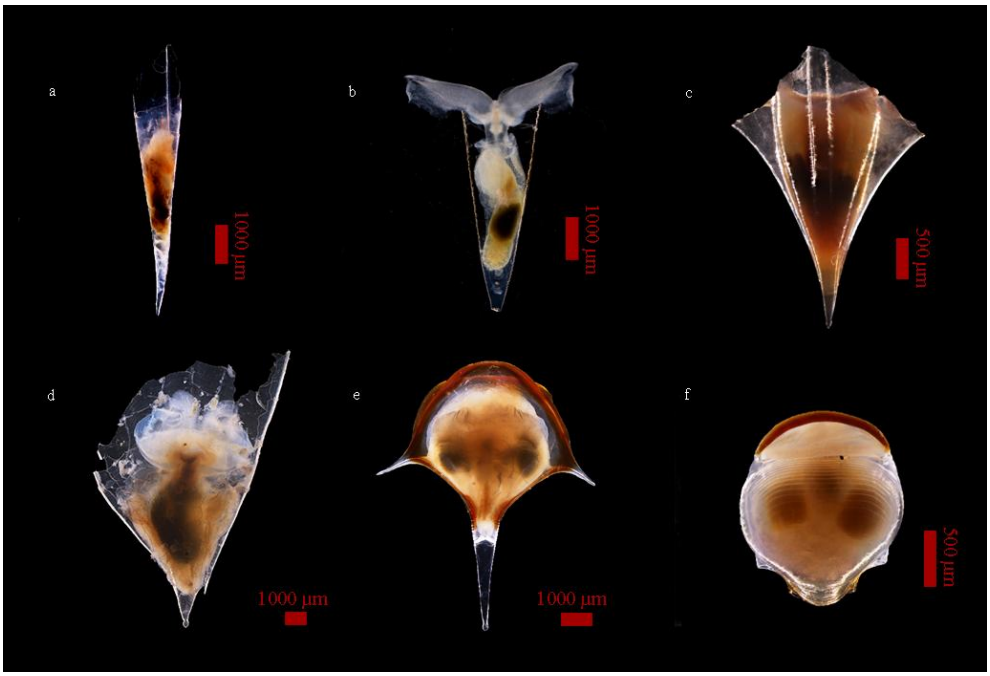
附录2 南海翼足类种类形态

Appendix 2 Morphology of pteropod species in the South China Sea



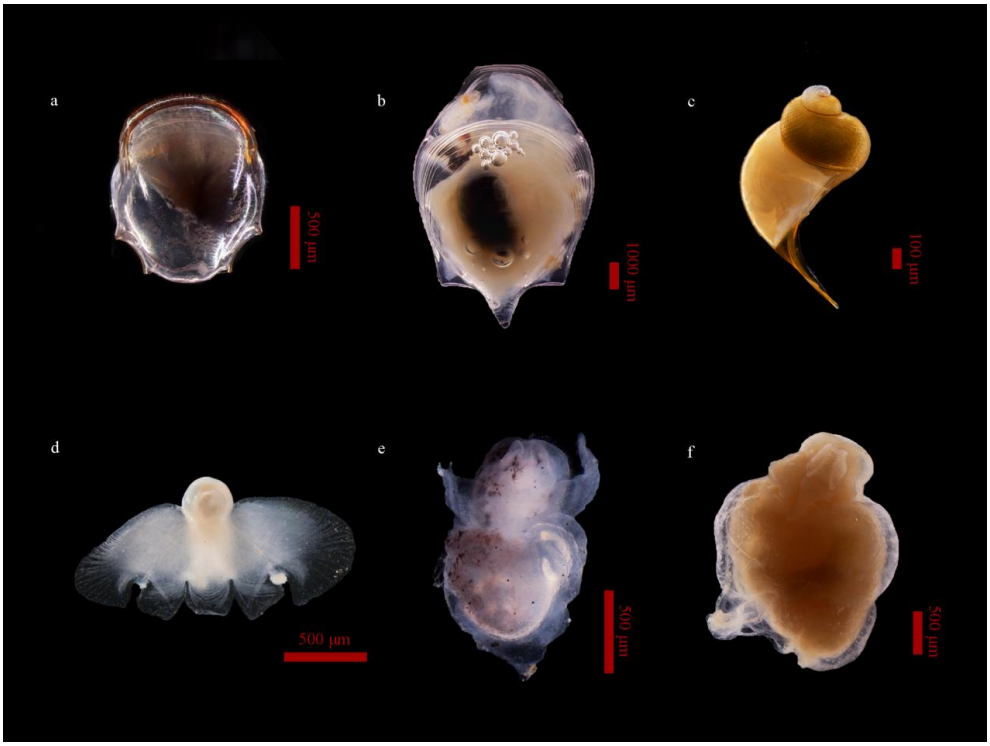
(a) 泡螬螺; (b) 马蹄螬螺; (c) 胖螬螺; (d) 尖笔帽螺; (e) 锥笔帽螺; (f) 芽笔帽螺

(a) *Limacina bulimoides*; (b) *Limacina trochiformis*; (c) *Heliconoides inflatus*; (d) *Creseis acicula*; (e) *Creseis conica*; (f) *Creseis virgula*



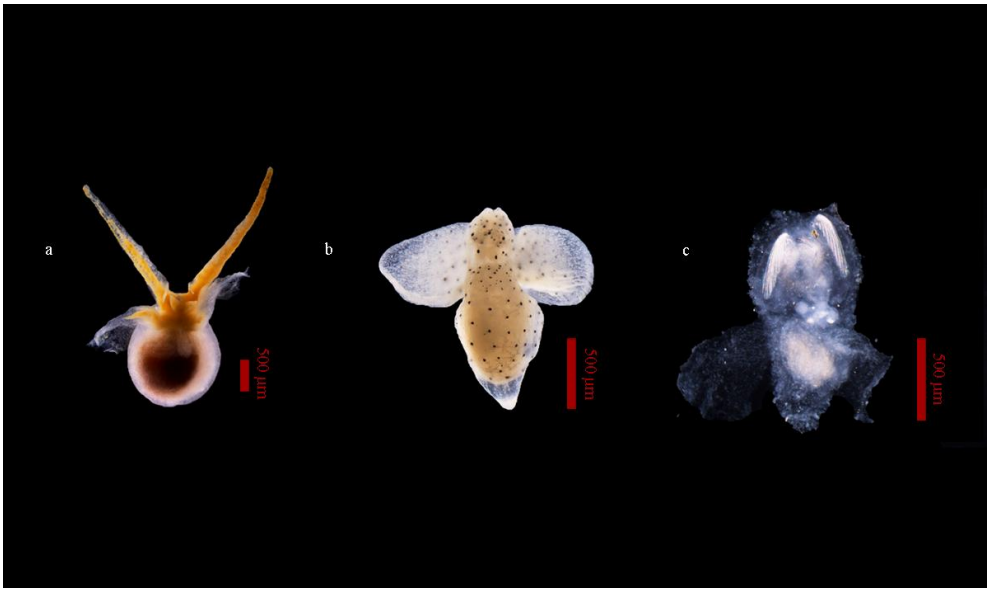
(a) 锥棒螺; (b) 玻杯螺; (c) 矛头长角螺; (d) 袋长角螺; (e) 厚唇螺; (f) 肋厚唇螺

(a) *Styliola subula*; (b) *Hyalocylis striata*; (c) *Clio pyramidata*; (d) *Clio recurva*; (e) *Diacria trispinosa*; (f) *Telodiacria costata*



(a) 四齿厚唇螺; (b) 驼龟螺; (c) 长轴螺; (d) 蝴蝶螺; (e) 皮鳃螺; (f) 地中海皮鳃螺

(a) *Telodiacria quadridentata*; (b) *Cavolinia gibbosa*; (c) *Peracle reticulata*; (d) *Desmopterus papilio*; (e) *Pneumoderma violaceum*; (f) *Pneumoderma mediterraneum*



(a) 球形水肌螺; (b) 拟海若螺; (c) 透明扁齿螺

(a) *Hydromyles globulosus*; (b) *Paraclione longicaudata*; (c) *Thliptodon diaphanus*

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25228, pages 1–15
doi: 10.17520/biods.2025228
cstr: 32101.14.biods.2025228

•技术与方法•

基于改进型谱减法和stacking集成学习的低频海洋哺乳类动物声音分类

曹莉凌[1], 金朝阳[1], 张铮[1], 曹守启[2*]

1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201200; 2. 上海海洋大学信息学院, 上海 201200

摘要: 我国远洋渔业活动的快速发展, 对海洋生态环境和海洋哺乳动物的生存产生了严重的负面影响。海洋哺乳类动物声音识别能够辅助监测其种群和栖息地的动态变化, 在监测、生态保护和生态学研究中具有重要作用。针对海洋环境中哺乳类动物声音信号易受背景噪声干扰、特征提取与分类准确率较低的问题, 本文提出了一种基于改进型谱减法与stacking集成学习的分类方法。首先, 利用变分模态分解(variational mode decomposition)将含噪音频按频率带分解, 并通过Pearson相关系数筛选噪声模态, 再使用谱减法实现针对性降噪。其次, 在特征提取方面, 本文提出特征融合方案, 结合音频的时域、频域统计特征和通过卷积神经网络在Mel语谱图上提取的深度特征, 并利用线性判别分析(linear discriminant analysis)进行降维处理, 然后通过特征融合构建出具有综合判别信息的多维特征向量。最后, 采用stacking集成学习模型进行声音分类识别, 将支持向量机(SVM)、k最邻近(KNN)、极端梯度提升(XGBOOST)、多层感知机(MLP)和高斯朴素贝叶斯(GNB) 5个基学习器的预测结果通过LightGBM元学习器进行融合。实验结果表明, 该方法在低频率海洋哺乳动物声音分类任务上较传统机器学习准确率平均提高了8.04%。

关键词: 海洋哺乳动物声音识别; stacking集成学习; 谱减法; 变分模态分解; 声学识别

曹莉凌, 金朝阳, 张铮, 曹守启 (2026) 基于改进型谱减法和stacking集成学习的低频海洋哺乳类动物声音分类. 生物多样性, 34, 25228. doi: 10.17520/biods.2025228; cstr: 32101.14.biods.2025228.

Cao LL, Jin ZY, Zhang Z, Cao SQ (2026) Low-frequency marine mammal sound classification using improved spectral subtraction and stacking ensemble learning. Biodiversity Science, 34, 25228. doi: 10.17520/biods.2025228; cstr: 32101.14.biods.2025228.

Low-frequency marine mammal sound classification using improved spectral subtraction and stacking ensemble learning

Liling Cao[1], Zhaoyang Jin[1], Zheng Zhang[1], Shouqi Cao[2*]

1 *College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201200, China*
2 *College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201200, China*

ABSTRACT

Aims: The rapid development of China's distant-water fisheries has exerted significant negative impacts on the marine ecological environment and the survival of marine mammals. Acoustic recognition of marine mammals can facilitate monitoring of their population dynamics and habitat changes, playing a crucial role in ecological monitoring, conservation, and research. To address the challenges of background noise interference and low accuracy in feature extraction and classification of marine mammal vocalizations, this paper proposes a classification method based on an improved spectral subtraction technique combined with stacking ensemble learning.

Methods: (1) Variational mode decomposition (VMD) is utilized to decompose noisy audio signals into multiple frequency bands. Noise-dominant modes are identified using the Pearson correlation coefficient and are subsequently suppressed through targeted spectral subtraction. (2) For feature extraction, a fusion strategy is employed that combines time-domain and frequency-domain statistical features with deep representations extracted from Mel spectrograms via a

收稿日期 Received: 2025-06-17; 接受日期 Accepted: 2025-12-25
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401302) Supported by the National Key R&D Program (2023YFD2401302)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: sqcao@shou.edu.cn

convolutional neural network (CNN). To enhance class separability and reduce dimensionality, linear discriminant analysis (LDA) is applied, producing a compact and discriminative feature set. (3) In the classification phase, a stacking ensemble model is built by integrating five base learners—support vector machine (SVM), k-nearest neighbors (KNN), extreme gradient boosting (XGBOOST), multilayer perceptron (MLP), and Gaussian naive Bayes (GNB)—whose predictions are aggregated using LightGBM as the meta-learner.

Results: Experimental results demonstrated that the proposed method significantly enhanced classification performance in low-frequency marine mammal sound recognition. The improved spectral subtraction effectively reduced background noise while preserving critical acoustic features. The fusion of Mel-spectrogram deep features with statistical features, followed by LDA dimensionality reduction, produced highly discriminative feature vectors. The stacking ensemble model, integrating five diverse base learners with LightGBM as the meta-learner, achieved a classification accuracy of 94.78%, surpassing the best-performing individual model by 5.12% and the worst-performing by 9.89%. Additionally, the model exhibited robust performance across imbalanced classes, maintaining high precision and recall even for underrepresented species.

Conclusion: This study presents an effective framework for low-frequency marine mammal acoustic classification under complex oceanic noise conditions. By integrating VMD-based spectral subtraction for noise suppression, multi-domain feature extraction, and a stacking ensemble model, the proposed method achieves superior classification accuracy and generalization ability. The results validate that combining domain knowledge in signal processing with ensemble learning strategies can significantly improve the robustness and precision of marine bioacoustic monitoring systems. This approach holds promise for real-time ecological surveillance and conservation applications in noisy marine environments.

Key words: marine mammal sound recognition; stacking ensemble learning; spectral subtraction; variational mode decomposition; acoustic recognition

随着人类海洋活动的日益增多, 远洋渔业、航运和能源开发的快速发展, 海洋生态环境面临着前所未有的压力。海洋哺乳动物作为海洋生态系统的重要组成部分, 其种群数量和分布状况不仅是生态健康的指示器, 也对维持海洋生物多样性具有关键性作用。声音是海洋哺乳动物进行交流与捕食的重要手段, 通过分析它们独特的发声类型可以有效地对其生活习性和生活区域进行研究。因此通过对海洋哺乳动物的声音进行采集, 从而进行识别与监控是一种合理且高效率的方法。然而, 复杂的海洋环境噪声, 包括自然背景噪声和人为干扰, 使得海洋哺乳动物声音信号的采集与识别面临巨大挑战。传统的声学监测方法在处理高噪声环境下的信号时, 往往因信噪比低而难以准确提取特征, 导致识别性能较低。

目前, 基于声学的海洋哺乳动物目标识别方法分为主动声学监测(active acoustic monitoring, AAM)技术和被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)技术(陈俊杰等, 2024)。其中AAM技术通过主动发射声脉冲信号进行探测, 在精确定位, 检测静默等场景中, 其监测效率高于PAM。但是在复杂环境中, AAM需要较强的声脉冲信号才能进行高效率检测。这种脉冲信号在超过特定阈值(如160 dB均方根脉冲声)时, 可能对海洋生物的正常行为造成干扰, 如果信号强度过高或时间过长甚至导致海洋生物听力损伤或死亡(Darias-O'Hara et al., 2025)。PAM技术不发射信号, 而是依靠灵敏的传感器来捕捉和分析环境噪声。此外, PAM运行的功耗相比AAM要更低。这种低能耗运行方式可以延长部署时间, 使其成为长期监测生态系统的理想选择, 并且不会对海洋生物造成干扰。基于被动声学检测, Gillespie等(2013)设计了一种基于声谱图的齿鲸自动哨声检测器, 通过将检测到的哨声段分割为统一长度的碎片, 积累多次碎片提取统计参数, 然后基于这些参数的分布使用线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)进行物种分类, 区分4种物种的正确率为94.5%, 但在区分12种物种时, 噪音的类型增加, 导致正确率降至58.6%。由于海洋环境的复杂性, 音频去噪技术成为影响海洋哺乳动物物种识别与分类的关键因素。主流的去噪方式有两种, 一种是基于原始音频的去噪方法, 另一种是基于音频信号图像的去噪方法。基于原始音频降噪, Zhang等(2024)提出了一种基于连续变分模态分解(sequential variational mode decomposition, SVMD)和改进的小波阈值处理方法, 将SVMD分解获得的噪声高频本征模态函数(intrinsic mode functions, IMFs)通过相关系数方法进行筛选, 然后对这些高频成分进行改

进小波阈值去噪, 实现了在复杂水下环境中鲸鱼声音信号的有效去噪。基于音频信号图像的去噪方法, Mallawaarachchi等(2008)提出了一种基于图像的算法, 用于对海豚哨声的声谱图进行降噪和自动化提取时间频率轮廓, 有效处理了水下噪声问题, 并实现了基本频率变化的提取。

音频降噪处理后进行特征提取是进行物种识别的关键步骤。目前, 基于海洋哺乳动物声信号方法提取的特征分为频域特征和时域特征。研究者通常结合以上两种特征进行物种识别, 以提高识别的准确性。Chen等(2019)使用了一种结合共振稀疏信号分解(resonance-based sparse signal decomposition, RSSD)和频谱脊提取的时频分析方法, 用于提高鲸鱼哨声信号的识别准确性。通过应用RSSD从原始信号中提取哨声成分, 并对哨声频谱图进行脊区域分割, 再利用偏导数方法提取频谱脊特征, 最后使用支持向量机(support vector machine, SVM)或随机森林进行鲸鱼种类识别。Wang等(2021)提出了一种基于时频谱图像和形态学处理方法, 能够从噪声背景中提取、追踪和增强齿鲸哨声信号, 并有效分离重叠的哨声信号。基于时域与频域特征的相互融合, 能更精确地实现分类决策。

集成学习模型在物种分类(尤其是基于声音、图像或生态数据的识别)中得到了广泛应用(申小虎等, 2024)。与单一的深度学习模型相比, 具有以下几个显著优势: (1)较强的预测精度与泛化能力: 集成学习通过组合多个弱学习器(如决策树、神经网络等)的预测结果, 能够有效降低单一模型的偏差和方差。单一深度学习模型可能因过拟合或对训练数据的过度依赖而泛化能力不足, 而集成方法通过多样化的子模型互补, 显著提升整体性能, 尤其在复杂或噪声数据上表现更优。(2)增强模型的稳健性: 单一深度学习模型对数据中的异常值、噪声或特定模式可能过于敏感, 导致预测不稳定。集成学习模型通过投票(分类)或加权平均(回归)等方式整合多个模型的输出, 能够平滑个体模型的错误, 提高对异常情况的容忍度。(3)减少过拟合风险: 深度学习模型参数众多, 容易在训练数据出现过拟合现象, 尤其当数据量有限时。集成学习通过引入不同的初始权重和不同的子集训练数据或模型结构, 可以有效缓解过拟合, 使模型在未见过的数据上表现更稳定。杨森等(2023)提出了一种基于stacking集成学习的单目摄影树种分类方法, 通过结合k最邻近(k-nearest neighbors, KNN)、极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBOOST)、SVM、随机森林(random forest, RF)等多个基学习器及逻辑回归(logistic regression)作为元学习器, 实现异质融合, 提升了分类的非线性表达能力, 降低了泛化误差。Li等(2021)使用了包含10,000张梨黑斑病、梨锈病、苹果花叶病和苹果锈病图像的数据集进行模型开发和测试, stacking集成学习分类器在验证集上达到98.05%的准确率, 在测试集上达到97.34%的准确率。Hwangbo等(2022)研究开发了一种基于stacking集成学习模型的急性缺血性脑卒中患者6个月全因死亡率预测模型, 结合了KNN、SVM、XGBOOST、RF、朴素贝叶斯(naive Bayes)、人工神经网络(artificial neural network)和LR共7种基础分类器, 验证集上的结果显示模型的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积为0.783, 准确率为71.6%, 敏感性为72.3%, 特异性为70.9%。由此可知, 集成学习通过多模型的协同工作, 不仅提升了整体的预测精度, 还改善了模型对异常数据的适应能力, 使得系统在实际应用中表现得更为稳定和可靠。

综上所述, 本文旨在设计一种基于改进型谱减法和stacking集成学习的低频海洋哺乳类动物声音分类方法。使用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)对含噪音频按频率带进行分解, 通过相关系数判断噪音频率模态, 对其使用谱减法进行降噪。将音频按频率进行分解能够更加清楚地认识噪音的分布, 使得降噪更有目的性。本文针对低频海洋哺乳动物声音识别分类, 使用了Mel语谱图提取特征。Mel尺度是根据人类对声音频率的主观感知设计的, 低频分辨率较高, 而高频被压缩。低频信号携带关键生态信息, 具有丰富的谐波结构和时变模式, 需要精细分辨率来捕捉。Mel语谱图强调这些低频细节, 避免普通谱图的低频模糊问题, 从而提高特征提取准确性。此外, 考虑到Mel语谱图在强调频域信息的同时会弱化时间维度的动态特征, 本研究在利用Mel语谱图进行深度特征提取的基础上, 还结合了频域与时域的统计特征, 以弥补Mel语谱图时序信息不足的问题。在分类模

型的构建上, 本文采用了stacking集成学习方法, 结合多种基学习器, 如SVM、KNN等, 并以轻量梯度提升机(light gradient boosting machine, LightGBM)作为元学习器进行最终决策。

1 研究方法

为解决复杂环境下的低频海洋哺乳类动物声音识别分类问题, 本文提出了一种基于改进型谱减法和stacking集成学习的分类模型(图1), 具体流程如下: (1)音频预处理: 因为原始声音数据常常受到环境背景噪声干扰, 会极大影响后续特征提取与分类效果。为此, 本文提出一种改进型的谱减法降噪, 通过使用VMD将含噪频率带进行分解, 然后使用谱减法进行降噪处理。(2)特征提取与融合: 在完成音频去噪后, 本文从频域、时域和深度学习3个方面提取音频的组合特征, 以增强模型对不同声音类别的判别能力。(3)分类器设计与训练: 在分类模型设计阶段, 本文采用stacking集成学习结构, 由多个基

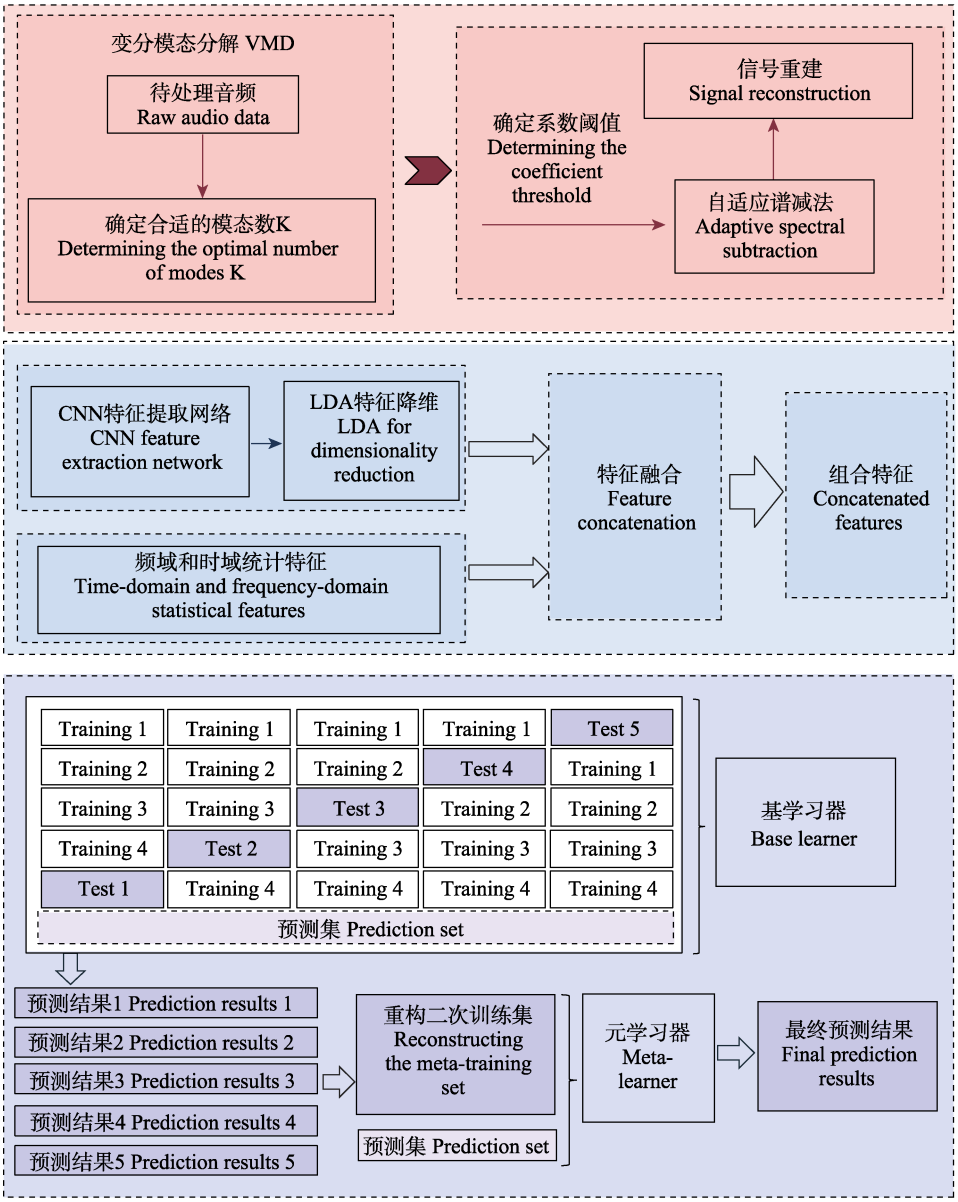


图1 基于改进型谱减法和stacking集成学习分类模型的总体方案。VMD: 变分模态分解; **CNN**: 卷积神经网络; **LDA**: 线性判别分析。

Fig. 1 An overall framework based on improved spectral subtraction and stacking ensemble learning classification model. VMD, Variational mode decomposition; CNN, Convolutional neural network; LDA, Linear discriminant analysis.

学习器和一个元学习器构成, 以提升分类模型的泛化能力。

1.1 基于改进型谱减法的海洋哺乳动物声音降噪

1.1.1 海洋哺乳动物的声信号类型与特征

海洋哺乳动物具有丰富的发声方式, 这些声音在它们的社交、定位、导航、捕食、迁徙等活动中起着至关重要的作用。海洋哺乳动物的叫声信号种类繁多, 通常表现为非稳态信号, 且具有复杂的变化规律和丰富的频谱特性。不同种类的海洋哺乳动物在发声方式、频率范围、基频与谐波、信号持续时间以及声源强度等方面存在显著差异。根据其声学特征与功能, 发声可分为5类: 咔哒声(clicks, 1–150 kHz)、哨声(whistle, 5–30 kHz)、脉冲声(pulses, 1–30 kHz), 以及频率均小于5 kHz的呼叫声(calls)和歌声(songs)。

1.1.2 变分模态分解(VMD)

变分模态分解(VMD)是一种信号处理技术(Dragomiretskiy & Zosso, 2014), 用于将复杂的多分量信号分解成一系列具有特定中心频率和带宽的本征模态函数(IMFs)。VMD的核心思想是通过构造和求解一个变分问题来分解信号。具体来说, VMD试图找到一组模态函数, 使得每个模态函数在频域上围绕一个中心频率紧密分布, 并且所有模态函数IMFs的和等于原始信号。具体来说, 每个IMF分量代表了信号中的一个单一分量振动模态 $u_k(t)$, 其数学表达式如下:

$$u_k(t) = A_k(t)\cos[\varphi_k(t)] \tag{1}$$

其中, $A_k(t)$ 是IMF函数 $u_k(t)$ 的瞬时幅值, 且 $A_k(t) \geq 0$。而 $\varphi_k(t)$ 表示 $u_k(t)$ 的瞬时相位。

1.1.3 谱减法

谱减法是一种基于频谱分析的噪声去除方法, 其基本思想是通过估计噪声频谱, 并从信号的频谱中减去噪声频谱, 进而实现去噪。其基本原理如图2所示。首先, 对含噪信号进行短时傅里叶变换(STFT), 将时域信号转换为频域复数谱:

$$Y(f) = |Y(f)|\, e^{j\theta_Y(f)} \tag{2}$$

其中, $|Y(f)|$ 是幅度谱, $\theta_Y(f)$ 是相位谱, j 是虚数单位, 用于描述信号的幅度和相位。

在谱减法中, 通常只对幅度谱进行减法处理, 保持原信号相位不变, 因为相位携带信号的时空定位信息, 改变相位可能引入相位失真, 导致信号感知畸变或音乐噪声。如式(3)所示, 从每一帧信号的频谱中减去噪声的频谱, 去除噪声的频率成分, 留下纯净的信号成分。

$$\alpha \hat{A}_n(k) = \max\left\{A_n(k) - \alpha\sqrt{N(f)}, \beta\sqrt{N(f)}\right\} \tag{3}$$

其中, $N(f)$ 表示估计的噪声幅度谱; $\hat{A}_n(k)$ 是更新后的估计值; $A_n(k)$ 是当前幅值的估计值; 其中, α 是过减因子用于控制噪声抑制的强度, 通常范围为1–5, 以补偿噪声估计偏差并减少音乐噪声; β 是谱下限, 用于防止幅度为负值, 通常范围为0.001–0.1。

1.1.4 基于VMD改进的谱减法

传统的谱减法通常依赖于整体信号的频谱估计, 在频率上没有细分, 噪声和信号的频谱成分发生混合, 尤其是在信号的频率带宽较宽或信号中噪声的频率与信号的频率相近时, 传统谱减法的效果可能会受到极大影响(Lu et al., 2013)。为解决这一问题, 本文提出了基于VMD的改进型谱减法, 实现对含噪信号降噪处理, 其原理结构图如图3所示。首先, 使用VMD对于需要降噪的IMF模态, 使用STFT将时域信号转换为频域信号, 然后对每个频谱帧, 估计其噪声部分, 并计算噪声的幅度谱。从每个频谱帧中减去噪声的估计值, 去除信号中认为是噪声的成分。最后将所有降噪后的IMF模态相加, 得到最终的降噪信号。

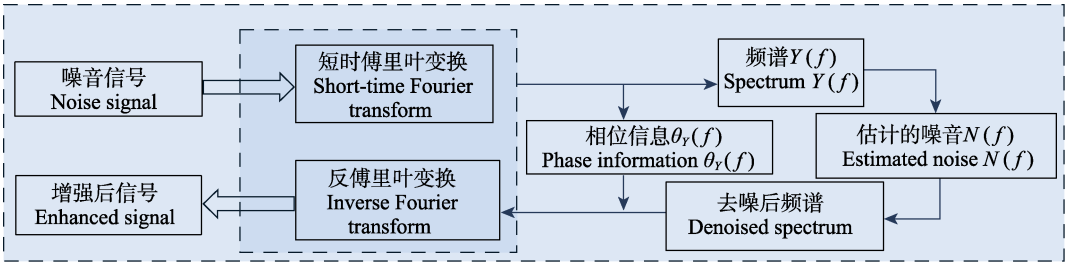


图2 基本谱减法流程图
Fig. 2 Flowchart of the basic spectral subtraction method

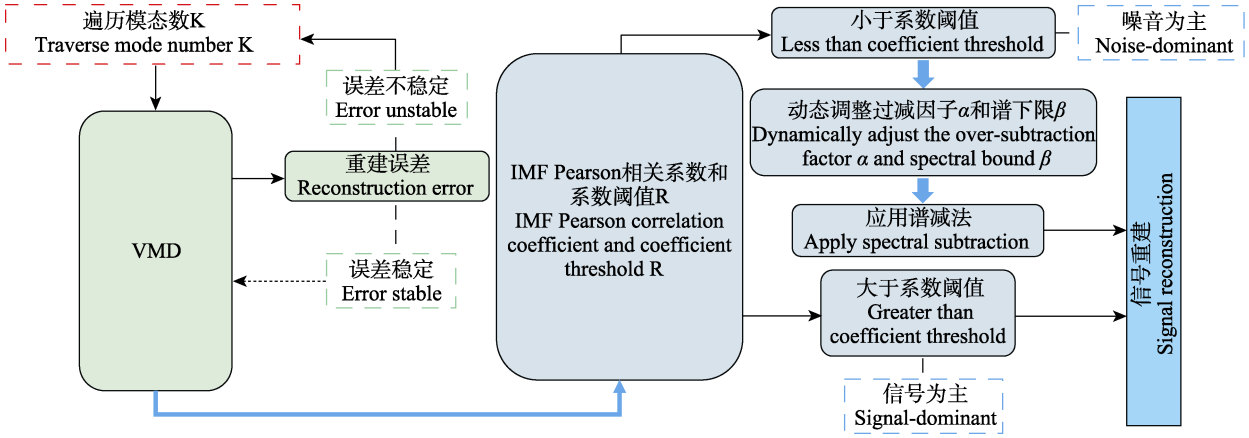


图3　改进型谱减法原理结构图。VMD: 变分模态分解; IMF: 本征模态函数。
Fig. 3　Block diagram of the improved spectral subtraction method. VMD, Variational mode decomposition; IMF, Intrinsic mode function

(1) VMD分解。在VMD分解过程中, 合适的超参数设置是分解成功与否的关键。而其中最关键的两个参数是惩罚因子γ和模态数K。惩罚因子γ是控制模态频带带宽的一个超参数, 它平衡了模态中心频率的平滑性和模态的带宽宽度。较大的α值会使得模态更宽, 而较小的α值会使得模态变得更加集中。α的选择通常依赖于信号的特性。对于频谱较宽的信号, 选择较大的α值, 可以保证分解后的模态覆盖较宽的频率范围; 对于频谱较窄的信号, 可以选择较小的α值。本文研究所使用的海洋哺乳类动物声音数据集是未经处理的实录音频, 具有大量的高频噪音, 所以具有较高的频谱宽度。因此设置惩罚因子$\alpha=2000$, 它能够确保每个模态的频带宽度, 从而捕捉到信号的较大频率范围。

通过重建误差来选择合适的K值(模态数)是VMD中一种常见的选择方法(An et al., 2021)。其核心思想是通过比较不同K值下的信号重建质量, 从而确定一个最佳的K值, 使得信号被有效分解并且重建误差最小。重建误差指的是通过分解和重建得到的信号与原始信号之间的差异。常用的重建误差计算方法是均方误差(mean square error, MSE), 原理如下:

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x(t_i)-\hat{x}(t_i)\right)^2 \tag{4}$$

其中, $x(t_i)$是原始信号的值; $\hat{x}(t_i)$是通过分解后重建的信号的值; N是信号的总采样点数。

重建误差并不是越小越好。在使用更多的模态进行重建时, 模态可能变得过于细化, 导致过拟合, 并且可能会捕捉到过多的噪声或不必要的细节。

附录1展示了基于重建误差确定VMD最佳模态数K的两种准则。(1)稳态法: 如图4所示, 随着K值的增加, 重建误差逐渐下降并于K = 6处趋于平稳。此时, 选择该值作为分解参数, 既能保证信号重构不失真, 又能避免因K值过大而导致过分解。(2)最大跨度法: 观察误差曲线的变化率发现, 当K从5增加至6时, 重建误差出现了最为显著的降幅。这一剧烈的拐点K = 6是捕获信号核心分量的关键节点, 因此可判定6为最佳分解模态数。(2)计算Pearson相关系数及确定系数阈值。为了更好地区分纯净信号与含噪信号, 引入了Pearson相关系数。Pearson相关系数可以衡量两个信号之间的线性关系强度(Li et al., 2018)。其原理如下式:

$$R=\frac{\mathrm{Cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} \tag{5}$$

其中, R是信号X和信号Y之间的Pearson相关系数, 范围在–1到1之间。对于每个IMF模态, 计算它与原始信号之间的Pearson相关系数。理论上, 代表有用信号的模态与原始信号的相关性较高, 而噪声模态的相关性较低。通过对Pearson相关系数的分析, 可以确定系数阀值。对小于系数阈值的模态判断为噪音为主的待降噪模态, 进行降噪处理。而大于系数阈值的模态判断为信号数据为主的纯净模态, 给予保留。

本文采用最大间隔法确定系数阈值, 通过计算相关系数的差分, 找到差分最大的点作为阈值。首先将相关系数按从小到大的顺序排序, 然后计算相

邻数据点之间的差值, 找到差值最大的位置, 这个位置就是数据分布中的分界点, 将最大差分进行平分, 然后加上差分最大间隔中的小值, 就是系数阈值。如表1所示, 按行系数阀值分别是: 0.643、0.447、0.361、0.638、0.296。大于阀值的模态视为带有信号数据的纯净信号。

(3)动态调整超参数的谱减法和信号重建。本文使用了一种利用每个VMD模态的局部信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)进行动态调整过减因子 α 和谱下限 β 的方法。在VMD分解后, 对每个噪声主导模态计算局部SNR:

$$\mathrm{SNR} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{mod}}{P_{noise}}\right) \tag{6}$$

其中, P_{mod} 为模态幅度谱的均值功率, P_{noise} 为模态静音帧的估计。对于海洋哺乳动物声音信号, 窄带模态(< 5 kHz)通常高SNR, 低频噪声少; 宽带模态(1–150 kHz)低SNR, 高频干扰多。

基于Berouti等(1979)实验结果, 如果SNR > 0采用线性插值公式:

$$\alpha = 4 - \frac{\mathrm{SNR}}{5} \tag{7}$$

如果SNR ≤ 0, α 固定为4, 固定为高强抑制, 避免残留噪声。

谱下限 β 的自适应调整, 参考Berouti等(1979)对音乐噪声的实验优化, 采用指数函数:

$$\beta = 0.002\times\left(1+\exp\left(-\frac{\mathrm{SNR}}{10}\right)\right) \tag{8}$$

β 随SNR反向变化, 当SNR高时, β 较小, 有更强的去噪效果; 低SNR时 β 变大, 抬高下限, 保留更多的信号以防止伪影。该调整超参数的方法避免了固定参数的局限性, 提高了降噪算法的稳健性。

通过保留的原始相位信息, 采用反傅里叶变换(inverse Fourier transform, IFT)将降噪后的频谱恢复至时域, 得到对应模态的去噪信号。最终, 将所有经降噪处理的有效模态与未被判定为噪声的模态一同进行叠加重建, 得到完整的降噪音频信号。

表1 所选样本各本征模态函数(IMF)分量的Pearson相关系数
Table 1 Pearson correlation coefficients of each intrinsic mode function (IMF) component for the selected samples

样本编号 Sample ID	模态函数1 IMF1	模态函数2 IMF2	模态函数3 IMF3	模态函数4 IMF4	模态函数5 IMF5	模态函数6 IMF6
样本1 Sample 1	0.785	0.384	0.241	0.083	0.326	0.501
样本2 Sample 2	0.701	0.571	0.151	0.086	0.338	0.555
样本3 Sample 3	0.481	0.684	0.241	0.171	0.568	0.586
样本4 Sample 4	0.850	0.426	0.244	0.096	0.325	0.237
样本5 Sample 5	0.559	0.458	0.586	0.032	0.133	0.538

1.2 多模态特征提取与融合

语谱图是一种常用的声音信号分析工具, 它能够清晰地展示音频信号在不同时刻的频率成分及其能量分布情况。音频信号本质上是一个一维的时间序列, 直接观察波形(时域信号)并不能很好地分析声音的频率特征。通过使用语谱图对音频的频域信息进行可视化, 有助于分析信号的频谱结构。然而, 普通的语谱图在提取声音信号特征时, 往往不能充分体现海洋哺乳动物声音信号特有的频率模式、谐波结构和时间变化特性, 很有可能导致重要的生物声学特征丢失。为了更有效地捕捉和凸显这些生物声学特征, 本研究采用了模拟人类听觉系统非线性频率感知特性的Mel语谱图进行特征提取。Mel语谱图能够突出低频段信息, 强调重要的生物声学特征, 提高分类模型的性能(Kim et al., 2025)。图4展示了部分海洋哺乳类动物样本的Mel语谱图。

Mel语谱图虽擅长时频局部特征提取, 但弱化了信号的全局时序动态。为弥补此不足, 本文融合了时域和频域的统计特征, 建立了多模态的特征表示(附录2)。具体选取的统计特征包括: 时域的均方根能量、零交叉率、振幅包络、峰度和偏度(5维); 频域的谱质心、谱带宽、谱熵、频谱滚降点, 以及梅尔频率倒谱系数(mel-frequency cepstral coefficients, MFCC)的均值与标准差(17维, 共22维)。这些特征捕捉信号的整体能量分布、波形趋势和频谱复杂度, 补充Mel语谱图的全局视角。

为提取Mel语谱图的深度特征, 本文设计了一个紧凑的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)架构, 如图5所示。它包括输入层(256 × 128 × 1的Mel语谱图)、三层卷积(3 × 3卷积核)和最大池化层, 以及一个全连接层, 最终输出1,024维特征向量。该架构针对海洋声音的时频特性进行优化, 逐步从低级边缘到高级语义特征提取。然而, 高维特征易导致过拟合, 因此本文采用了LDA进行监督降维(Cunningham & Ghahramani, 2015)。它的核心思想是: 最大化不同类别数据之间的区分度(类间距离); 最小化同一类别数据的内部差异(类内

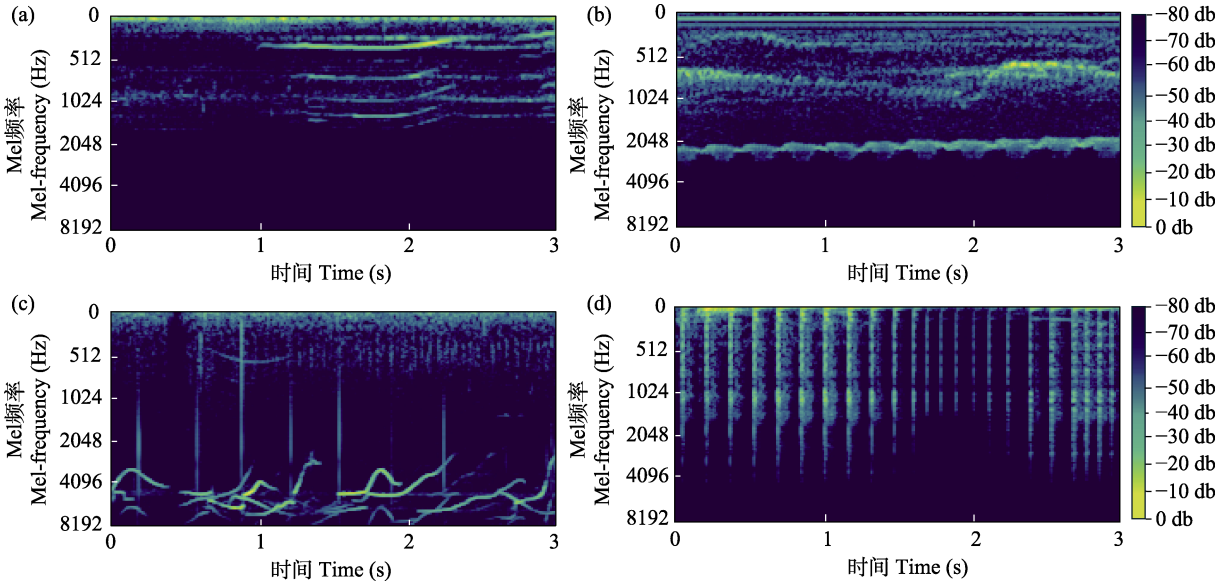


图4　座头鲸(a)、髯海豹(b)、真海豚(c)和海象(d)的样本Mel语谱图

Fig. 4　Mel spectrograms of the samples of *Megaptera novaeangliae* (a), *Erignathus barbatus* (b), *Delphinus delphis* (c) and *Odobenus rosmarus* (d)

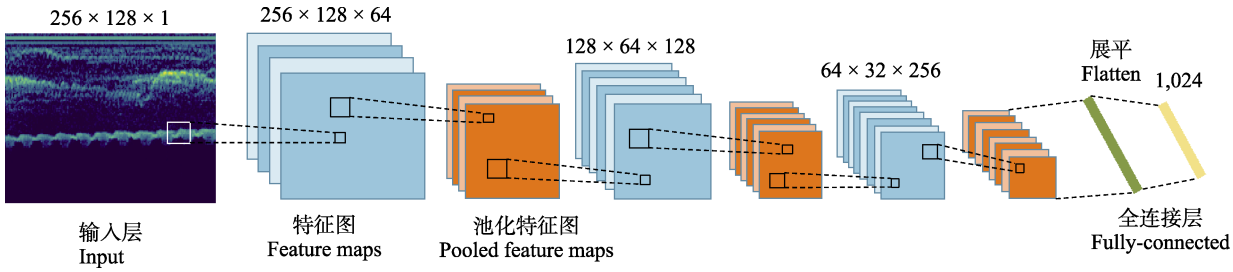


图5　基于Mel语谱图的卷积神经网络特征提取网络架构

Fig. 5　Convolutional neural network architecture for Mel spectrogram deep feature extraction

散度); 将数据投影到一个新的低维空间, 使不同类别的样本尽可能区分开来, 将特征降至C–1维(C为类别数), 它保留了类别的判别信息, 同时减少了计算负担。

本文提出的特征融合方案采用早期融合策略(Baltrušaitis et al., 2019), 通过将CNN提取的Mel语谱图特征与其他统计特征进行拼接, 从而建立一个包含多个维度的综合特征向量。通过CNN对Mel语谱图进行处理, 然后进行降维处理, 提取出7维的特征向量; 同时, 采用传统的统计特征提取方法, 从音频信号中提取了22维的统计特征。然后, 我们使用将这两部分特征拼接成一个29维的特征向量, 作为集成学习模型的输入特征。这种特征融合方式能够结合不同类型的信息, 增强模型的判别能力。通过将Mel语谱图的时频特征和统计特征进行融合, 为分类器提供更加全面的特征描述, 从而提高模型的准确性和稳健性。

1.3　stacking集成学习模型

本研究所使用的stacking是一种集成学习方法, 通过组合多个弱学习器的预测结果来提高最终的预测性能(郑颖颖等, 2024)。它的基本思想是利用多个基学习器(又称基模型或基础模型)产生的预测结果, 作为新的特征输入到一个元学习器进行二次学习, 从而得到一个更为准确的预测。因此, 为了发挥stacking集成学习模型的优势, 选择性能强大且模型训练机理差距大的基学习器对于建立准确的预测模型至关重要。

1.3.1　学习器的选择

本文采用5种具有差异化结构的算法作为基学习器, 这些基学习器SVM、KNN、XGBOOST、多

层感知机(multilayer perceptron, MLP)和高斯朴素贝叶斯(Gaussian naive Bayes, GNB)可以处理不同类型的数据集与预测任务。SVM是一种监督学习模型，它通过在特征空间中寻找一个决策边界(或超平面)，最大化不同类别之间的间隔，从而实现分类。它具有较强的泛化能力，尤其适用于小规模和高维数据集。KNN是一种简单直观的监督学习算法，它通过计算输入样本与训练集中邻近样本的距离来进行预测，无需显式的训练过程，常用于分类和回归任务。它通过改变K值、距离度量和加权策略，能够灵活适应不同的数据类型和问题。XGBOOST是一种高效的梯度提升决策树算法，采用正则化、并行计算、自动处理缺失值等优化措施，具有较强的稳健性，能够降低过拟合风险，并在大规模数据集上表现优异。MLP是一种前馈神经网络，通过多个隐藏层的非线性变换，MLP能够学习复杂的模式和关系，相较于线性模型，能够处理更复杂的任务。GNB是一种基于贝叶斯定理的分类算法，它是朴素贝叶斯分类器的一种变体。它假设数据的每个特征服从高斯(正态)分布，且每个特征与其他特征之间是条件独立的。这个假设使得模型更加高效且适用于特征较多、符合正态分布的数据集。

选择元学习器时，要求它具备高效性、强稳健性和良好的防过拟合能力，并能够处理类别特征和缺失值。考虑到这些要求，选择LightGBM作为元学习器是一个合理的选择。LightGBM能在大规模数据集上高效训练，支持并行计算，能快速处理多个基学器的预测结果。它通过正则化有效防止过拟合，同时能够灵活处理类别特征和缺失值，这使得它能够优化多个基学器的输出，从而提升stacking模型的准确性和稳定性。

1.3.2 模型建立

在建立stacking集成学习模型时，采用K折交叉验证法(K为基学器数量)来构造数据集。K折交叉验证通过将数据集划分为K个子集，使每个子集在每一个基学习器都能作为一次测试集作为评估，这有助于避免模型对某个特定数据子集过拟合，确保模型能够更好地泛化到未知数据。stacking集成模型建模方法如图6所示。

折外预测(out-of-fold, OOF)是stacking模型中常用的一种方法，它的作用是生成一个合适的验证集，

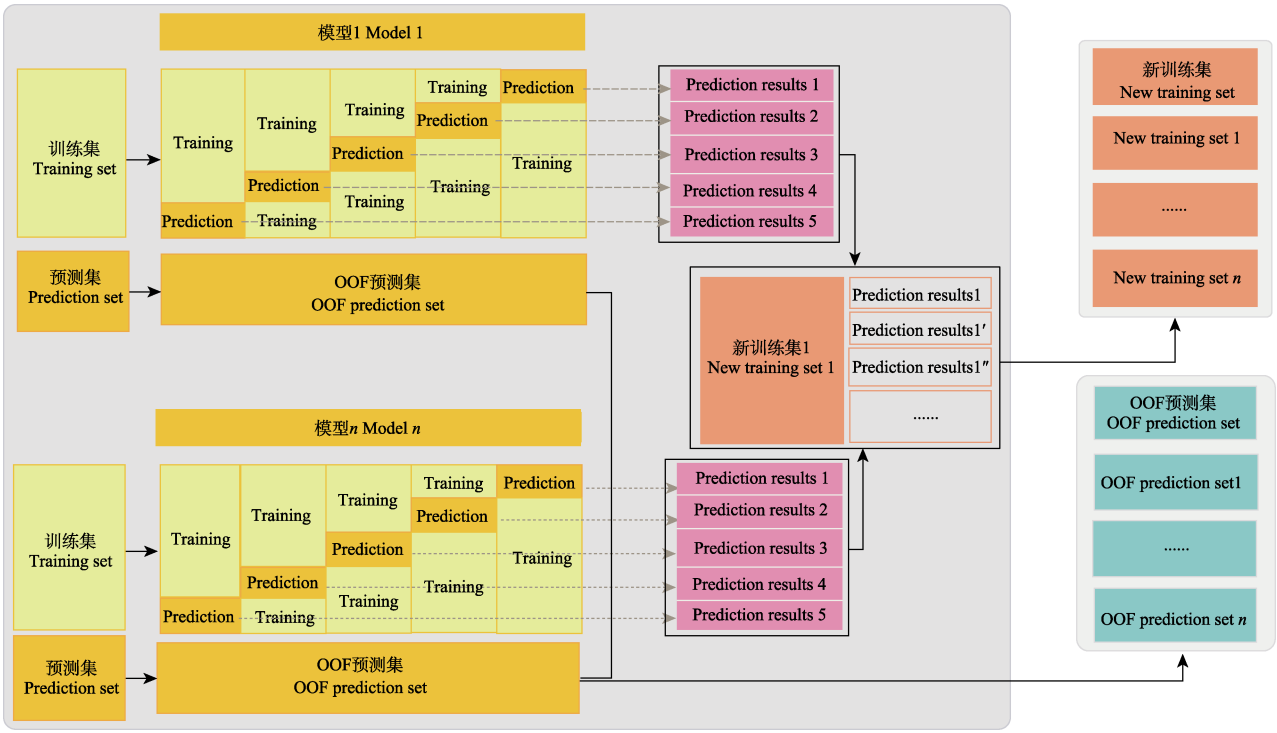


图6 stacking集成学习模型。OOF: 折外预测。

Fig. 6 Stacking ensemble learning model. OOF, Out-of-fold.

用于训练元学习器并评估最终模型的性能。该验证集是未参加过模型训练的数据集, 它对模型评估和证明模型的泛化能力有重要作用。

每个基学习器在进行了交叉验证的训练集上进行训练, 然后在验证集上进行预测, 生成用于训练元学习器的预测值。在分类模型中生成的预测值是每一个类别的预测概率组成的一维向量, 例如{0.12, 0.60, 0.03, 0.11,…}。该向量中的每一个元素各代表基学习器对预测样本属于某一类别的概率。通过组合每个基学习器产生的预测向量, 可以生成一个预测矩阵, 该矩阵就是元学习器的训练样本。

2 结果

2.1 数据集

本研究选用了沃特金斯海洋哺乳动物声音数据库(Watkins Marine Mammal Sound Database), 该数据库包含60多种海洋哺乳动物的大约2,000条独特录音, 以及15,000多个带标签的数字声音片段, 并且所有数据样本均采用wav格式存储。因为数据收录跨度时间较长, 没有进行统一采样频率, 因此本文在数据预处理阶段进行了重采样工作, 将数据格式统一为44.1 kHz, 并将数据音频裁剪为3 s的片段, 保证了数据处理的一致性和高效性。

在本研究中, 根据物种代表性和音频质量的标准, 从数据库中筛选出8种海洋哺乳动物构建实验数据集, 如表2。从表中可知, 不同物种之间存在较大的样本数量差异, 如抹香鲸(*Hyseter macrocephalus*)与海象(*Odobenus rosmarus*)的样本数比例高达30 : 1。为缓解类别不平衡对模型训练的不利影响, 本研究采用了数据增强(如时间拉伸、噪声添加等)和类别权重调整等策略, 从而确保在稀缺类别样本上也能获得良好的分类性能。海洋哺乳动物原始声音数据集的频率分布图如附录2所示。

表2 本实验海洋哺乳动物声音数据集信息

Table 2 Marine mammal vocalization dataset information used in this study

海洋哺乳动物声音种类 Marine mammal sound types	音频时长 Audio duration (s)	样本数 Number of samples
海象 *Odobenus rosmarus*	184	61
髯海豹 *Erignathus barbatus*	354	118
真海豚 *Delphinus delphis*	343	114
长鳍领航鲸 *Globicephala melas*	528	175
抹香鲸 *Physeter macrocephalus*	5,558	1,852
座头鲸 *Megaptera novaeangliae*	2,920	973
长须鲸 *Balaenoptera physalus*	2,476	825
短鳍领航鲸 *Globicephala macrorhynchus*	1,766	578

2.2 改进型谱减法可行性实例分析

为了验证本文提出的改进型谱减法在低频海洋哺乳动物声音降噪中的可行性, 本节选取代表性样本进行实例分析。

图7为不同降噪方法前后信号的频域对比图(横轴为频率(Hz), 纵轴为幅值)。从图中可以明显看到, 本文提出的改进型谱减法在抑制高频与低频噪声的同时, 较好地保留了原始信号的重要特征, 低频有效信息损失较小; 而多频带谱减法(multi-band spectral subtraction, MBSS)虽然对高频噪声有一定抑制作用, 但其在中低频区域的信号幅值损失较为明显, 可能导致后续的信号特征识别精度下降。维纳滤波(wiener filter)在整体降噪效果上表现较为不足, 特别是对高频的噪音抑制效果较差; 非负矩阵分解(non-negative matrix factorization, NMF)方法虽然实现了部分噪声成分的去除, 但在信号重构过程中损失了一部分有用信号, 造成了信号幅值和频谱特征的明显变化。

对于非平稳信号(如海洋哺乳动物声音), 平均SNR参考价值有限, 因为它忽略了局部的声音变化(如瞬时噪声峰值), 可能会高估音频质量。因此本文采用了规模不变信号失真比(scale-invariant signal-to-distortion ratio, SI-SDR)作为评估指标, 它是信号失真比(signal-to-distortion ratio, SDR)的改进版本, 忽略信号的整体幅度缩放, 更适合评估如语音分离、去噪或音乐源分离等任务。在降噪性能对比实验中, 不同方法得到的平均SI-SDR结果显示了显著差异。本文提出的改进方法表现出最优异的性能, 其平均SI-SDR高达30.58 dB。作为对比, 传统的MBSS、NMF以及维纳滤波方法的平均SI-SDR分别为25.00 dB、20.21 dB和16.68 dB。总体来说, 本文方法的平均SI-SDR比表现次优的MBSS方法高5.58 dB, 充分验证了所提降噪策略在提升音频质量方面的有效性。

频谱图能直观显示信号在每个频率下的信号强度, 附录3是样本降噪前后频谱图对比, 其中横轴为时间(s), 纵轴为频率(Hz)。如图可知信号在低频(0–1 KHz)较亮, 对应海洋哺乳动物声音信号。对

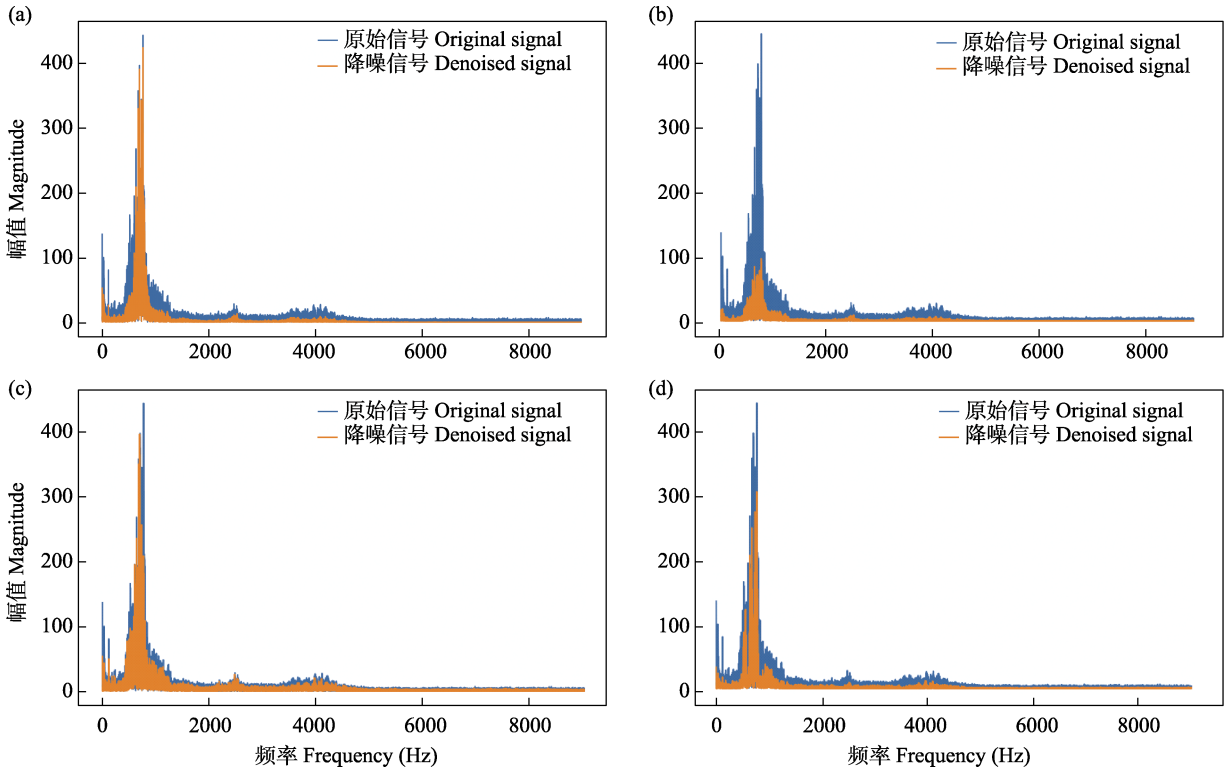


图7　不同降噪方法对比。(a)本文方法; (b)多频带谱减法; (c) Wiener滤波; (d)非负矩阵分解。
Fig. 7　Comparison of different noise reduction methods. (a) Proposed method; (b) Multi-band spectral subtraction; (c) Wiener filtering; (d) Non-negative matrix factorization.

比降噪前后频谱图, 低频区域变得更清晰, 噪声干扰减少; 中高频区域强度明显降低, 意味着噪声能量被有效降低, 降噪效果明显。

图8为降噪前后各基学习器的精确率和召回率对比图。由图可知改进型谱减法降噪对模型预测性能有明显提升; 基学习器中提升最大的是KNN, 其精确率提高了30%, 召回率也提升18.43%。

为验证本实验降噪方法对非平稳噪音的稳健性, 本文模拟添加船舶辐射噪声(低频非白噪声, 时变功率谱基于真实船舶录音仿真), 比较降噪前后性能, 结果如图9所示。由图可知本文降噪方法对带有非平稳噪音的声音数据也具有一定的效果, 预测结果有显著的提升。

综上所述, 本文提出的改进型谱减法具有实际作用, 信号中的噪音干扰显著降低。

2.3　stacking模型性能分析

本研究将数据集分为两部分, 80%使用K折交叉验证处理数据集, 作为模型的训练集。20%作为预测集, 对训练完成的基学习器和stacking融合模型进行测试, 对获得的分类结果进行精度验证分析。为验证基学习器和stacking融合模型对低频海洋哺乳动物声音分类的准确度以及可靠性, 本研究使用的评价指标有混淆矩阵、准确度(accuracy, ACC)、Kappa系数、精确率(precision)、召回率(recall)和F1分数(F1-score)。

stacking集成学习模型本质上是一种结合多种异质学习器优势的集成方法, 不同基学习器通过彼此之间的差异性能够有效降低模型的预测误差并增强模型的泛化能力。为了分析单个模型之间的相关性, 本文计算了各模型预测误差的Pearson相关系数, 结果如附录4所示, 颜色的深浅反映了模型间预测误差的相关程度, 颜色越深表示相关系数越高。

如附录4中所示, 其中MLP和GNB之间的误差相关性最低, MLP本质上是基于神经网络结构, 在学习过程中通过梯度下降算法进行参数优化, 对数据分布没有特定的假设。而GNB参数估计基于数据的统计特性, 对特征间相关性或分布变化敏感度较高, 这种差异使两个模型在处理同一问题时, 其误差来源不一致, 从而有更低的相关性。KNN和SVM

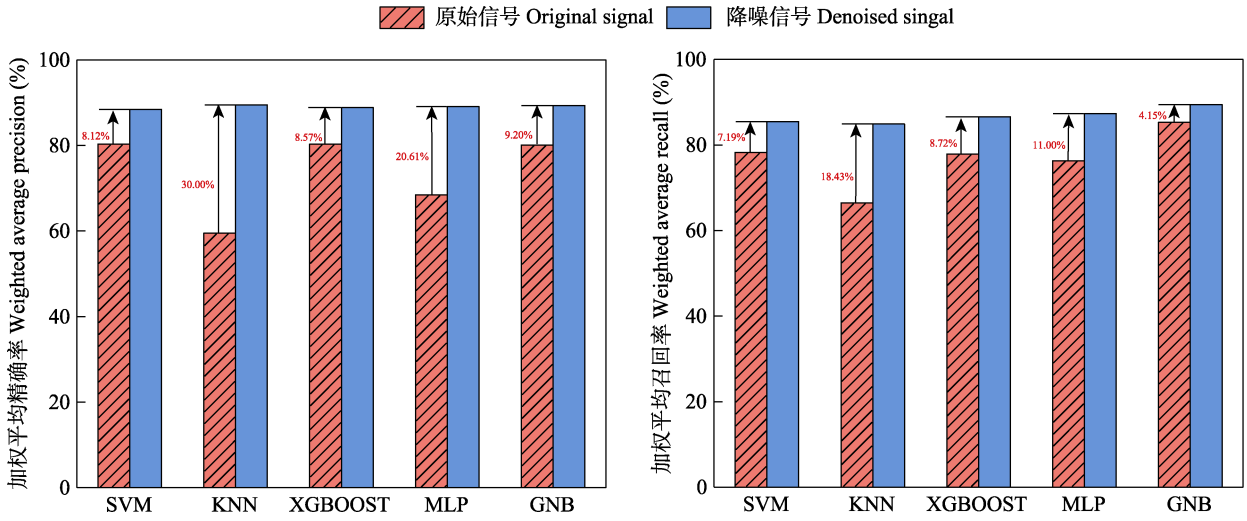


图8　降噪前后预测性能对比图。SVM: 支持向量机; **KNN**: K近邻; **XGBOOST**: 极限梯度提升; **MLP**: 多层感知机; **GNB**: 高斯朴素贝叶斯。

Fig. 8　Prediction performance before and after noise reduction. SVM, Support vector machine; KNN, K-nearest neighbors; XGBOOST, Extreme gradient boosting; MLP, Multilayer perceptron; GNB, Gaussian naive Bayes.

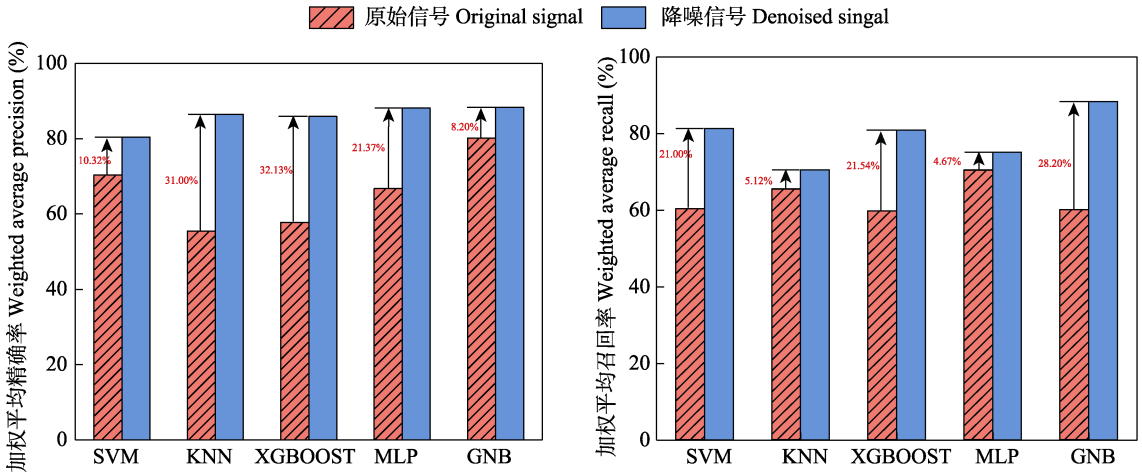


图9　添加非平稳噪音降噪前后预测性能对比图。SVM: 支持向量机; **KNN**: K近邻; **XGBOOST**: 极限梯度提升; **MLP**: 多层感知机; **GNB**: 高斯朴素贝叶斯。

Fig. 9　Prediction performance before and after noise reduction with added non-stationary noise. SVM, Support vector machine; KNN, K-nearest neighbors; XGBOOST, Extreme gradient boosting; MLP, Multilayer perceptron; GNB, Gaussian naive Bayes.

之间的误差相关性最高, 主要是因为两者之间决策边界的相似性。KNN是根据样本周围最近的邻居样本进行预测的, 决策边界带有局部特性。SVM本质上是追求样本之间的最大间隔, 但是也倾向于处理局部化的决策边界, 特别是在使用径向基函数核(radial basis function kernel)时, 这种特征最为明显。虽然两者具有相对较高的误差相关系数, 但总体来说该模型各基学习器之间误差相关性较低, 能够较好的满足stacking集成学习模型对基学习器的多样性要求。

图10为不同模型的海洋哺乳动物声音分类混淆矩阵, 其中横坐标为预测值, 纵坐标为真实值。由图可知每个模型的分类表现各有优势, 例如模型KNN在分类PM (抹香鲸)时表现较差, 将26.68%的样本分类为了Gma (短鳍领航鲸); 但在分类类别BP (长须鲸)时拥有基学习器中最高的精确率。各个基学习器分类也具有一定规律, 如在类别PM (抹香鲸)和Gma (短鳍领航鲸)都出现了较为明显的错分类现象。被错分数量较多的类别之间通常具有相似的特征。如附录4所示, PM (抹香鲸)和Gma (短鳍领航鲸)

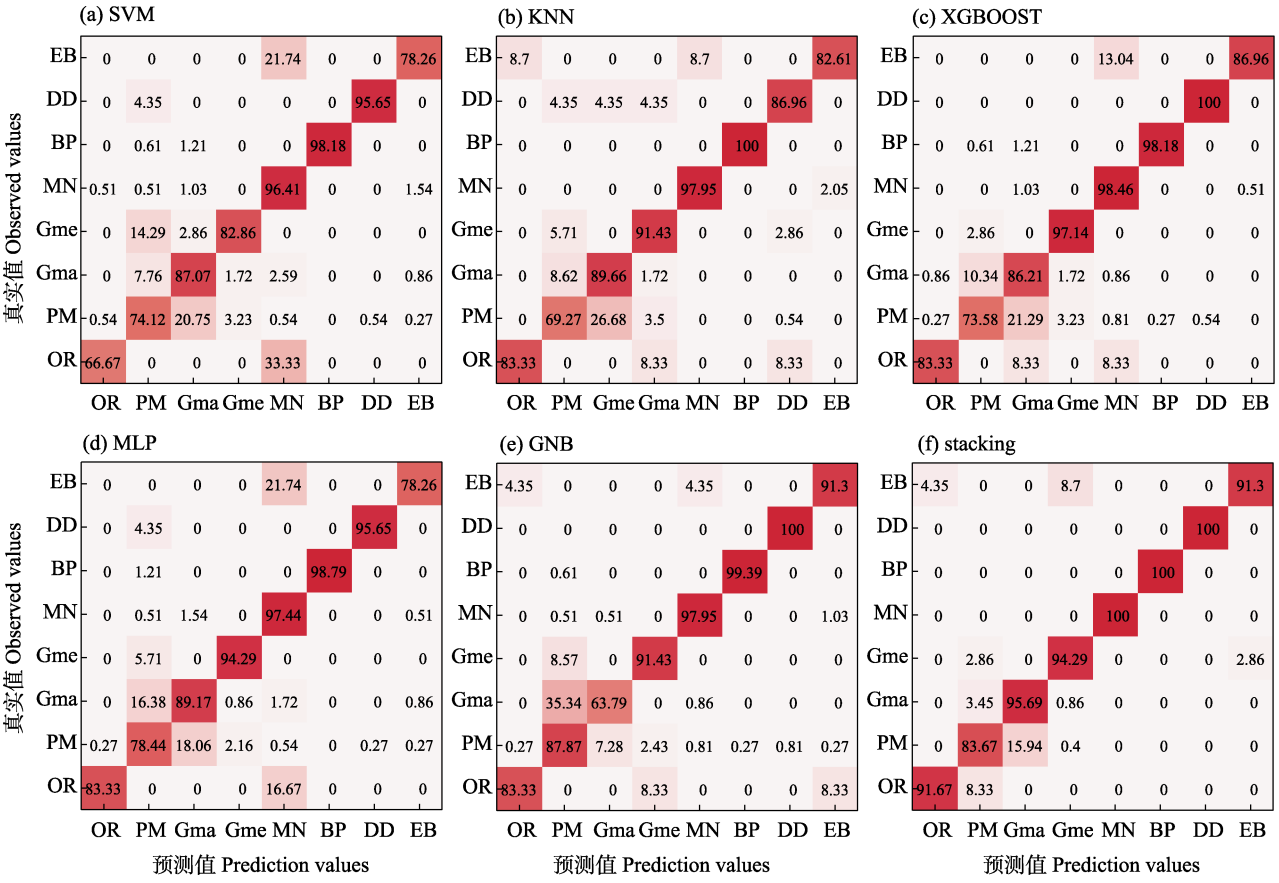


图10　不同模型的海洋哺乳动物声音分类混淆矩阵。OR: 海豕; **EB**: 髯海豹; **DD**: 真海豚; **Gme**: 长鳍领航鲸; **PM**: 抹香鲸; **MN**: 座头鲸; **BP**: 长须鲸; **Gma**: 短鳍领航鲸。**SVM**: 支持向量机; **KNN**: K近邻; **XGBOOST**: 极限梯度提升; **MLP**: 多层感知机; **GNB**: 高斯朴素贝叶斯; **stacking**: 堆叠集成学习。

Fig. 10　Confusion matrices for marine mammal sound classification using different models. OR, *Odobenus rosmarus*; EB, *Erignathus barbatus*; DD, *Delphinus delphis*; Gme, *Globicephala melas*; PM, *Physeter macrocephalus*; MN, *Megaptera novaeangliae*; BP, *Balaenoptera physalus*; Gma, *Globicephala macrorhynchus*. SVM, Support vector machine; KNN, K-nearest neighbors; XGBOOST, Extreme gradient boosting; MLP, Multilayer perceptron; GNB, Gaussian naive Bayes; stacking, Stacking ensemble learning.

的语谱图顶部区域都有明显的能量分布, 表现为较为明显的亮色带, 表明两种声音信号均存在相似的高频能量特征。此外, 这两个类别的语谱图中都呈现出明显的短促的、竖直分布的线状特征, 这种垂直线条表示短时脉冲声或咔哒声(clicks), 在频域上体现为瞬时的宽频特征, 且二者在出现频率、持续时间、周期性等方面极为接近。这种相似的特征结构使得分类模型在特征空间中难以准确区分两种类别的差异, 易产生误判现象。

精确率(precision)和召回率(recall)是评估分类模型性能的重要指标。如图11所示, 各物种在不同模型上的精确率和召回率存在明显的差异。其中, Gma (短鳍领航鲸)的精确率较低, 反映出模型在预测该物种时产生了较多误分类情况。这一现象与此前分析的语谱图特征相符。

此外, 从整体性能来看, 图11中stacking集成学习模型的精确率和召回率曲线在多数物种上均高于其他单一基学习器。这证明stacking集成学习模型在海洋哺乳动物声音分类的有效性, 通过综合多个不同结构和原理的基学习器的预测结果, 能够明显减小各单一模型所带来的预测误差, 从而增强模型的泛化能力, 提升整体的分类性能。

在分类较为困难、容易混淆的类别中, stacking模型的性能优势较为突出, 通过充分发挥每个基学器的优势, 舍弃个体分类器在测试集中预测较差的部分, 保留好的部分, 取长补短。不同模型的总体性能分析如表3。由表3可知, stacking模型各项性能指标相比基学习器都有显著优势, 平均在93%以上。其中ACC比最差的基学习器KNN高9.89%, 比最好性能最高的基学习器GNB高5.12%。

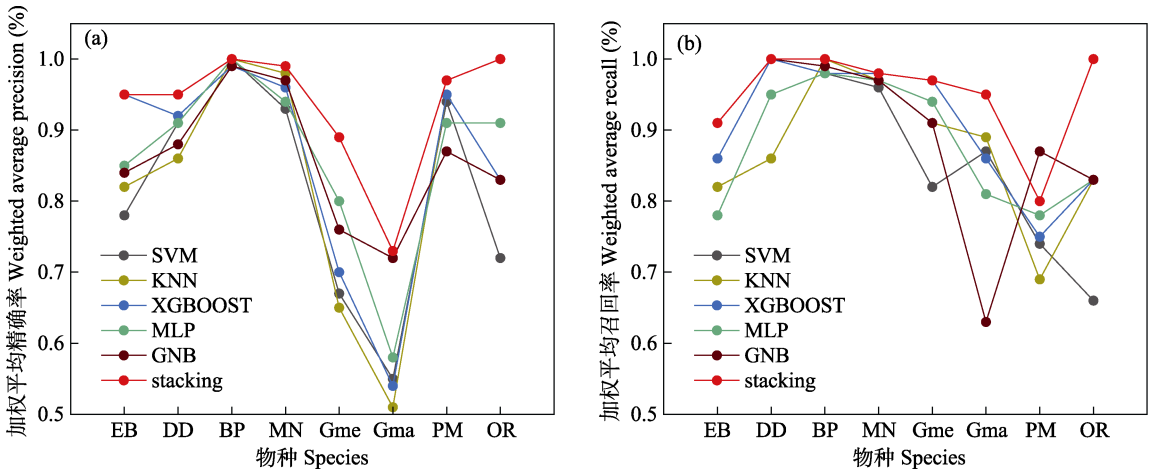


图11　不同模型的精确度(a)和召回率(b)对比。OR: 海象; **EB**: 须海豹; **DD**: 真海豚; **Gme**: 长鳍领航鲸; **PM**: 抹香鲸; **MN**: 座头鲸; **BP**: 长须鲸; **Gma**: 短鳍领航鲸。**SVM**: 支持向量机; **KNN**: K近邻; **XGBOOST**: 极限梯度提升; **MLP**: 多层感知机; **GNB**: 高斯朴素贝叶斯; **stacking**: 堆叠集成学习。

Fig.11　Comparison of precision and recall for different models. OR, *Odobenus rosmarus*; EB, *Erignathus barbatus*; DD, *Delphinus delphis*; Gme, *Globicephala melas*; PM, *Physeter macrocephalus*; MN, *Megaptera novaeangliae*; BP, *Balaenoptera physalus*; Gma, *Globicephala macrorhynchus*. SVM, Support vector machine; KNN, K-nearest neighbors; XGBOOST, Extreme gradient boosting; MLP, Multilayer perceptron; GNB, Gaussian naive Bayes; stacking, Stacking ensemble learning.

表3　各基学习器与stacking集成模型的分类性能对比

Table 3　Comparison of classification performance between base learners and the stacking ensemble model. SVM, Support vector machine; KNN, K-nearest neighbors; XGBOOST, Extreme gradient boosting; MLP, Multilayer perceptron; GNB, Gaussian naive Bayes; stacking, Stacking ensemble learning.

分类方法 Classification method	加权平均精确率 Weighted average precision (%)	加权平均召回率 Weighted average recall (%)	加权平均F1分数 Weighted average F1-score (%)	准确率 Accuracy (%)	Kappa系数 Kappa coefficient
支持向量机 SVM	88.44	85.43	85.98	85.32	0.81
K近邻 KNN	89.50	84.89	85.65	84.89	0.80
极限梯度提升 XGBOOST	89.89	86.60	87.17	86.60	0.82
多层感知机 MLP	89.07	87.33	87.23	87.23	0.83
高斯朴素贝叶斯 GNB	89.32	89.47	89.32	89.66	0.86
堆叠集成学习 stacking	94.81	93.78	93.93	94.78	0.92

3　结论

为了解决复杂海洋环境中声音信号的降噪与分类难题, 本文提出了一种基于改进型谱减法和stacking集成学习模型的低频海洋哺乳动物声音分类方法。通过对该方法的系统研究与实验验证, 取得了以下主要成果:

(1)通过引入VMD改进传统谱减法, 本研究实现了对海洋哺乳动物声音信号中高频和低频噪声的有效抑制, 同时保留了信号的重要特征。实验结果表明, 相较于传统方法(如MBSS、维纳滤波和NMF), 在低频信息保留和噪声抑制方面表现更优, 为后续特征提取和分类工作奠定了坚实基础。

(2)本研究结合Mel语谱图特征和时域、频域统计特征, 构建了多维度的声音信号特征。Mel语谱图通过模拟人类的听觉特性, 突出了哺乳动物的低频声学特征; 而统计特征弥补了时序信息的不足, 使特征更加全面完整。经CNN特征提取和LDA降维处理后, 通过特征融合, 组成了29维的特征向量。

(3)本文基于stacking模型充分利用各基学习器的优势。集成KNN、SVM、XGBOOST、MLP和GNB等多种异质基学习器, 并以LightGBM作为元学习器。实验结果显示, stacking模型的分类准确度达到94.78%, 相较于单一模型KNN、SVM、XGBOOST、MLP和GNB分别提高了9.89%、9.46%、8.18%、7.55%和5.12%, 平均提高了8.04%, 验证了该模型

在低频海洋哺乳动物声音分类任务中的优越性。

ORCID

曹莉凌 https://orcid.org/0000-0001-7761-7007
金朝阳 https://orcid.org/0009-0006-3725-3468

参考文献

An GP, Tong QB, Zhang YN, Liu RF, Li WL, Cao JC, Lin YY (2021) An improved variational mode decomposition and its application on fault feature extraction of rolling element bearing. Energies, 14, 1079.

Baltrušaitis T, Ahuja C, Morency LP (2019) Multimodal machine learning: A survey and taxonomy. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 41, 423–443.

Berouti M, Schwartz R, Makhoul J (1979) Enhancement of speech corrupted by acoustic noise. In: ICASSP'79 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing pp. 208–211. IEEE, Washington, DC.

Chen HL, Sun HX, Junejo NUR, Yang GS, Qi J (2019) Whale vocalization classification using feature extraction with resonance sparse signal decomposition and ridge extraction. IEEE Access, 7, 136358–136368.

Chen JJ, Zou DP, Sun H (2024) Overview of acoustic signal detection and recognition technology for marine mammals. Journal of Applied Acoustics, 43, 1170–1180. (in Chinese with English abstract) [陈俊杰, 邹大鹏, 孙晗 (2024) 海洋哺乳动物声信号检测与识别技术研究进展. 应用声学, 43, 1170–1180.]

Cunningham JP, Ghahramani Z (2015) Linear dimensionality reduction: Survey, insights, and generalizations. Journal of Machine Learning Research, 16, 2859–2900.

Darias-O'Hara AK, Booth CG, Erbe C, Isojunno S, Janik VM, Lucke K, Southall B, Tougaard J, von Benda-Beckmann AM, Verfuss UK (2025) Behavioural response thresholds for the assessment of noise impact on Antarctic marine mammal species. Marine Policy, 179, 106738.

Dragomiretskiy K, Zosso D (2014) Variational mode decomposition. IEEE Transactions on Signal Processing, 62, 531–544.

Gillespie D, Caillat M, Gordon J, White P (2013) Automatic detection and classification of odontocete whistles. The Journal of the Acoustical Society of America, 134, 2427–2437.

Hwangbo L, Kang YJ, Kwon H, Lee JI, Cho HJ, Ko JK, Sung SM, Lee TH (2022) Stacking ensemble learning model to predict 6-month mortality in ischemic stroke patients. Scientific Reports, 12, 17389.

Kim SY, Lee HM, Lim CY, Kim HW (2025) Detection of abnormal symptoms using acoustic-spectrogram-based deep learning. Applied Sciences, 15, 4679.

Li HL, Jin Y, Zhong JL, Zhao RX (2021) A fruit tree disease diagnosis model based on stacking ensemble learning. Complexity, 2021, 6868592.

Li YX, Li YA, Chen X, Yu J (2018) Research on ship-radiated noise denoising using secondary variational mode decomposition and correlation coefficient. Sensors, 18, 48.

Lu XG, Tsao Y, Matsuda S, Hori C (2013) Speech enhancement based on deep denoising autoencoder. Interspeech, 436–440.

Mallawaarachchi A, Ong SH, Chitre M, Taylor E (2008) Spectrogram denoising and automated extraction of the fundamental frequency variation of dolphin whistles. Journal of the Acoustical Society of America, 124, 1159–1170.

Shen XH, Li GY, Shi HF, Wang CZ (2024) Ensemble learning strategy for birdsong recognition under data imbalance. Biodiversity Science, 32, 24215. (in Chinese with English abstract) [申小虎, 李冠宇, 史洪飞, 王传之 (2024) 数据不平衡下鸟声识别的集成学习策略. 生物多样性, 32, 24215.]

Wang XQ, Jiang JJ, Duan FJ, Liang CJ, Li CY, Sun ZB, Lu RC, Li FY, Xu JY, Fu X (2021) A method for enhancement and automated extraction and tracing of Odontoceti whistle signals base on time-frequency spectrogram. Applied Acoustics, 176, 107698.

Yang S, Fan ZM, Zhang WX (2023) Tree species classification based on stacking monocular vision combined with parameter factor analysis. Journal of Forestry Engineering, 8(3), 173–181. (in Chinese with English abstract) [杨森, 樊仲谋, 张文宣 (2023) 基于Stacking单目视觉组合参数的树种分类研究. 林业工程学报, 8(3), 173–181.]

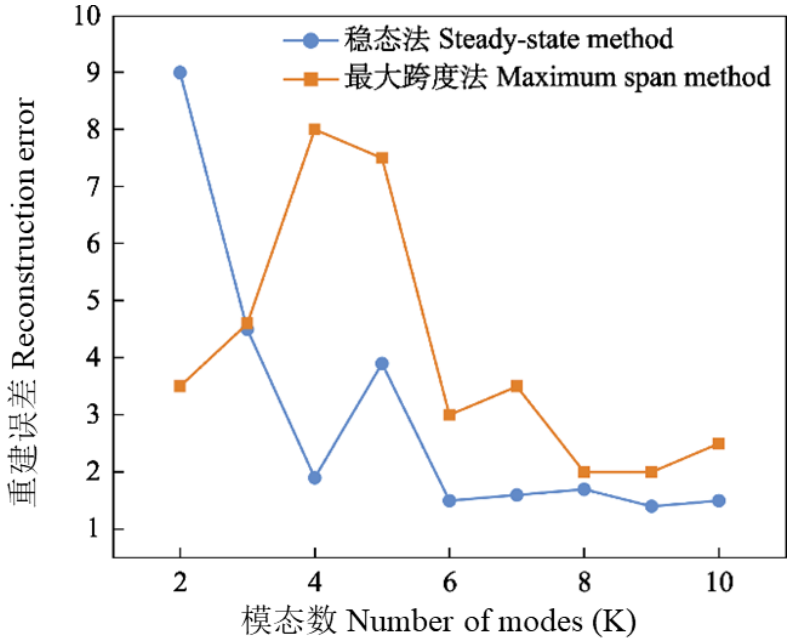
Zhang YY, Bai YS, Wen YT, Luo XY (2024) Whale sound signal denoising based on SVMD and improved wavelet thresholding. Measurement Science and Technology, 35, 097001.

Zheng YY, Li X, Chen YX, Zhao YN (2024) Short-term wind power forecasting method in extreme weather based on stacking multi-model fusion. High Voltage Engineering, 50, 3871–3882. (in Chinese with English abstract) [郑颖颖, 李鑫, 陈延旭, 赵永宁 (2024) 基于Stacking多模型融合的极端天气短期风电功率预测方法. 高电压技术, 50, 3871–3882.]

(责任编委: 肖治术　责任编辑: 李会丽)

附录　Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025228



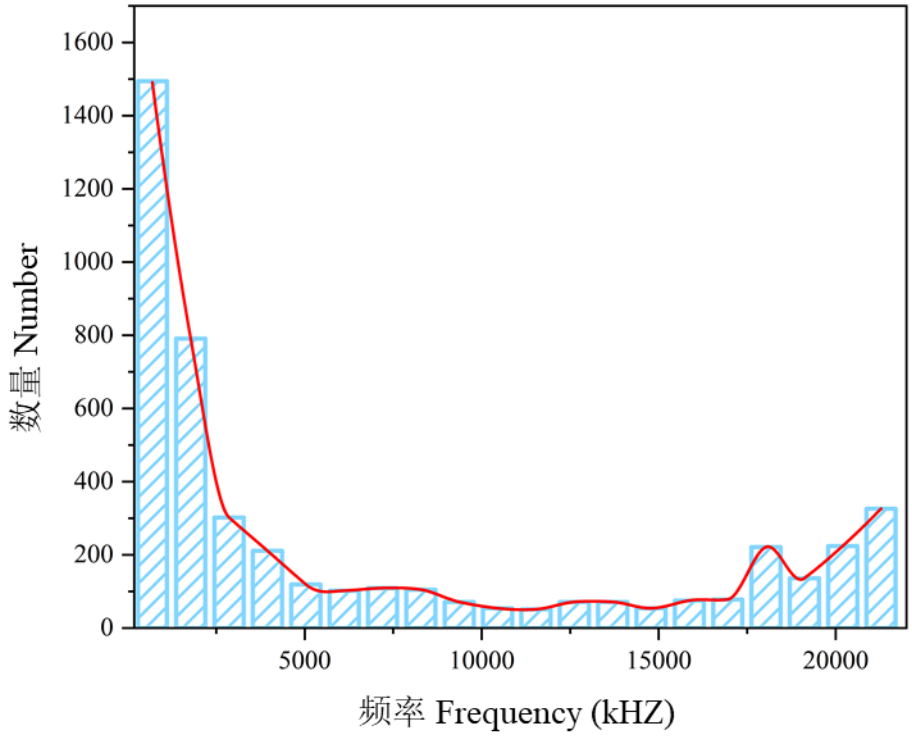
附录1　通过样本重建误差确定VMD最佳模态数K
Appendix 1　Sample reconstruction error for determining the optimal number of modes K

附录2　本研究选取的时域和频域统计特征以及海洋哺乳动物声音数据集的频率分布
Appendix 2 The time-domain and frequency-domain statistical features selected in this study, and the frequency distribution of the marine mammal sound dataset.

A　时域和频域统计特征
A　Time-domain and frequency-domain statistical features

统计特征 Statistical Features	特点 Feature
均方根能量（1维） Root mean square energy (1D)	计算信号的整体能量，代表信号的强度 Calculates the overall energy of the signal, representing the signal intensity
零交叉率（1维） Zero-crossing rate (1D)	计算信号波形穿过零点的次数，用于区分连续音和短促音 Counts the number of times the waveform crosses the zero axis, used to distinguish between continuous and impulsive sounds
振幅包络（1维） Amplitude envelope (1D)	计算信号最大值的变化趋势，反映了信号的响度特性 Extracts the trend of signal peak variations, reflecting the loudness characteristics of the signal
峰度（1维） Kurtosis (1D)	计算信号的尖锐程度，用于检测脉冲信号 Measures the "peakedness" of the signal distribution, utilized for detecting impulsive components
偏度（1维） Skewness (1D)	衡量信号分布的不对称性 Evaluates the asymmetry of the signal's statistical distribution
谱质心（1维） Spectral centroid (1D)	衡量频谱的重心位置，反映了音频的亮度 Locates the center of gravity of the spectrum, reflecting the perceived "brightness" of the audio
谱带宽（1维）	衡量频谱的分布范围，反映了音频的频谱复杂度程度

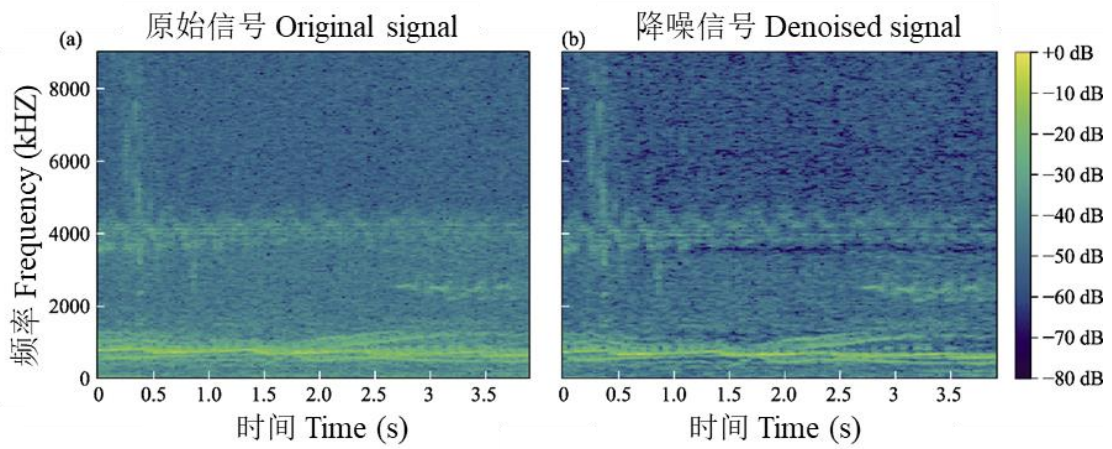
Spectral bandwidth (1D)	Measures the spread of the spectrum, indicating the spectral complexity of the audio
谱熵（1维）	衡量频谱的混乱程度
Spectral entropy (1D)	Quantifies the degree of disorder or complexity within the power spectrum
频谱滚降点（1维）	计算了高频能量的分布情况，反映了信号的频率分布
Spectral rolloff (1D)	Measures the frequency below which a certain percentage of the total spectral energy resides, reflecting the frequency distribution
MFCC 均值 & 标准差（13维）	计算MFCC的均值和方差，表征信号的整体频谱特征
MFCC mean & standard deviation (13D)	Calculates the mean and variance of MFCCs to characterize the overall spectral envelope and timbre



B 海洋哺乳动物声音数据集的频率分布图

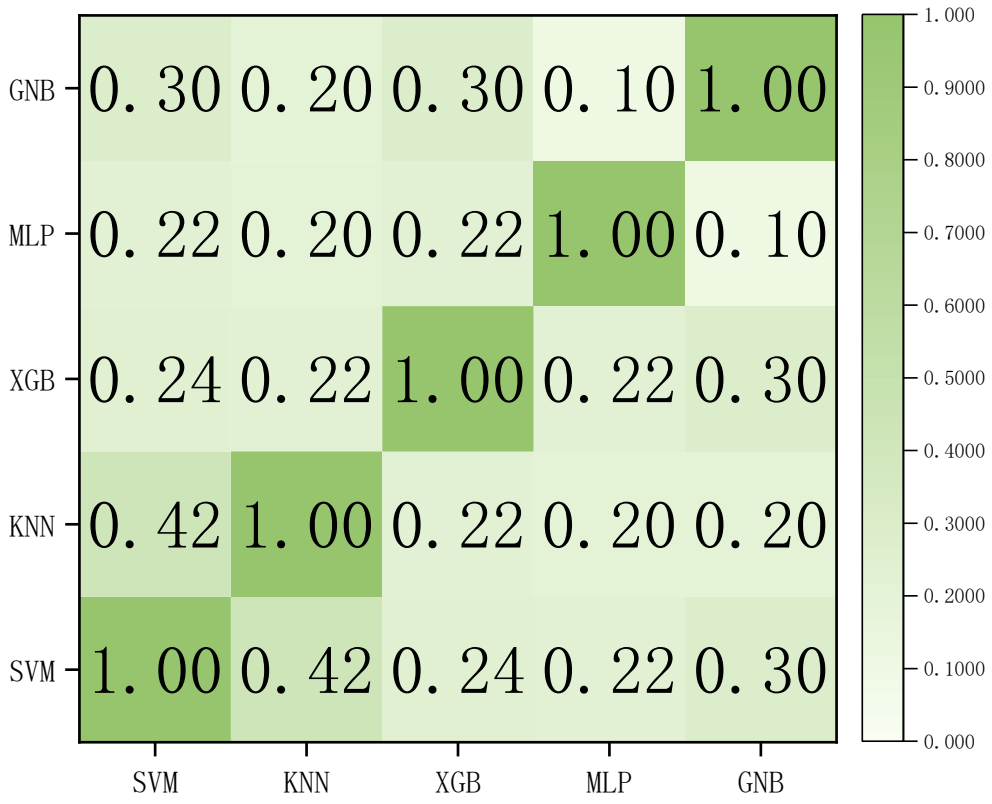
B Frequency distribution of the marine mammal vocalization dataset

曹莉凌, 金朝阳, 张铮, 曹守启 (2026) 基于改进型谱减法和 stacking 集成学习的低频海洋哺乳类动物声音分类. 生物多样性, 34, 25228. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods. 2025228.



附录3　样本降噪前后频谱图对比

Appendix 3　Comparison of sample spectrograms before and after noise reduction



附录4　基学习器预测误差皮尔逊相关系数图。SVM：支持向量机；KNN：K邻；XGBOOST：极限梯度提升；MLP：多层感知机；GNB：高斯朴素贝叶斯。

Appendix 4　Pearson correlation coefficients of base-learner prediction errors. SVM, Support Vector Machine); KNN, K-Nearest Neighbors; XGBOOST, eXtreme Gradient Boosting; MLP, Multilayer Perceptron; GNB, Gaussian Naive Bayes.

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25474, pages 1–15
doi: 10.17520/biods.2025474
cstr: 32101.14.biods.2025474

•技术与方法•

中国鸟类被动声学监测规范与建议

郝泽周[1], 申小莉[2], 斯幸峰[3,4], 赵岩岩[5], 魏晨韬[6], 吴飞[7], 许晓青[8], 阙品甲[9], 董路[10], 华方圆[11], 张立勋[12], 张承云[13*], 刘阳[14*]

1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 3. 浙江大学生命科学学院, 植被结构、功能与建造全国重点实验室, 生命系统稳态与保护教育部重点实验室, 杭州 310058; 4. 华东师范大学生态与环境科学学院, 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江舟山岛屿生态系统野外科学观测研究站, 崇明生态研究院, 华东师范大学全球变化与生态预测研究中心, 上海 200241; 5. 广西科学院生态环境研究所, 南宁 530007; 6. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510530; 7. 中国科学院昆明动物研究所, 昆明 650223; 8. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200000; 9. 成都大熊猫繁育研究基地, 珍稀濒危野生动物保护四川省重点实验室, 成都 610081; 10. 北京师范大学生命科学学院, 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京 100875; 11. 北京大学城市与环境学院, 生态研究中心暨植被结构功能与建造全国重点实验室, 北京 100871; 12. 兰州大学生态学院, 兰州 730000; 13. 广州大学电子与通信工程学院, 广州 510006; 14. 中山大学生态学院, 广东深圳 518107

摘要: 全球生物多样性正以前所未有的速度丧失。鸟类作为分布广、多样性高的动物类群, 其种群动态及驱动因素可为生物多样性保护和管理提供支撑。被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)作为一种非侵入式、高时空分辨率的监测技术, 为大规模、长时序的鸟类多样性同步调查提供了革命性工具。近年来, 被动声学监测在全球取得了快速发展。然而, 当前中国在该领域的应用呈现出项目分散、设备异构、方法不一的“数据孤岛”困境, 严重制约了数据的整合、比较与宏观决策支持能力。本研究系统梳理了在全球鸟类多样性丧失的大背景下, 鸟类被动声学监测的需求; 并对比分析了国内外鸟类被动声学监测的技术发展、网络建设与数据共享经验, 剖析了中国因缺乏统一规范所面临的核心挑战。在此基础上, 借鉴了国内外优秀的被动声学监测实践案例, 提出一套适用于中国的鸟类被动声学监测规范体系框架, 涵盖了从监测设计、核心技术参数、元数据标准到数据处理与分析的全流程。最后, 从顶层设计、网络建设、技术创新、数据共享与政策保障等多个方面, 提出了具有可操作性的行动建议与路线图。本研究旨在为构建中国标准化、网络化、智能化的鸟类声学监测体系提供科学蓝图与实施指南。

关键词: 被动声学监测; 鸟类多样性; 监测规范; 数据标准化; 生态声学

郝泽周, 申小莉, 斯幸峰, 赵岩岩, 魏晨韬, 吴飞, 许晓青, 阙品甲, 董路, 华方圆, 张立勋, 张承云, 刘阳 (2026) 中国鸟类被动声学监测规范与建议. 生物多样性, 34, 25474. doi: 10.17520/biods.2025474; cstr: 32101.14.biods.2025474.
Hao ZZ, Shen XL, Si XF, Zhao YY, Wei CT, Wu F, Xu XQ, Que PJ, Dong L, Hua FY, Zhang LX, Zhang CY, Liu Y (2026) Standards and recommendations for passive acoustic monitoring of birds in China. Biodiversity Science, 34, 25474. doi: 10.17520/biods.2025474; cstr: 32101.14.biods.2025474.

Standards and recommendations for passive acoustic monitoring of birds in China

Zezhou Hao[1], Xiaoli Shen[2], Xingfeng Si[3,4], Yanyan Zhao[5], Chentao Wei[6], Fei Wu[7], Xiaoqing Xu[8], Pinjia Que[9], Lu Dong[10], Fangyuan Hua[11], Lixun Zhang[12], Chengyun Zhang[13*], Yang Liu[14*]

1 *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China*
2 *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*
3 *State Key Laboratory of Vegetation Structure, Functions and Construction (VegLab), MOE Key Laboratory of Biosystems Homeostasis & Protection, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*
4 *Zhejiang Tiantong Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Zhejiang Zhoushan Island Ecosystem Field*

收稿日期 Received: 2025-11-25; 接受日期 Accepted: 2026-03-06
基金项目: 国家自然科学基金(32571817; 32171520)、黄龙自然保护地综合科学考察报告编制项目、广东林业局专项“南岭国家公园生物多样性综合科学考察”和广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515240076) Supported by the National Natural Science Foundation of China (32571817; 32171520), Comprehensive Scientific Survey of Huanglong Nature Protected Area, Project of Guangdong Forestry Bureau: “Comprehensive Scientific Survey of Biodiversity in Nanling National Park”, and Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515240076)
* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: cyzhang@gzhu.edu.cn; liuy353@mail.sysu.edu.cn

Observation and Research Station, Institute of Eco-Chongming, Centre for Global Change and Ecological Forecasting, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China
5 *Institute of Eco-Environmental Research, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China*
6 *South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China*
7 *Kunming Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China*
8 *College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200000, China*
9 *The Conservation of Endangered Wildlife Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Research Base of Giant Panda Breeding, Chengdu 610081, China*
10 *Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
11 *Institute of Ecology and State Key Laboratory of Vegetation Structure, Functions and Construction (VegLab), College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*
12 *College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
13 *School of Electronics and Communication Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China*
14 *School of Ecology, Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong 518107, China*

ABSTRACT

Background & Aims: Global biodiversity is declining at an unprecedented rate. As a widespread and diverse taxonomic group, birds are crucial indicators, and understanding drivers and consequences of their population dynamics is vital for biodiversity conservation. Passive acoustic monitoring (PAM), a non-invasive technique with high spatiotemporal resolution, offers a revolutionary tool for large-scale, long-term avian diversity surveys. Despite the rapid development of PAM globally, its application in China is currently hampered by scattered projects, heterogeneous equipment, and inconsistent methodologies. This has resulted in a "data island" dilemma, significantly hindering data integration and comparability and limiting the utility of these data for biodiversity policy and conservation. This study aims to provide a scientific blueprint and implementation guide for establishing a standardized, networked, and intelligent avian acoustic monitoring system in China.

Method & Results: We systematically reviewed the corresponding urgent needs of PAM in light of the global loss of avian biodiversity. We then compared and analyzed the technical development, network construction, and data-sharing experiences of avian PAM both internationally and domestically, identifying the core challenges China faces due to the lack of unified standards. Drawing on successful international PAM practices, we propose a comprehensive framework of standards suitable for China. This framework covers the entire workflow, from monitoring design and core technical parameters to metadata standards and data processing and analysis.

Perspectives: Finally, we present a series of actionable recommendations and a strategic roadmap for future implementation. These proposals address multiple facets, including top-level design, national network construction, technological innovation, data sharing mechanisms, and essential policy support, charting a clear course for the future of avian acoustic monitoring in the nation.

Key words: passive acoustic monitoring; bird diversity; monitoring standards; data standardization; ecoacoustics

在全球生物多样性丧失加速与生态系统功能退化的宏观背景下, 作为环境变化敏感指示物种的鸟类正面临空前生存压力。因此, 如何实现高效、标准化的鸟类多样性监测, 不仅是单一类群保护的需求, 更已成为全球生态保护与科学研究的核心议题。被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)作为一种非侵入式、自动化的生物多样性监测技术, 近年来在全球鸟类多样性研究中迅速推广, 正展现出强大的数据获取能力与广泛的生态应用价值。在中国, 随着鸟类保护工作的持续推进, 亟须发展与我国国情相适应的、科学规范的被动声学监测体系, 以支撑生物多样性保护与关键物种评估, 并服务于《生物多样性公约》及其《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》相关目标的落实。

鸟类是生态系统中对环境变化高度敏感的指示类群, 然而其多样性正遭受空前威胁。全球约48%的鸟种数量呈下降趋势, 仅有6%的物种数量在增加(Lees et al., 2022)。北美地区在过去50年间减少了近30亿只繁殖鸟类(Rosenberg et al., 2019), 全球鸟类数量自1500年以来下降了20%–25% (Şekercioğlu et al., 2004)。针对IUCN受胁物种的分析表明, 人类对资源的过度开发是导致鸟类多样性丧失的首要因素(Maxwell et al., 2016)。具体而言, 驱动这一趋势的核心因素包括农业扩张和集约化(Rigal et al., 2023; Tscharntke & Batáry, 2023)、栖息地丧失和破碎化、气候变化、城市化和环境污染

(Donald et al., 2006; Newbold et al., 2015)。鸟类种群衰退也削弱了其传粉、种子传播、害虫控制等生态功能(Whelan et al., 2015)。

中国是世界鸟类多样性最丰富的国家之一, 横跨古北界与东洋界, 拥有1,500多种鸟类(郑光美, 2023), 有东亚-澳大利西亚等4条迁飞通道跨越我国(Yong et al., 2021)。然而, 城市化、农业扩张和基础设施建设等人类活动对鸟类栖息地构成持续威胁。面对这些挑战, 我国已将鸟类保护纳入国家生态保护战略布局, 在中国生物多样性保护的总体框架下, 逐步形成了面向鸟类的专项行动与政策体系。近年来, 通过发布与实施《国家重点保护野生动物名录》《陆生野生动物重要栖息地名录(第一批)》《候鸟迁飞通道保护修复中国行动计划(2024–2030年)》等举措, 加强了重点鸟类物种及其关键栖息地的系统保护。这些保护政策的有效落地与成效评估, 需建立在对鸟类多样性现状和动态变化的全面认知基础上。近年来, 我国在鸟类大尺度监测方面已取得显著进展, 多项研究基于多源观测数据系统揭示了中国鸟类多样性的时空演变格局(Li et al., 2013; He et al., 2025), 为保护决策提供了重要依据。因此, 发展并规范适用于中国鸟类多样性和分布特点的监测方法, 不仅是科学研究的需要, 更是服务国家生态文明战略、提升生物多样性保护能力的紧迫任务。

声学信号(acoustic signals)为鸟类多样性监测提供了独特的视角。对于鸟类等高度依赖声音通讯的类群而言, 其鸣声是执行领地防御、求偶、物种识别及社会交流等关键生命活动的基础。这些声学信号通常具有高度的物种特异性(species-specificity), 使其成为物种识别和种群丰度评估的可靠指标(Sugai et al., 2019)。鸟类鸣声(sound)在物种间具有显著的声纹(spectrotemporal signature)差异。每种鸟类的鸣唱(song)和鸣叫(call)都在频率、时长和音节结构上具有独特的、可量化的模式, 这种高度的物种特异性为基于机器学习(特别是深度学习)的自动识别算法提供了可靠的数据基础, 使得从复杂的声景数据中精确检测、分离和识别物种成为可能(Stowell, 2022)。鸟类的发声行为具有显著的鸣唱节律(temporal patterns), 如“黎明大合唱”(dawn chorus)等特有的昼夜活动规律。被动声学监测技术契合了捕捉这些时间动态的需求, 这对于传统的人工调查几乎是不可能完成的(Aide et al., 2013)。因此, 正是这种鸟类鸣声特征与PAM技术的天然匹配性, 使得声学监测成为当前鸟类多样性研究中潜力巨大的新方法。

PAM通过自动录音设备(autonomous recording units, ARUs), 实现对自然环境中声景(包括鸟类鸣声)的长期、连续记录。面对日益复杂的生态研究与保护需求, PAM相比于传统调查方法具备显著优势: 可减少人为干扰、提升夜间或隐蔽时段的记录能力(Wimmer et al., 2013; Shonfield & Bayne, 2017), 实现高时空分辨率的观测(Hill et al., 2018), 并生成可溯源、可复用的数字化数据资产(Gibb et al., 2019)。其在评估物种丰富度、占域动态、物候变化及声景完整性等领域已表现出高度适应性和广泛应用前景(Sueur & Farina, 2015)。尽管PAM技术潜力巨大, 但其科学效能的充分发挥, 有赖于数据的标准化(Michener & Jones, 2012)。标准化应覆盖数据采集、处理、存储及共享全过程, 并遵循“FAIR”原则, 即可发现(findable)、可访问(accessible)、可互操作(interoperable)和可重复使用(reusable) (Wilkinson et al., 2019)。对于生物多样性监测而言, 标准化不仅提升了数据的可比性与可共享性, 还促进跨尺度分析与管理决策的科学性(Reichman et al., 2011; Hampton et al., 2013)。因此, 构建科学、统一的PAM规范体系, 是推动我国鸟类多样性保护由分散走向系统、由研究成果走向保护落地的关键一步。

1 鸟类被动声学监测的技术发展与国际实践经验

PAM技术的发展历程可划分为3个阶段: 早期依赖磁带录音的探索期, 21世纪初的数字化转型期, 以及近十年以人工智能为核心的智能化升级期。硬件层面, 自2007年以来, Wildlife Acoustics发布了专门为野外工作设计的商业化、一体式、数字声学记录仪(song meter SM1), 这标志着ARU从实验室自制走向商业化普及的开始, 使得鸟类的全天候、长期、非侵入式监测成为可能。关键声学与硬件指标(如麦克风灵敏度、信噪比、功耗控制和供电技术等)的持续优化, 显著提升了设备在复杂野外环境中的

稳定性与续航能力, 推动被动声学监测从研究型应用走向大规模部署(Roe et al., 2021)。技术变革的核心驱动力来自数据分析端的突破。被动声学监测所产生的海量声学数据通常达到TB甚至PB级别, 远超人工分析的处理能力, 推动了计算生物声学(Computational Bioacoustics)的快速发展(Stowell, 2022)。目前, 数据分析主要有两条路径: 一是采用声学指数(acoustic indices)分析。该方法通过计算声景的复杂度、均匀度或生物声能等统计指标, 来快速评估群落水平的多样性, 尤其适用于宏观尺度和长期趋势的分析(Alcocer et al., 2022)。二是基于机器学习的物种自动识别。自2016年在BirdCLEF挑战赛等活动中取得突破以来, 深度学习(deep learning)技术凭借其在图像识别中的成功应用, 被迅速迁移到声音识别任务中。基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)等框架的模型能够直接从音频频谱图中学习复杂的物种声学特征, 实现高精度的自动识别(Kahl et al., 2021)。然而, 若缺乏统一的采样规范与合理的录音策略, 盲目部署将产生海量的冗余数据。这不仅造成存储空间与算力资源的巨大浪费, 更因大规模模型训练与推理过程中的能量消耗, 限制了被动声学监测网络的可持续发展。

目前, 国际上基于被动声学技术的生物多样性监测与评估项目, 已逐渐从零散的物种调查向标准化、网络化的长期监测体系演变。根据监测目标与功能范式的不同, 现有的代表性网络主要可分为3类(表1): 一是以构建大尺度声学基建为目标的“基础设施型”网络。典型的案例包括Australian Acoustic Observatory (A2O, https://acousticobservatory.org/)与欧洲的Transnational Acoustic Biodiversity Monitoring Network (TABMON, https://www.nina.no/english/TABMON)项目。A2O在大洋洲部署了400多个被动声学监测点, 通过建立统一的“传感器-云端”协议, 实现了大陆尺度的声景监测; TABMON致力于构建跨越欧洲多国的标准化监测体系, 旨在将被动声学

表1 国际代表性鸟类被动声学监测网络与项目对比

Table 1 Comparison of representative international passive acoustic monitoring networks and projects

网络类型 Network type	项目名称 Project name	所在区域 Region	核心监测目标 Core monitoring objective	标准化与元数据策略 Standardization & metadata strategy
基础设施型 Infrastructural	Australian Acoustic Observatory (A2O)	大洋洲 Oceania	建立大陆尺度的长时序声景基准, 评估生态系统健康 To establish a continental-scale, long-term soundscape baseline for assessing ecosystem health	全流程标准化: 统一采用太阳能传感器, 执行连续录音协议及统一的云端存储工作流 Full-process standardization: Using unified solar-powered sensors, continuous recording protocols, and a unified cloud storage workflow
	Transnational Acoustic Biodiversity Monitoring Network (TABMON)	欧洲 Europe	构建跨越欧洲多国的昆虫、鸟类与蝙蝠自动化监测网络 To build an automated monitoring network for insects, birds, and bats across multiple European countries	跨国协议标准化: 制定适用于不同国家的通用设备部署指南与数据处理工作流 Transnational protocol standardization: Developing common equipment deployment guidelines and data processing workflows applicable to different countries
梯度响应型 Gradient-based	Soundscape Baseline Project	北美洲 North America	监测气候变化背景下的声景物候与声学多样性演变 To monitor the evolution of soundscape phenology and acoustic diversity under climate change	梯度标准化: 沿纬度梯度设置标准样地, 统一记录微生境结构与温度等环境元数据 Gradient standardization: Establishing standardized plots along latitudinal gradients, with unified recording of microhabitat structure and environmental metadata
	Stability of Altered Forest Ecosystems (SAFE) Project	亚洲 Asia	评估土地利用变化(雨林砍伐与油棕种植)对生物多样性的影响 To assess the impact of land-use change (deforestation and oil palm plantation) on biodiversity	实验设计标准化: 采用“原始林-采伐林-人工林”全梯度设计, 严格控制录音时间与频次 Experimental design standardization: Adopting a full-gradient design from old-growth to plantation forests, strictly controlling recording timing and frequency
技术融合型 Multi-source data integration	Soundscapes to Landscapes (S2L)	北美洲 North America	结合声学与遥感数据(LiDAR/卫星), 绘制区域生物多样性地图 To map regional biodiversity by integrating acoustic data with remote sensing (LiDAR/satellite)	多源融合标准化: 统一声学采样阵列, 并与遥感影像的空间分辨率进行时空对齐 Multi-source fusion standardization: Unifying acoustic sampling arrays and aligns them spatiotemporally with the spatial resolution of remote sensing imagery

技术整合进现有的常规监测框架中, 通过统一的采录设备与工作流, 填补昆虫、鸟类及蝙蝠种群在跨国界尺度上的数据空白。二是以评估环境变化响应为核心的“梯度响应型”网络。例如, 美国威斯康星大学主导的Soundscape Baseline Project (https://www.soundforestlab.org/soundscapebaselines)与牛津大学主导的Stability of Altered Forest Ecosystems (SAFE)项目, 分别针对气候变化与土地利用强度的环境梯度建立了标准化样地, 通过长期定点录音揭示了生物群落对环境压力的系统性响应(Ewers et al., 2011)。三是致力于多源数据协同的“技术融合型”网络。美国的Soundscapes to Landscapes (S2L, https://soundscapes2landscapes.org/)项目, 探索了声学数据与卫星遥感、激光雷达(LiDAR)的深度融合机制, 证明了标准化声学数据在区域生物多样性制图中的价值。

2 中国鸟类被动声学监测的发展现状与核心挑战

2.1 中国PAM网络建设现状

我国鸟类声学研究经历了从“人工主动录音”向“自动化被动监测”的技术演进与融合。在20世纪80年代至21世纪初的探索阶段, 研究主要依赖便携式录音设备进行主动采集, 重点聚焦于鸣禽的鸣声结构解析与行为学功能研究, 为物种鸣声鉴定与行为生态学积累了高质量的基础声学资料(卢汰春等, 1986; 韩联宪等, 1988; 姜仕仁等, 1996)。近十年来, 随着传感器技术与人工智能算法的突破, 无需人工值守的PAM技术作为主动监测的重要补充迅速兴起(赵莹等, 2020, 边琦等, 2021)。PAM技术不仅能够实现对单一目标物种的长时序自动跟踪, 更将研究视野拓展至群落与生态系统层面, 使得在更大时空尺度上开展生物多样性评估与声景生态学研究成为可能。

目前, 融合PAM技术的监测体系已开始在中国的城市绿地、自然保护区与国家公园等多种生态系统中广泛应用, 逐步构建起多尺度鸟类多样性研究体系。在区域尺度, 研究聚焦于城市声景评估、绿地格局分析、湿地鸟类动态监测、群落多样性评估(王士政等, 2023; Han et al., 2024; 李乐等, 2024)和国家公园的生物多样性监测(廖之锴等, 2025)。在保护地尺度, 已有研究揭示了鸟类鸣声在声景结构与生态健康监测中的核心作用, 强调声学指数在长期监测体系中的适用性(覃远玉等, 2023; 孙翊斐等, 2023; 许晓青等, 2023)。在算法与设备层面, 相关工作推进了无监督学习模型、机器学习算法及设备性能比较研究, 提升了PAM技术在小样本和稀有种识别中的应用能力(申小虎等, 2023; 吴科毅等, 2023; 张梓欣等, 2024)。同时, 也有研究从系统视角出发, 提出构建标准化声学平台与数据共享机制, 推动跨区域长期监测网络建设(Mammides et al., 2017; 何凯莹等, 2024)。

与国际上比较成熟的PAM体系相比, 目前国内的整体发展仍呈现出碎片化与非标准化特征。一方面, 不同项目通常围绕各自的科研目标独立开展, 缺乏统一的长期监测战略与协同机制; 另一方面, 设备性能与录音参数差异较大, 音频文件命名规则与元数据记录方式也未形成通用规范。一定程度上反映了监测数据产权归属不清、缺乏统一监测标准等局限性。这种跨区域、跨部门的数据整合与共享挑战, 需要凝聚技术共识、依托国家层面的政策统筹与支撑, 才能充分发挥PAM在生物多样性监测与保护方面的重大应用价值。

与全球生物多样性信息机构(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)、eBird等平台相比, 我国尚未建立统一的数据标准与共享机制, 也缺乏将分散项目成果汇聚为国家级数据库的路径。尽管中国已建成如中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)等国家级监测平台, 并设有鸟类监测专项网(马克平, 2015; 冯晓娟等, 2019), 但在被动声学监测这一具体技术领域, 尚未形成覆盖广泛、规范统一的数据标准与技术体系。特别是近年来, 随着被动声学监测技术的兴起, 已有部分自然保护区开始探索并建立声学监测体系, 但受限于缺乏专业的数据分析能力与共享机制, 导致海量录音文件积压且未能转化为有效信息, 产生了大量冗余数据并造成存储与算力资源的巨大浪费。总体而言, 我国PAM的发展尚处于“探索性与研究导向”阶段, 需进一步推进“监测网络化与技术规范化”, 在标准统一、数据共享、质量控制和公众参与等方面协同发力, 使声学监测真正融入鸟类多样性保护与研究的长期体系。

2.2 技术规范化的核心挑战

当前我国鸟类被动声学监测缺乏统一的技术与元数据规范, 导致各项目收集的数据不具有可比性。由于缺乏统一的录音采样协议, 不同项目使用的被动声学监测设备在麦克风灵敏度、频率响应、增益设置、采样率和文件格式等硬件的底层参数上差异巨大。同时, 实际采样过程中, 针对不同环境条件(如森林、湿地、城市等)设计的麦克风朝向、部署高度、矩阵排列和灵敏度校准等野外部署策略也缺乏规范。以上因素会直接导致声压、频谱分辨率等关键特征指标缺乏可比性(Kemp et al., 2025)。

这种基础数据的异质性直接削弱了监测结果的代表性与分析方法的有效性, 且相关影响已被多项定量研究证实。首先, 采样时长的随意性会导致种群估算产生巨大的随机误差, 单日随机监测的种群丰度指标变异系数高达100%, 只有将标准化监测延长至6–9 d才能将误差控制在20%以内(Pérez-Granados et al., 2019), 且设备探测半径的差异会导致种群密度在不同样点间完全无可比性(Pérez-Granados & Traba, 2021); 其次, 声学指数在不同设备和环境下产生严重偏差, 参数的不一致甚至会导致指数与物种丰富度的相关性从显著正相关变为显著负相关(Bradfer-Lawrence et al., 2019; Michielsen et al., 2025); 数据的高度差异化也削弱了鸟鸣识别等AI模型的迁移性与通用性, 基础数据的异质性会构成深度学习中的域漂移(domain shift)效应。当模型在不同区域的声景数据间迁移时, 受鸟类鸣声方言与录音背景差异的影响, 基准模型的识别准确率可能出现40%的下降(Ding et al., 2025)。此外, 不同背景噪声水平下, 同一物种的有效探测率可能从90%骤降至10% (Marshall-Hawkes et al., 2025)。在缺乏标准化的框架下, 大量积累的历史数据因格式混乱、缺乏元信息而沦为“数据孤岛”, 导致生态声学监测的累积价值随时间迅速衰减(Reichman et al., 2011)。

这一系列技术和方法的不统一, 在一定程度上削弱了声学监测数据在宏观政策制定中的支撑能力。保护地布局优化、濒危物种动态预警、重大生态工程的成效评估等均依赖跨区域、长期、标准化的数据输入。当前以项目为单位的分散式采样与非结构化存储方式, 无法构建跨地域、长时间的鸟类多样性动态监测体系, 也不具备参与生态文明顶层设计的能力。上述问题与我国红外相机监测的发展初期情况相似。由于各地监测标准不一、数据无法共享等原因, 难以整合出跨区域尺度的宏观种群动态模型(McShea et al., 2020)。随着红外相机标准与数据平台体系的建立, 跨区域数据整合与国家尺度评估才逐步成为可能, 形成了政策与科研深度融合的范式(李晟, 2020)。上述经验表明, 若要推动中国鸟类被动声学监测从实验性走向系统性, 需要尽快建立统一的数据采集标准、格式规范、质量控制流程与共享机制。

3 中国鸟类被动声学监测规范体系框架

为应对上述挑战, 我们整合中国鸟类鸣声监测的研究案例, 借鉴国际优秀实践, 构建了一套涵盖方案设计、设备规范、安装维护、数据分析及数据共享全流程的中国鸟类被动声学监测规范框架(图1)。该框架的具体技术指标与操作指南详见附录1。

3.1 监测目标与设计原则

被动声学监测的首要前提是明确其科学目标, 不同目标将直接影响监测方案的设计与数据解读路径。常见的目标包括: 评估鸟类群落多样性与群落结构; 聚焦关键物种(如旗舰种、指示种或濒危种)的占域、分布与活动节律; 开展物候研究, 揭示鸣声活动的节律变化, 如迁徙或繁殖期的鸣唱高峰; 以及通过声学指标评价生态干扰状况(Sueur & Farina, 2015)。

围绕这些目标, 监测设计需遵循科学采样原则, 确保数据的空间代表性与统计效力(Sugai et al., 2019)。在空间布设方面, 应优先采用分层随机或系统性布点方法, 覆盖主要生境类型、海拔梯度与人类干扰梯度, 保持监测点间距以减少数据之间的相关性, 保证后续统计模型的有效性(Blumstein et al., 2011; Darras et al., 2019)。在监测日程方面, 建议监测周期至少涵盖一个完整生物学年度, 从而涵盖鸟类繁殖、迁徙与越冬等关键生活史阶段; 每日录音时间应确保覆盖鸟类晨昏鸣唱等高活动时段。在此基础上, 关键时期(如繁殖季)延长监测时长或增加监测点位, 将有助于提升稀有物种的探测概率与占域建模的准确性(MacKenzie et al., 2017); 对于特殊习性的类群(比如鸮类、夜鹰等)和夜间迁徙的鸟类,

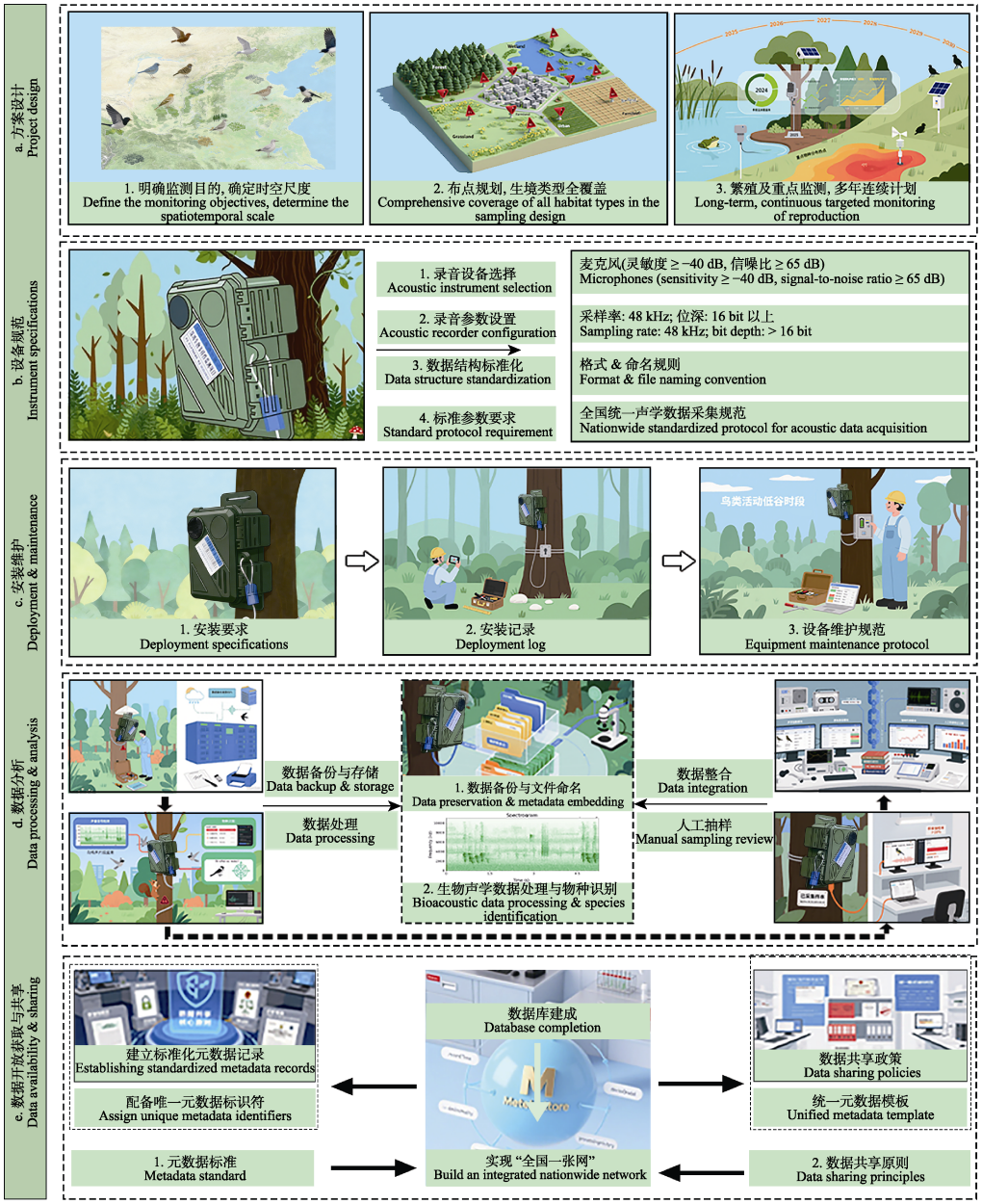


图1 中国鸟类被动声学监测规范体系框架。**a.** 方案设计: 明确监测目的, 布设点位需覆盖主要生境类型, 保持足够空间间距, 监测周期覆盖至少一个完整自然年。**b.** 设备规范: 推荐使用高性能自动录音设备和全向麦克风, 录音参数(采样率、位深)与文件格式需统一, 全国范围采用一致的命名与参数标准。**c.** 安装维护: 设备应按规范高度与方向安装并加以保护, 现场拍照记录布设情况, 并定期维护与更换电池、存储卡, 同时做好元数据记录。**d.** 数据分析: 录音数据需及时备份与分层存储, 结合自动化声学检测与物种识别模型开展分析, 并辅以人工抽样核实, 结果与原始录音通过唯一ID关联。**e.** 数据开发获取与共享: 建立统一的元数据标准和唯一标识符, 遵循“谁采集、谁受益、分类开放”的原则, 推动形成“全国一张网”的鸟类声学监测数据共享体系。

Fig. 1 The standardized workflow for the passive acoustic monitoring of birds in China. a. Project design: Clarify monitoring objectives. Deployment sites should cover major habitat types and be separated by sufficient spatial distance. The monitoring period should span at least one complete biological year. b. Instrument specifications: High-performance autonomous recording units (ARUs) with omnidirectional microphones are recommended. Recording parameters (e.g., sampling rate, bit depth) and file formats must be standardized, and a consistent nationwide naming convention and parameter standards should be adopted. c. Deployment & maintenance: Devices should be installed at a standard height and orientation and be properly secured. Document the deployment with on-site photographs. Conduct regular maintenance, including replacing batteries and memory cards, while meticulously recording all relevant metadata. d. Data processing & analysis: Acoustic data must be backed up promptly and stored hierarchically. Analysis should combine automated acoustic detection and species identification models with manual validation via sampling. All results must be linked back to the original recordings through a unique identifier (ID). e. Data availability & sharing: Establish unified metadata standards and unique identifiers. Adhere to a tiered access policy that benefits data contributors, promoting the development of an integrated nationwide network for sharing avian acoustic monitoring data.

根据调查需求增加特定时间段的调查取样。

3.2 核心技术规范

为确保全国范围内被动声学监测数据的可比性与可整合性, 我们建议开展被动声学鸟类监测的项目遵循一套统一的核心技术参数, 这些参数构成数据标准化的基础(表2)。设备方面, 建议选用长续航、可编程的自动录音设备。现有实证研究表明, 硬件参数的微小差异可能显著改变监测数据的统计特征。例如, 麦克风灵敏度的衰减被证实会导致有效探测面积呈非线性缩减, 仅5 dB的灵敏度下降即可导致探测面积减少约25%, 严重削弱了不同样点间种群密度数据的可比性(Turgeon et al., 2017); 而设备信噪比的高低直接决定了对微弱鸣声信号的捕捉能力, 高信噪比设备在同等条件下记录到的生物发声活动量可达低端设备的1.6倍(Darras et al., 2020)。此外, 采样率的统一不仅是保障AI模型泛化能力的前提, 更是确保声学指数能正确反映物种丰富度梯度的关键, 参数设置的差异可能导致生物多样性评估结果出现完全相反的统计趋势(Michielsen et al., 2025)。

为保证数据的标准化和跨区域可比性, 本研究建议在设备性能、录音参数、设备布设及采样策略等方面建立统一的技术规范, 包括麦克风类型与性能指标、录音格式与采样精度、设备安装方式以及时间采样方案等。具体推荐的核心技术参数见表2。

上述核心参数体系并非基于单一的控制实验得出, 而是基于在我国多地长期的被动声学监测实践经验, 并结合国内外相关文献得到的。我们提出这套规范的初衷, 是试图在当前设备繁杂、标准缺失的现状下, 提供一个兼顾数据质量与存储成本的基准线, 以最大程度减少由设备和参数设置带来的系统性误差。当然, 这套技术标准的可行性仍需更多针对性的野外控制试验来进一步量化与论证。这也是今后的工作重点之一, 在此框架基础上开展标准对照试验, 持续优化与更新技术参数, 以建立更具统计学效力的监测标准体系。

3.3 不同生态系统的适应性调整

在遵循核心技术规范的基础上, 针对不同生态系统的声学环境特点, 需要对具体的布设策略进行适应性调整。森林生态系统需考虑林下植被和冠层结构对声音传播的衰减和散射效应(Marten & Marler, 1977)。对于多层结构的森林, 在不同垂直分层(如林下、亚冠层、冠层)布设设备有助于研究物种的垂直生态位分化或捕捉体型小、声音弱的物种, 但考虑到声学监测的有效距离通常在200 m左右(Yip et al., 2017), 这种做法会增加设备部署和数据

表2 中国鸟类被动声学监测核心技术参数推荐

Table 2 Recommended core technical parameters for passive acoustic monitoring of birds in China

参数类别 Category	参数 Parameter	推荐标准 Recommended standard	理由与依据 Rationale & basis
设备 Equipment	麦克风类型 Microphone type	全向性 Omnidirectional	捕获来自所有方向的声音, 适用于群落监测 Captures sound from all directions, suitable for community-level monitoring
	麦克风灵敏度 Microphone sensitivity	≥ –40 dB	确保能有效记录远处或微弱的鸟鸣信号 Ensures effective recording of distant or faint birdsong signals
	自身噪声 Equivalent noise level	信噪比 ≥ 65 dB Signal-to-noise ratio ≥ 65 dB	降低设备本身产生的噪声, 提高录音质量 Reduces noise generated by the device itself, improving recording quality
音频设置 Audio settings	文件格式 File format	WAV	完整保留原始声学信息, 是科学分析的标准格式 Fully preserves the original acoustic information; the standard format for scientific analysis
	采样率 Sampling rate	48 kHz	覆盖所有鸟类鸣声频率, 满足AI模型分析要求 Covers the full frequency range of bird vocalizations and meets the requirements for AI model analysis
	位深度 Bit depth	> 16 bit	提供足够的动态范围, 平衡数据质量与存储需求 Provides sufficient dynamic range, balancing data quality with storage requirements
设备布设 Equipment deployment	安装高度 Installation height	1.5–2 m	减少地面反射与灌丛干扰, 便于维护 Reduces ground reflections and interference from undergrowth; facilitates maintenance
	麦克风朝向 Microphone orientation	避开持续噪声源 Pointed away from persistent noise	提高目标信号(鸟鸣)的信噪比 Increases the signal-to-noise ratio of the target signal (birdsong)
录音日程 Recording schedule	采样策略 Sampling strategy	每10 min录1 min, 24 h循环 Record for 1 minute every 10 minutes, on a 24-hour cycle	系统性时间采样, 兼顾数据代表性与资源消耗(例如电源和存储) Provides a systematic temporal sampling that balances data representativeness with resource consumption (e.g., power, storage)

分析的复杂性, 因此并不适用于大范围推广, 更适合解决特定科学问题。此外, 在南亚热带森林中, 夏季的蝉鸣等昆虫鸣叫会形成强度极高的背景噪声, 常常完全掩盖鸟类鸣声。针对这种情况, 可以采用高噪背景训练的增强型AI模型或特定频段滤波算法, 以最大程度提高鸟鸣信号的识别率(Zhang et al., 2024)。

湿地生态系统中开阔的水面会产生强烈的声反射和混响, 降低录音质量。设备布设时应尽量使麦克风远离水面或利用地形、植被进行遮挡。此外, 水声、蛙类和昆虫的鸣叫声在湿地中往往是主要的背景噪声, 需要在选点时避让。对于受潮汐影响的滨海湿地, 由于潮汐变化周期长且每日涨落规律不同, 可考虑将潮汐状态(如潮位高度、涨落趋势)作为重要的协变量, 发挥PAM在时间尺度的高分辨率数据优势, 评估潮汐变化对鸟类多样性的影响(Rogers et al., 2006)。

城市生态系统中最大的挑战是高强度的低频人为噪声(如交通、施工) (Slabbekoorn & Peet, 2003; Parris & Schneider, 2009)。麦克风应尽可能布设在远离主干道、人群密集区的绿地核心区。此外, 城市环境中的设备防盗和防破坏也是必须优先考虑的问题, 需要采用更隐蔽、更坚固的安装方式, 增加警示标识或结合实时监控等防护措施。

荒漠生态系统的植被稀疏, 声波传播衰减较小, 有效监测范围可能更大(Wiley & Richards, 1978), 布设间距可适当增加。但极端的温差和风沙天气对设备的硬件可靠性、电池寿命和太阳能板效率提出了更高要求, 需要选用耐久性更强的设备, 并缩短维护周期, 同时在设备布设时避免暴晒等不良条件。

3.4 元数据与数据处理标准

在规范化核心技术参数的基础上, 标准化的元数据体系能确保数据可比较、可解释和可追溯。因此, 需建立一套涵盖监测点、设备和录音文件3个层级的标准化元数据记录标准。监测点信息应包括唯一的监测点编号、GPS坐标(经纬度, WGS84坐标系)、海拔及生境描述(植被类型、优势植物、林冠郁闭度等); 设备与部署信息应包括设备与麦克风型号、录音增益设置、录音日程、安装与回收的时间节点、维护记录及现场工作人员信息; 录音文件信息则应包括文件名、录音开始时间及录音时长。为便于现场操作与后期整理, 推荐使用“点位信息表”作为统一模板(附录2)。

音频文件命名的规范性是实现数据标准化管理的关键。为确保数据的全局唯一性并适配自动化分析流程, 建议采用包含城市、监测点、设备ID及时间戳的高度结构化命名规则。推荐格式为: <所在城市>_<监测点位>_<设备编号>_<年月日>_<时分秒>.wav。针对<所在城市>字段, 鉴于目前缺乏通用的双字母缩写标准, 且需兼顾设备文件名的长度限制, 建议采用项目内部统一定义的拼音缩写, 并在元数据说明文件中建立严格的对应索引表, 以确保区域标识的唯一性。例如, 在文件名SZ_YT_01_20240520_060000.wav中: “SZ”经索引表定义为“深圳” (有效规避了与“苏州”混淆的风险); “YT_01”代表“阳台山01号”监测点; 时间戳“20240520_060000”记录了录音起始时间。此外, 为消除跨时区协作可能带来的时序混乱, 所有时间相关的元数据(含文件名时间戳)均应统一采用协调世界时(coordinated universal time, UTC)。

在数据处理与分析阶段, 应建立标准化且高效的流程, 以提升研究结果的可比性与科学性。建议借鉴ARBIMON平台的“分析即服务”模式, 构建一站式数据处理平台, 实现从数据上传、物种识别到声学指标计算的全流程自动化分析。这一模式不仅可以显著提升大规模声学数据的处理效率, 降低非科研机构和公众用户的使用门槛, 还可为研究人员聚焦生态学问题分析提供高效的技术支撑(Ahumada et al., 2020)。具体流程建议由4个步骤组成: (1)数据预处理: 包括统一的质量检查、剔除无效录音文件; (2)物种识别: 建议采用BirdNET等公认且持续更新的AI模型, 以确保识别结果的一致性; (3)对于置信度低或高价值记录(如珍稀濒危物种)的数据, 进行人工复核, 并通过抽样校验评估AI模型的准确率、召回率等性能指标; (4)所有分析基于标准化的生态学指标, 如物种丰富度、占域率和声学指数等, 以实现不同区域和项目间的结果可比较和集成。

4 对未来工作的建议

4.1 建立技术标准与协调工作机制

为推动全国鸟类被动声学监测工作的规范化,

建议成立一个权责清晰、运行高效的技术标准与协调工作组, 组织编写《中国鸟类被动声学监测技术规范》, 并协调全国监测网络的长期规划与建设, 建立鸣声监测质量评估指标体系。工作组可开展的具体工作包括: 研拟和修订各项技术规范(如硬件、元数据、数据格式), 开发数据共享与整合协议, 确保网络内部及与依托的监测体系的数据兼容与互通; 开发核心物种鸣声识别AI模型, 并进行验证与更新; 为网络成员提供标准化的分析工具与技术支持; 制定公众科学项目的参与指南和数据标准; 建立数据开放共享的伦理规范与审查流程, 特别是在处理珍稀濒危物种的敏感信息方面。

4.2 构建全国鸟类鸣声监测网络

构建覆盖全国的鸟类被动声学监测网络, 应坚持“由点到面、分步推进”的策略, 充分整合现有资源并逐步扩展。第一阶段以整合和标准化为重点, 优先在生物多样性重点区域, 遴选已有声学监测基础的科研机构与保护地, 建立首批高质量试点样区, 作为规范化监测的“样板间”, 开展标准验证、技术优化和人员培训等工作。第二阶段实现阶段性成果, 争取吸引资金支持, 推动相关单位开展标准化监测和流程化分析, 逐步扩展监测网络, 实现“点到面”的规模化覆盖。第三阶段设立稳定专项投入, 在生态空白区和敏感区系统布局全域监测点, 形成覆盖全国、生态类型全面、运行规范统一的国家级鸟类被动声学监测格网, 推动数据融合与整合分析, 支撑鸟类多样性保护的科学决策与长效机制建设。此外, 我们倡议建立面向公众的参与通道: 提供低成本标准化采集设备与上传路径, 设计“众包数据-专家抽检-AI预标注”的分级质控流程, 发挥公众力量, 提升全国鸟类鸣声监测网络的采样精度。

为确保监测网络在全国尺度上的空间代表性与科学评估能力, 必须在监测网络空间布局与声学数据评估标准两个维度上进行严谨设计。针对我国幅员辽阔、生态系统类型复杂的特点, 为避免空间覆盖偏差, 我们建议全国鸟类鸣声监测网络采用“植被区域-典型植被型-干扰梯度”的三级分层抽样体系。一级抽样(植被区划): 在寒温带针叶林区域、温带草原区域、暖温带落叶阔叶林区域、亚热带常绿阔叶林区域、热带季雨林/雨林区域及青藏高原高寒植被区域等主要植被区域内设立监测大区。二级抽样(典型植被型): 在各植被区域内, 选取具有代表性的典型植被型作为核心监测区块。例如, 在亚热带区域内分别选取典型的常绿阔叶林、针阔混交林等典型地带性植被。三级抽样(人类干扰梯度): 在具体点位布设层面, 沿“自然保护区-生态交错带-城市建成区”设置梯度。

在构建了具有空间代表性的物理监测网络之后, 如何有效挖掘数据的生态学价值是未来面临的关键挑战。为此, 我们提出引入基本生物多样性变量(essential biodiversity variables, EBVs)作为数据分析与评估的理论框架构想(Pereira et al., 2013)。该构想旨在利用EBVs作为连接底层原始观测数据与顶层宏观决策指标的“逻辑桥梁” (Jetz et al., 2019), 探索建立一套涵盖物种种群(species populations)、群落组成(community composition)及生态系统功能(ecosystem function) 3个维度的声学评估指标体系(附录3), 从而为实现从单纯的“数据收集”向“生态系统质量科学诊断”的跨越提供科学思路与方法论参考。

4.3 模型研发与平台建设

技术创新与能力建设是推动监测网络高质量发展的核心动力, 建议将自主技术研发与多层次人才培养协同推进(图2)。

在技术研发方面, 可以重点聚焦两个关键维度: 一是本土化AI识别模型的构建与优化。推荐采用“基线模型 + 区域适配”的策略, 利用大规模数据训练通用基线模型, 再通过迁移学习微调, 以适应不同区域的“鸟类方言”与声音环境(Funosas et al., 2026)。二是开发有效指示鸟类多样性水平的声学指标体系。深入研究现有声学指数与实际生物多样性指标的定量关系, 构建适用于我国复杂生境的声学评估模型, 为生态系统质量提供快速、客观的量化评价工具。在此基础上, 搭建集存储、分析与可视化于一体的综合声学数据服务平台, 提供统一分析工具以降低应用门槛, 并采用隐私保护技术缓解数据共享风险。

在能力建设方面, 建议构建涵盖一线技术人员、科研骨干与社会公众的三级人才培养体系。对于专业人员, 应定期开展标准化操作培训并鼓励高校开设相关课程; 对于公众, 可通过开发通俗易懂的操作指南, 引导观鸟爱好者参与数据采集与初步

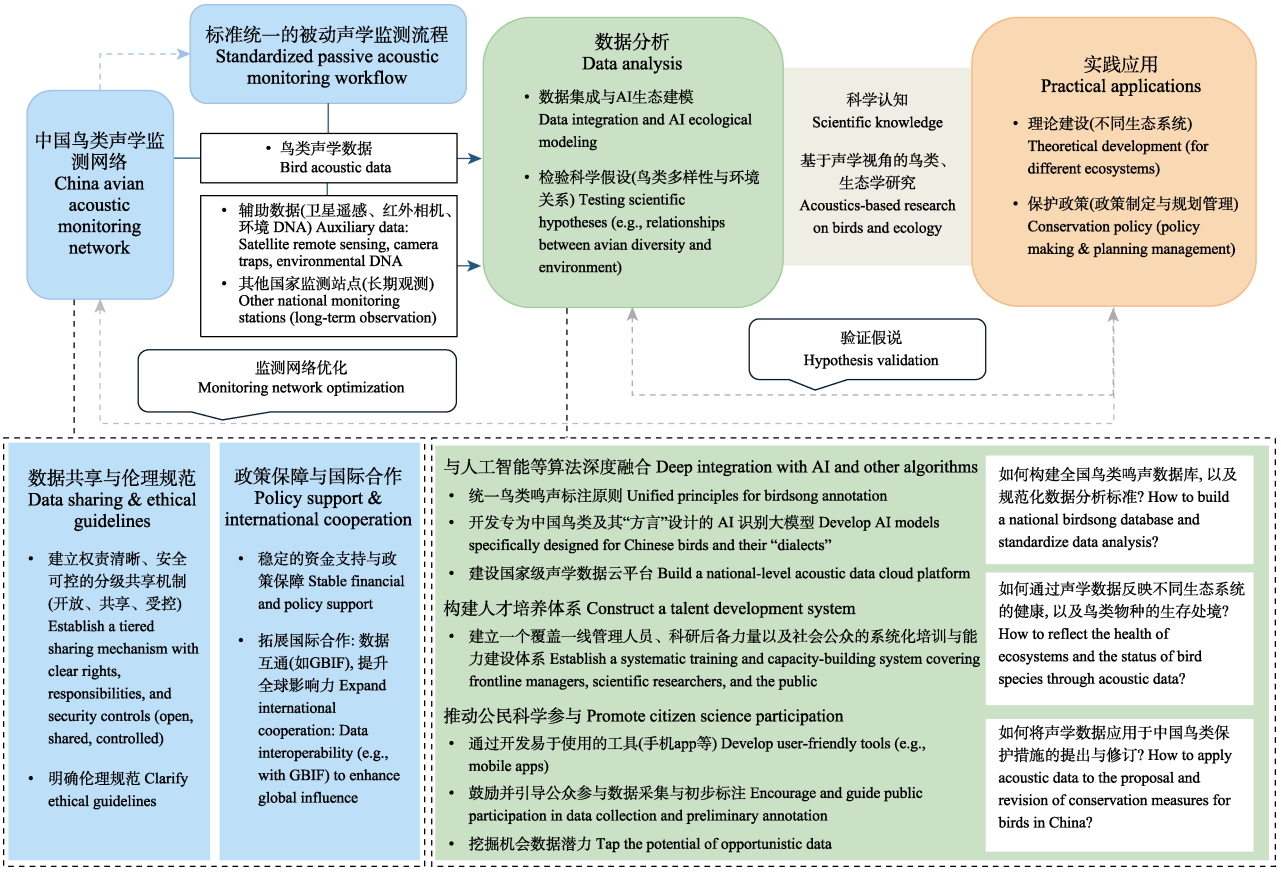


图2　构建标准化中国鸟类被动声学监测网络的行动路线图
Fig. 2　An action roadmap for establishing a standardized avian acoustic monitoring network in China

标注。这种公民科学模式不仅能有效补充监测人力资源, 也有助于提升社会公众的科学素养与生态保护意识(Silvertown, 2009)。此外, 可积极举办相关学科竞赛, 吸引跨学科团队参与算法创新, 推动监测技术的快速迭代与应用落地。

4.4　数据共享与伦理规范

数据共享与伦理规范是保障监测网络高效运行与可持续发展的基础支撑, 清晰且公平的数据政策是激发合作与实现协同发展的基础。以FAIR原则为指导, 建立明确的数据分类与许可体系(例如开放级、共享级、受控级), 并制定相应的模糊化、延迟公开或申请审批流程以保护敏感物种与社区隐私。开放级数据(如多样性指标、物种名录和声景指数等)可向公众免费开放; 共享级数据(如原始音频文件与地理元信息)可在网络成员单位之间共享, 用于合作研究。受控级数据(如濒危或受胁物种, 特殊区域的敏感信息), 需进行模糊化处理或设立"申请-审批"机制。此外, 应确保所有数据在存储、备份与传输过程中的网络安全, 严格遵守国家相关法律法规, 特别是在数据出境方面建立审慎的安全审查流程, 从源头上防范数据泄露与滥用的风险。

4.5　政策保障与国际合作

长效的政策支持、稳定的资金保障以及开放的国际合作姿态, 是构建可持续、高质量鸟类声学监测网络的根本支撑。建议将该监测网络纳入国家生态系统监测网络体系, 通过长期稳定的支持保障网络持续运行。在国际化策略上, 鉴于生物声学数据的敏感性及跨部门管理的复杂性, 建议采取"立足国内、稳步接轨"的分步走战略。在网络建设初期, 应优先致力于打破国内跨部门、跨区域的数据孤岛, 重点提升数据服务于国家生态文明建设与保护地管理的贡献度。在国际交流维度, 现阶段应侧重于技术标准对标、算法模型共建及科研人才交流, 通过双向人才培养与联合研究项目, 为全球生物声学发展贡献中国智慧。对于数据交互, 必须在严格遵守国家数据安全法律法规及合规审查的前提下, 探

索以非敏感元数据或统计指标参与全球对话的新范式, 待管理机制成熟后, 再稳步探索更深层次的数据合作机制(Pérez-Granados et al., 2026)。

5 结论

鸟类被动声学监测正处在技术迅猛发展与生态保护需求快速增长的交汇点。中国拥有全球重要的鸟类多样性和独特的声音景观, 构建一套全国统一、科学规范的声学监测体系, 不仅有助于提升生物多样性研究与保护的专业化水平, 更是履行国际环境公约、推进国家生态文明建设的迫切需求。当前阶段, 应从国际经验中汲取有效做法, 立足本土生态特征与研究基础, 推动形成涵盖核心技术参数、生态适应性监测指南、数据处理与共享标准在内的综合体系框架。同时, 应尽快明确顶层设计与实施路径, 在标准建设、能力培训、平台建设和多方协作等方面同步发力。我们呼吁, 国内相关管理部门、科研机构和保护实践者能够凝聚共识, 协同行动, 尽快将这一蓝图付诸实践。唯有如此, 我们才能真正将声学监测这一强大工具的潜力转化为有效的保护成效, 让万千鸟鸣汇成一曲和谐的交响。

致谢: 衷心感谢中山大学生态学院陈宇昊、魏广鹏和张学聪在野外设备布设中积累的宝贵经验, 这些经验为本文诸多技术细节的验证提供了重要指导。同时, 诚挚感谢广州大学电子与通信工程学院生态声学团队的同学们在被动声学监测设备研发与人工智能算法开发等方面做出的突出贡献。此外, 特别感谢华东师范大学生态与环境科学学院韩鹏以及中国林业科学研究院热带林业研究所廖媛柯在本文撰写与完善过程中的无私帮助。

ORCID

郝泽周 https://orcid.org/0000-0001-5546-4783
申小莉 https://orcid.org/0000-0003-2749-1121
斯幸峰 https://orcid.org/0000-0003-4465-2759
赵岩岩 https://orcid.org/0000-0002-1828-5038
魏晨韬 https://orcid.org/0000-0001-7310-0473
吴飞 https://orcid.org/0000-0001-7944-9916
许晓青 https://orcid.org/0000-0001-5908-0795
阙品甲 https://orcid.org/0000-0002-6058-1199
董路 https://orcid.org/0000-0001-9476-3321
华方圆 https://orcid.org/0000-0001-8514-8757
张立勋 https://orcid.org/0000-0003-4984-2068
张承云 https://orcid.org/0000-0003-2248-6059
刘阳 https://orcid.org/0000-0003-4580-5518

参考文献

Ahumada JA, Fegraus E, Birch T, Flores N, Kays R, O'Brien TG, Palmer J, Schuttler S, Zhao JY, Jetz W, Kinnaird M, Kulkarni S, Lyet A, Thau D, Duong M, Oliver R, Dancer A (2020) Wildlife Insights: A platform to maximize the potential of camera trap and other passive sensor wildlife data for the planet. Environmental Conservation, 47, 1–6.

Aide TM, Corrada-Bravo C, Campos-Cerqueira M, Milan C, Vega G, Alvarez R (2013) Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. PeerJ, 1, e103.

Alcocer I, Lima H, Sugai LSM, Llusia D (2022) Acoustic indices as proxies for biodiversity: A meta-analysis. Biological Reviews, 97, 2209–2236.

Bian Q, Wang C, Hao ZZ (2021) Application of ecoacoustic monitoring in the field of biodiversity science. Chinese Journal of Applied Ecology, 32, 1119–1128. (in Chinese with English abstract) [边琦, 王成, 郝泽周 (2021) 生物声音监测研究在生物多样性领域的应用. 应用生态学报, 32, 1119–1128.]

Blumstein DT, Mennill DJ, Clemins P, Girod L, Yao K, Patricelli G, Deppe JL, Krakauer AH, Clark C, Cortopassi KA, Hanser SF, McCowan B, Ali AM, Kirschel ANG (2011) Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: Applications, technological considerations and prospectus: Acoustic monitoring. Journal of Applied Ecology, 48, 758–767.

Bradfer-Lawrence T, Gardner N, Bunnefeld L, Bunnefeld N, Willis SG, Dent DH (2019) Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. Methods in Ecology and Evolution, 10, 1796–1807.

Darras K, Batáry P, Furnas BJ, Grass I, Mulyani YA, Tscharntke T (2019) Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: A systematic map and user guide. Ecological Applications, 29, e01954.

Darras K, Deppe F, Fabian Y, Kartono AP, Angulo A, Kolbrek B, Mulyani YA, Prawiradilaga DM (2020) High microphone signal-to-noise ratio enhances acoustic sampling of wildlife. PeerJ, 8, e9955.

Ding J, Sun Q, Akman A, Schuller BW (2025) Cross-dialect bird species recognition with dialect-calibrated augmentation. arXiv, 2509.22317.

Donald PF, Sanderson FJ, Burfield IJ, van Bommel FPJ (2006) Further evidence of continent-wide impacts of agricultural intensification on European farmland birds, 1990–2000. Agriculture, Ecosystems & Environment, 116, 189–196.

Ewers RM, Didham RK, Fahrig L, Ferraz G, Hector A, Holt RD, Kapos V, Reynolds G, Sinun W, Snaddon JL, Turner EC (2011) A large-scale forest fragmentation experiment:

The stability of altered forest ecosystems project. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 366, 3292–3302.

Feng XJ, Mi XC, Xiao ZS, Cao L, Wu H, Ma KP (2019) Overview of Chinese Biodiversity Observation Network (Sino BON). Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34, 1389–1398. (in Chinese with English abstract) [冯晓娟, 米湘成, 肖治术, 曹垒, 吴慧, 马克平 (2019) 中国生物多样性监测与研究网络建设及进展. 中国科学院院刊, 34, 1389–1398.]

Funosas D, Sebastián-González E, Morant J, Marín Gómez OH, Mendoza I, Mohedano-Muñoz MA, Santamaría E, Bastianelli G, Márquez-Rodríguez A, Budka M, ..., Feldman MJ, Imbeau L, Panwar P, Weed AS, Dehwal A, Attisano A, Theuerkauf J, Goodale E, Darras KFA, Pérez-Granados C (2026) A global assessment of BirdNET performance: Differences among continents, biomes, and species. Ecological Indicators, 182, 114550.

Gibb R, Browning E, Glover-Kapfer P, Jones KE (2019) Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. Methods in Ecology and Evolution, 10, 169–185.

Hampton SE, Strasser CA, Tewksbury JJ, Gram WK, Budden AE, Batcheller AL, Duke CS, Porter JH (2013) Big data and the future of ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 11, 156–162.

Han LX, Yang L, Zheng BL (1988) The sound spectrographic analyses on the calls of lady Amherst's pheasant (*Chrysolophus amherstiae*). Zoological Research, 9, 127–132. (in Chinese with English abstract) [韩联宪, 杨岚, 郑宝赉 (1988) 白腹锦鸡鸣声的声谱分析. 动物学研究, 9, 127–132.]

Han P, Zhao YH, Kang Y, Ding P, Si XF (2024) Island biogeography of soundscapes: Island area shapes spatial patterns of avian acoustic diversity. Journal of Biogeography, 51, 511–521.

He JK, Yi JF, Holyoak M, Goodale E, Yu JH, Liu W, Zhang Q, Xu HG (2025) Decade-long bird trends in China: Stable species richness but increasing biotic homogenization. Global Change Biology, 31, e70654.

He KY, Xu XH, Zhang CY, Hao ZZ, Xiao ZS, Guo YY (2024) Bioacoustics data archives management standards and management technology progress. Biodiversity Science, 32, 24266. (in Chinese with English abstract) [何凯莹, 徐心慧, 张承云, 郝泽周, 肖治术, 郭莹莹 (2024) 生物声学数据档案的管理标准及管理技术进展. 生物多样性, 32, 24266.]

Hill AP, Prince P, Piña Covarrubias E, Doncaster CP, Snaddon JL, Rogers A (2018) AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. Methods in Ecology and Evolution, 9, 1199–1211.

Jetz W, McGeoch MA, Guralnick R, Ferrier S, Beck J, Costello MJ, Fernandez M, Geller GN, Keil P, Merow C, Meyer C, Muller-Karger FE, Pereira HM, Regan EC, Schmeller DS, Turak E (2019) Essential biodiversity variables for mapping and monitoring species populations. Nature Ecology & Evolution, 3, 539–551.

Jiang SR, Ding P, Shi QS, Zhuge Y (1996) Studies on the song dialects in Chinese bulbuls. Acta Zoologica Sinica, 42, 361–367. (in Chinese with English abstract) [姜仕仁, 丁平, 施青松, 诸葛阳 (1996) 白头鹎方言的初步研究. 动物学报, 42, 361–367.]

Kahl S, Wood CM, Eibl M, Klinck H (2021) BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. Ecological Informatics, 61, 101236.

Kemp J, Azofeifa-Solano JC, Barneche DR, Brooker R, Arévalo JE, Erbe C, Parsons M (2025) Impact of acoustic index parameters on soundscape comparisons. Methods in Ecology and Evolution, 16, 872–885.

Lees AC, Haskell L, Allinson T, Bezeng SB, Burfield IJ, Renjifo LM, Rosenberg KV, Viswanathan A, Butchart SHM (2022) State of the world's birds. Annual Review of Environment and Resources, 47, 231–260.

Li L, Zhang CY, Pei NC, Gao BT, Wang N, Li JR, Wu RC, Hao ZZ (2024) Correlation analysis of urban green landscape patterns and bird diversity based on passive acoustic monitoring technology. Biodiversity Science, 32, 24296. (in Chinese with English abstract) [李乐, 张承云, 裴男才, 高丙涛, 王娜, 李嘉睿, 武瑞琛, 郝泽周 (2024) 基于被动声学监测技术的城市绿地景观格局与鸟类多样性关联分析. 生物多样性, 32, 24296.]

Li S (2020) Development progress and outlook of the wildlife camera-trapping networks in China. Biodiversity Science, 28, 1045–1048. (in Chinese) [李晟 (2020) 中国野生动物红外相机监测网络建设进展与展望. 生物多样性, 28, 1045–1048.]

Li XY, Liang L, Gong P, Liu Y, Liang FF (2013) Bird watching in China reveals bird distribution changes. Chinese Science Bulletin, 58, 649–656.

Liao ZK, Bai HT, Zhang XH, Yu S, Ling JL, Liu Y (2025) A dataset of common bird vocalizations in Hainan Tropical Rainforest National Park. Biodiversity Science, 33, 25194. (in Chinese with English abstract) [廖之锴, 白皓天, 张修瀚, 余上, 凌嘉乐, 刘阳 (2025) 海南热带雨林国家公园常见鸟类鸣声数据集. 生物多样性, 33, 25194.]

Lu TC, He FQ, Lu CL (1986) On the call of the Chinese monal (*Lophophorvs lhvysii*). Acta Ecologica Sinica, 6, 87–88. (in Chinese) [卢汰春, 何芬奇, 卢春雷 (1986) 绿尾虹雉叫声的声谱分析. 生态学报, 6, 87–88.]

Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: From CForBio to Sino BON. Biodiversity Science, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1–2.]

MacKenzie DI, Nichols JD, Royle JA, Pollock KH, Bailey L, Hines JE (2017) Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence, 2nd edn. Academic Press, London.

Mammides C, Goodale E, Dayananda SK, Kang L, Chen J (2017) Do acoustic indices correlate with bird diversity?

Insights from two biodiverse regions in Yunnan Province, South China. Ecological Indicators, 82, 470–477.

Marshall-Hawkes R, Gillings S, Wilson MW, Wetherhill AS, Dicks LV, Ashton-Butt A (2025) Estimating how site-level differences in acoustic environments affect species detection by machine learning models. bioRxiv, doi: 10.1101/2025.08.31.673350.

Marten K, Marler P (1977) Sound transmission and its significance for animal vocalization. I. Temperate habitats. Behavioral Ecology and Sociobiology, 2, 271–290.

Maxwell SL, Fuller RA, Brooks TM, Watson JEM (2016) Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. Nature, 536, 143–145.

McShea WJ, Shen XL, Liu F, Wang TM, Xiao ZS, Li S (2020) China's wildlife camera-trap monitoring needs a unified standard. Biodiversity Science, 28, 1125–1131. (in Chinese with English abstract) [William J. McShea, 申小莉, 刘芳, 王天明, 肖治术, 李晟 (2020) 中国的野生动物红外相机监测需要统一的标准. 生物多样性, 28, 1125–1131.]

Michener WK, Jones MB (2012) Ecoinformatics: Supporting ecology as a data-intensive science. Trends in Ecology & Evolution, 27, 85–93.

Michielsen RJ, Koprowska D, Mikusiński G, Walesiak M, Zegarek M, Żmihorski M, Budka M (2025) The effectiveness of ecoacoustic indices in representing bird species richness relies on technical parameters. Ecological Informatics, 92, 103493.

Newbold T, Hudson LN, Hill SLL, Contu S, Lysenko I, Senior RA, Börger L, Bennett DJ, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar MJ, Feldman A, Garon M, Harrison MLK, Alhusseini T, Ingram DJ, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia DLP, Martin CD, Shai MR, Novosolov M, Yuan P, Phillips HRP, Purves DW, Robinson A, Simpson J, Tuck SL, Weiher E, White HJ, Ewers RM, Mace GM, Scharlemann JPW, Purvis A (2015) Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. Nature, 520, 45–50.

Parris KM, Schneider A (2009) Impacts of traffic noise and traffic volume on birds of roadside habitats. Ecology and Society, 14, art29.

Pereira HM, Ferrier S, Walters M, Geller GN, Jongman RHG, Scholes RJ, Bruford MW, Brummitt N, Butchart SHM, Cardoso AC, Coops NC, Dulloo E, Faith DP, Freyhof J, Gregory RD, Heip C, Höft R, Hurtt G, Jetz W, Karp DS, McGeoch MA, Obura D, Onoda Y, Pettorelli N, Reyers B, Sayre R, Scharlemann JPW, Stuart SN, Turak E, Walpole M, Wegmann M (2013) Essential biodiversity variables. Science, 339, 277–278.

Pérez-Granados C, Gómez-Catasús J, Rosa D, Barrero A, Reverter M, Traba J (2019) Effort needed to accurately estimate Vocal Activity Rate index using acoustic monitoring: A case study with a dawn-time singing passerine. Ecological Indicators, 107, 105608.

Pérez-Granados C, Morant J, Darras KFA, Marín-Gómez OH, Mendoza I, Muñoz-Mohedano MA, Santamaría-García E, Bastianelli G, Márquez-Rodríguez A, Budka M, ..., da Paz RV, Salustio-Gomes C, Oliveira-Júnior DD, Lima-Santos CS, Pichorim M, Pan WY, Goodale E, Attisano A, Theuerkauf J, Sebastián-González E (2026) WABAD: A world annotated bird acoustic dataset for passive acoustic monitoring. Ecology, 107, e70317.

Pérez-Granados C, Traba J (2021) Estimating bird density using passive acoustic monitoring: A review of methods and suggestions for further research. Ibis, 163, 765–783.

Qin YY, Zhao LH, Wang JC (2023) Roles and development trends of passive acoustic monitoring techniques for biodiversity conservation in national parks. National Park, 1, 264–271. (in Chinese with English abstract) [覃远玉, 赵龙辉, 汪继超 (2023) 被动声学监测技术在国家公园生物多样性保护中的作用及发展趋势. 国家公园(中英文), 1, 264–271.]

Reichman OJ, Jones MB, Schildhauer MP (2011) Challenges and opportunities of open data in ecology. Science, 331, 703–705.

Rigal S, Dakos V, Alonso H, Auniņš A, Benkő Z, Brotons L, Chodkiewicz T, Chylarecki P, de Carli E, del Moral JC, Domşa C, Escandell V, Fontaine B, Foppen R, Gregory R, Harris S, Herrando S, Husby M, Ieronymidou C, Jiguet F, Kennedy J, Klvaňová A, Kmecl P, Kuczyński L, Kurlavičius P, Kålås JA, Lehikoinen A, Lindström Å, Lorrillière R, Moshøj C, Nellis R, Noble D, Eskildsen DP, Paquet JY, Pélissié M, Pladevall C, Portolou D, Reif J, Schmid H, Seaman B, Szabo ZD, Szép T, Florenzano GT, Teufelbauer N, Trautmann S, van Turnhout C, Vermouzek Z, Vikstrøm T, Voříšek P, Weiserbs A, Devictor V (2023) Farmland practices are driving bird population decline across Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 120, e2216573120.

Roe P, Eichinski P, Fuller RA, McDonald PG, Schwarzkopf L, Towsey M, Truskinger A, Tucker D, Watson DM (2021) The Australian acoustic observatory. Methods in Ecology and Evolution, 12, 1802–1808.

Rogers DI, Piersma T, Hassell CJ (2006) Roost availability may constrain shorebird distribution: Exploring the energetic costs of roosting and disturbance around a tropical bay. Biological Conservation, 133, 225–235.

Rosenberg KV, Dokter AM, Blancher PJ, Sauer JR, Smith AC, Smith PA, Stanton JC, Panjabi A, Helft L, Parr M, Marra PP (2019) Decline of the North American avifauna. Science, 366, 120–124.

Şekercioğlu ÇH, Daily GC, Ehrlich PR (2004) Ecosystem consequences of bird declines. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 101, 18042–18047.

Shen XH, Zhu XY, Shi HF, Wang CZ (2023) Research progress of birdsong recognition algorithms based on machine learning. Biodiversity Science, 31, 23272. (in Chinese with English abstract) [申小虎, 朱翔宇, 史洪飞, 王传之 (2023) 基于机器学习鸟声识别算法研究进展. 生物多样性, 31, 23272.]

Shonfield J, Bayne EM (2017) Autonomous recording units in

avian ecological research: Current use and future applications. Avian Conservation and Ecology, 12, art14.
Silvertown J (2009) A new dawn for citizen science. Trends in Ecology & Evolution, 24, 467–471.
Slabbekoorn H, Peet M (2003) Birds sing at a higher pitch in urban noise. Nature, 424, 267.
Stowell D (2022) Computational bioacoustics with deep learning: A review and roadmap. PeerJ, 10, e13152.
Sueur J, Farina A (2015) Ecoacoustics: The ecological investigation and interpretation of environmental sound. Biosemiotics, 8, 493–502.
Sugai LSM, Silva TSF, Ribeiro JW Jr, Llusia D (2019) Terrestrial passive acoustic monitoring: Review and perspectives. BioScience, 69, 15–25.
Sun YF, Wang SZ, Feng JW, Wang TM (2023) Diel and seasonal variability of the forest soundscape in the Northeast China Tiger and Leopard National Park. Biodiversity Science, 31, 22523. (in Chinese with English abstract) [孙翊斐, 王士政, 冯佳伟, 王天明 (2023) 东北虎豹国家公园森林声景的昼夜和季节变化. 生物多样性, 31, 22523.]
Tscharntke T, Batáry P (2023) Agriculture, urbanization, climate, and forest change drive bird declines. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 120, e2305216120.
Turgeon PJ, Van Wilgenburg SL, Drake KL (2017) Microphone variability and degradation: Implications for monitoring programs employing autonomous recording units. Avian Conservation and Ecology, 12, art9.
Wang SZ, Sun YF, Li ZZ, Shu Y, Feng JW, Wang TM (2023) Effects of bird migration on the temporal patterns of the wetland soundscape in the downstream region of the Tumen River Basin of China. Biodiversity Science, 31, 22337. (in Chinese with English abstract) [王士政, 孙翊斐, 李珍珍, 舒越, 冯佳伟, 王天明 (2023) 鸟类迁徙对图们江下游湿地声景时间格局的影响. 生物多样性, 31, 22337.]
Whelan CJ, Şekercioğlu ÇH, Wenny DG (2015) Why birds matter: From economic ornithology to ecosystem services. Journal of Ornithology, 156, 227–238.
Wiley RH, Richards DG (1978) Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: Implications for the evolution of animal vocalizations. Behavioral Ecology and Sociobiology, 3, 69–94.
Wilkinson MD, Dumontier M, Aalbersberg IJ, Appleton G, Axton M, Baak A, Blomberg N, Boiten JW, da Silva Santos LB, Bourne PE, …, Swertz MA, Thompson M, van der Lei J, van Mulligen E, Velterop J, Waagmeester A, Wittenburg P, Wolstencroft K, Zhao J, Mons B (2019) Addendum: The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 6, 6.
Wimmer J, Towsey M, Roe P, Williamson I (2013) Sampling environmental acoustic recordings to determine bird species richness. Ecological Applications, 23, 1419–1428.
Wu KY, Ruan WD, Zhou DF, Chen QC, Zhang CY, Pan XY, Yu S, Liu Y, Xiao RB (2023) Syllable clustering analysis-based passive acoustic monitoring technology and its application in bird monitoring. Biodiversity Science, 31, 22370. (in Chinese with English abstract) [吴科毅, 阮文达, 周棣锋, 陈庆春, 张承云, 潘新园, 余上, 刘阳, 肖荣波 (2023) 基于音节聚类分析的被动声学监测技术及其在鸟类监测中的应用. 生物多样性, 31, 22370.]
Xu XQ, Pu BJ, Yu CM, An DJ (2023) Situtaion of acoustic tools to assist biodiversity monitoring in nature reserves and application recommendations. Natural Protected Areas, 3(4), 34–44. (in Chinese with English abstract) [许晓青, 蒲宝婧, 余楚萌, 安德军 (2023) 声学手段辅助自然保护地生物多样性监测现状及应用建议. 自然保护地, 3(4), 34–44.]
Yip DA, Bayne EM, Sólymos P, Campbell J, Proppe D (2017) Sound attenuation in forest and roadside environments: Implications for avian point-count surveys. The Condor, 119, 73–84.
Yong DL, Heim W, Chowdhury SU, Choi CY, Ktitorov P, Kulikova O, Kondratyev A, Round PD, Allen D, Trainor CR, Gibson L, Szabo JK (2021) The state of migratory landbirds in the East Asian flyway: Distributions, threats, and conservation needs. Frontiers in Ecology and Evolution, 9, 613172.
Zhang CY, Jin NT, Xie J, Hao ZZ (2024) CicadaNet: Deep learning based automatic cicada chorus filtering for improved long-term bird monitoring. Ecological Indicators, 158, 111423.
Zhang ZX, Zhang CY, Hao ZZ, He KY, Huang YQ, Xiao ZS (2024) The progress and prospects of terrestrial bioacoustics data acquisition equipment. Biodiversity Science, 32, 24265. (in Chinese with English abstract) [张梓欣, 张承云, 郝泽周, 何凯莹, 黄泳桥, 肖治术 (2024) 陆地生物声学数据采集设备的进展及展望. 生物多样性, 32, 24265.]
Zhao Y, Shen XL, Li S, Zhang YY, Peng RH, Ma KP (2020) Progress and outlook for soundscape ecology. Biodiversity Science, 28, 806–820. (in Chinese with English abstract) [赵莹, 申小莉, 李晟, 张雁云, 彭任华, 马克平 (2020) 声景生态学研究进展和展望. 生物多样性, 28, 806–820.]
Zheng GM (2023) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 4th edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2023) 中国鸟类分类与分布名录 (第四版). 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025474

附录 1

中国鸟类鸣声监测网络

标准化监测操作手册v1.0

—森林生态系统版

目 录

1.监测点设置 3
1.1 监测点选择 3
1.2 监测点布设要求 3
2.仪器参数 4
2.1 麦克风与设备规格 4
2.2 录音采样频率 4
2.3 录音时间设置 4
2.4 录音文件格式 4
2.5 录音文件前缀设置 4
3.设备安装要求 4
3.1 安装位置与高度 4
3.2 麦克风朝向规范 5
3.3 路线轨迹与点位标记 5
3.4 安装环境拍照与环境记录要求 5
4.配件与清单 6
4.1 电池与存储卡配置 6
4.2 安装与防盗配件 6
5.维护与数据采集周期 7
5.1 设备维护频率 7
5.2 年度维护计划建议 8
5.3 数据采集周期设置 8
5.4 维护时机选择 8
6.数据管理与存储 8
6.1 文件命名与前缀设置 8
6.2 数据存储介质推荐 9
6.3 元数据整理要求 9
7. 辅助调查建议：人工鸟类观察配合 10
7.1 调查建议 10
7.2 操作指引 10
7.3 数据整理要求 10
外出前快速检查清单(PAM-CHINA) 11

本手册为中国鸟类鸣声监测网络(PAM-CHINA)提供森林生态系统中的标准化操作指导，旨在为全国范围内的合作单位开展鸟类多样性被动声学监测提供统一、可实施的技术规范。被动声学监测是一种利用环境声音长期、非侵入式记录鸟类活动的技术，具备在不干扰生态系统的前提下持续监测森林鸟类多样性变化的能力，能够支持对生态系统结构与功能变化的动态评估。通过规范化的数据采集与处理流程，本手册将为中国森林鸟类多样性评估、长期监测与保护研究提供高质量的数据支持，并推动全国范围内的技术协同与数据共享，助力构建覆盖多生态区的声学监测网络体系。

1.监测点设置

为了全面评估森林生态系统中鸟类的声学多样性或特定物种的鸣声活动节律，监测点设置应覆盖不同类型的代表性森林样地，并满足一定的空间与环境要求。

1.1监测点选择

监测点选择依据：选择典型的地带性森林群落类型，如阔叶林、针叶林和混交林等，确保监测点能够代表所在区域的主要森林生态系统类型。

涵盖海拔梯度：尽可能在不同的海拔高度带上设置监测点，以获取垂直分布梯度上的鸟类声学信息。

监测范围估算：在每个代表性群落中，应布设一个由一台或多台设备组成的监测阵列（或称样组）进行监测。但考虑到声音传播范围较广，单台被动声学监测设备的有效监测范围大约为半径200米的圆形区域(根据设备型号、地形与植被密度，可能存在一定误差)，因此还要根据群落面积、内部一致性等实际情况调整监测阵列的数量搭配。

1.2监测点布设要求

布设位置规范：监测点应设置在具有足够空间范围的典型森林植被斑块核心区域。为保证声学数据的生境代表性，监测点位应距离林缘、道路及其他人为干扰源至少 50 米（或依据设备实际有效拾音半径设定缓冲距离），以确保录制的绝大部分生物声来自目标生境内部，避免边缘效应及外部环境噪声的干扰。

点位间距要求：不同监测点之间应保持至少500米的距离，以防止录音信号重叠，确保数据的空间独立性与可比性。

2.仪器参数

2.1麦克风与设备规格

推荐使用高灵敏度(不低于-40 dB)、低噪声(信噪比高于65 dB)、宽频带(100 Hz – 20000 Hz，幅频响应±3 dB)的全向麦克风与低功耗被动声学监测设备。

2.2录音采样频率

建议录音采样频率为48 kHz，以完整覆盖森林鸟类主要鸣声频段以及各类环境声音。

2.3录音时间设置

建议每10分钟录制1分钟，24小时循环录制，以兼顾数据代表性与长期监测的需求。

2.4录音文件格式

录音格式为WAV，不低于16 bits。

2.5录音文件前缀设置

设备应具备自定义录音文件前缀名的功能，以区分监测网络中各监测点的数据，具体命名规则请见6.1。

3.设备安装要求

3.1安装位置与高度

设备应使用铅封、铁丝等工具固定在健康树木上，推荐安装高度为1.5–2米，以避免地面反射和灌木层干扰。安装位置应稳固、安全，避免长时间暴晒，并选择垂直树干或倾斜树干的上侧以减少树干径流冲刷，并便于后续维护操作(见图1)。



图1 设备安装示意图

3.2麦克风朝向规范

麦克风指向应避免正对溪流、道路或常年强风口，以获取稳定、高质量的鸟类鸣声信号。必要时，对麦克风的防风罩加装防护笼以防野生动物破坏。

3.3路线轨迹与点位标记

建议在安装设备前，使用具备轨迹记录功能的APP标记行走路线，并使用“兴趣点(POI)”功能记录设备安装点位和其他关键位置信息(如岔路口、显著标志物等)，以便后期巡检和维护快速定位点位。

3.4安装环境拍照与环境记录要求

安装完成后，使用具备时间、地点与水印功能的APP(如“今日水印相机”)对安装现场进行拍照留档，也可视情况添加至3.3中APP所记录轨迹或兴趣点的附件中。照片要求如下：

①设备照片：近距离拍摄设备固定位置，照片中需清晰显示设备编号及水印中包括的点位编号、拍摄时间与GPS坐标信息(图2a)。

②生境照片：从设备点周围拍摄反映该点植被类型与环境特征的广角照，包括林型、植被密度、地形坡度等要素(图2b)。

在监测点确定后同步记录详细的环境背景信息，包括：点位编号、设备编号、GPS坐标、海拔、坡度、生境描述等，以便后续数据分析与复查。



图2a 设备照片示意图



图2b 生境照片示意图

4.配件与清单

4.1电池与存储卡配置

推荐使用高性能碱性干电池供电，最佳能源方案以及设备续航情况请咨询设备生产商，以便安排维护日程。

每台设备推荐配置2张SD存储卡，以便巡检时可直接更换卡片并带回原始数据。按照2.仪器参数部分的建议，单声道文件每个大概5.5MB左右，一天录制144条文件，单天数据量约800MB，每月数据量23.5GB左右。

4.2安装与防盗配件

推荐使用专用铅封等配件，用于设备的固定与上锁(见图3)。铅封可定制编号与项目LOGO，用于设备身份管理。推荐长度：

- 90 cm 铅封：适用于固定在胸径约 20 cm 的树上；
- 20 cm 铅封：适用于设备外壳锁定。

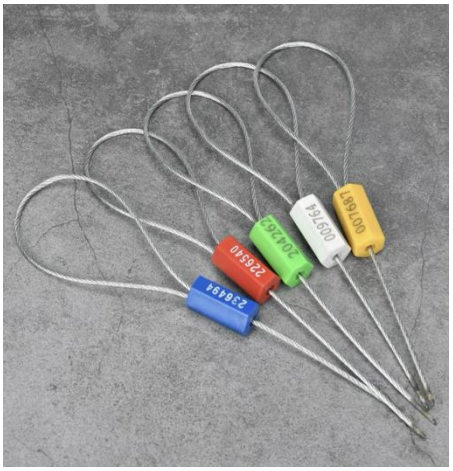


图3 建议使用图片所示的铅封，方便、坚固、可定制编号

5.维护与数据采集周期

5.1 设备维护频率

根据设备电池续航能力和存储容量，建议最长每6个月进行一次现场维护。维护内容包括：更换电池和存储卡、检查设备运行状态和固定是否牢靠、检查树木生长状况避免铅封过紧等。

每次外出维护检查应携带以下物资：

- 足量的备用电池(如碱性一号电池)；
- 至少1张空白 SD 存储卡(最好256 GB)；
- 备用录音设备1套，用于在设备故障或遗失时替换，避免监测中断；
- 备用铅封与剪钳；
- 备用防风罩；
- GPS设备或手机导航APP；
- 记录工具(如纸质记录表、笔，或电子表单设备)。

5.2 年度维护计划建议

建议每年维护设备2–3次。在冬季气温较低(电池性能下降显著)的区域，维护频率应提高至每年3–4次，以保障数据连续性与设备运行安全。

5.3 数据采集周期设置

建议每个监测点连续采集不少于1年，以完整覆盖森林鸟类的繁殖期(春季)与迁徙季(春秋季)，从而获得具有全季节代表性的声学数据。若受限于设备续航或野外维护条件无法实现全年监测，则最低要求应确保完全覆盖当地鸟类的核心繁殖季。在此期间鸟类鸣唱最为活跃，是评估区域鸟类多样性本底的关键窗口。

5.4 维护时机选择

森林通行条件受地形、降雨和植被季节变化影响，建议选择降雨较少或林道通行良好的季节开展维护。同时应根据设备续航能力提前制定年度维护时间表，减少野外操作风险与难度。

6.数据管理与存储

6.1 文件命名与前缀设置

在设备首次配置时，必须按照监测网络统一的命名规则设置音频文件前缀信息(表1)。多数被动声学设备在未设定前缀时，文件名仅记录录音的开始日期和时间，极易造成多点数据混淆。因此，务必在安装前确认前缀设置正确无误。注意：有些品牌设备对前缀字符（如仅可输入字母和数字）和字数有限制，可视情况进行调整，但是要做好名称转换信息表，以方便后期数据分析时正确转换。

特别需要强调的是音频文件命名的规范性。为确保全局唯一性并便于自动化管理，建议采用包含城市、监测点、设备ID和时间戳的高度结构化命名规则。推荐格式为：<City>_<Site>_<DeviceID>_<YYYYMMDD>_<HHMMSS>.wav。尤为重要的是，所有时间相关的元数据（包括文件名中的时间戳）均应统一采用协调世界时（UTC），以消除因时区不同可能导致的数据混乱与分析错误。下面以GZ_SM_01_20240601_060000.WAV的文件名为例，说明各部分的具体含义：

表1 音频文件前缀信息命名规则

缩写	内容	含义说明
GZ	所在城市*	表示城市代码，如广州为GZ
SM	监测点编号*	指明监测点位置，如石门国家森林公园为SM
01	设备编号*	标记当前使用的设备编号为01
20240601_060000	录音时间	表示录音的开始时间(年月日_时分秒)
.WAV	文件格式	无损音频文件格式

*注：鉴于目前缺乏通用的缩写标准，且需兼顾设备文件名的长度限制，建议在参与城市间采用内部统一定义的拼音缩写，并在元数据备注说明文件中建立严格的对应索引表，以确保区域标识的唯一性。

6.2 数据存储介质推荐

原始音频数据体量较大，建议使用4TB及以上的大容量机械硬盘进行本地集中存储与定期备份。具备条件的单位可配置NAS(网络附加存储)系统，以提升数据存取效率和长期稳定性，降低物理硬盘损坏所带来的风险。各节点单位应在完成本地备份的基础上，每季度或每半年通过邮寄方式，将数据拷贝硬盘寄送至中国鸟类鸣声监测网络管理委员会，以便统一进行异地备份与云端存储管理，确保数据安全与全国层面的统一归档。

6.3 元数据整理要求

每次设备布设与回收后，应及时整理并归档元数据信息，包括但不限于：设备编号、型号与参数设置(特别注意增益值)；监测点编号与GPS坐标；名称转换信息表（如有）；安装与回收时间、现场人员；安装环境说明与拍摄图像信息；以及是否存在丢失、损坏和挪动等情况说明。

7. 辅助调查建议：人工鸟类观察配合

7.1 调查建议

为了评估被动声学监测(PAM)数据的代表性与物种识别准确性，建议在有条件的监测点开展同步的人工鸟类观察调查，以构建声学数据的“实地参照”。

7.2 操作指引

调查人员组成：每次调查应由2位观鸟水平相近的研究人员组成，共同开展同步观察，减少观察偏差。调查时间：建议在日出后1小时内开始，调查时长为15分钟，在鸟类晨间活跃期内完成观察记录。调查范围：以声学设备安装点为圆心，半径150米为标准调查范围。记录范围内所有听见或目视到的野生鸟类。

记录包括：鸟种名称；同一物种的个体数量；鸣叫/飞行/栖息等行为简述(如可观察)；背景噪声等级(如：低、中、高)。附加记录：观察半径以外、或调查点之间移动途中所发现的鸟类，也应作为补充信息记录，并注明“非核心监测点记录”。

7.3 数据整理要求

调查数据应填写在标准的《人工鸟类观察记录表》中，标明调查日期、监测点编号、观察人员姓名、天气情况等。记录表建议在调查结束后24小时内电子化归档，并与声学数据同步编号保存。

外出前快速检查清单(PAM-CHINA)

检查项类别	子项目	核查内容	✓ 是否准备
设备类	录音设备	完好，已设置前缀命名、参数配置无误(采样率48kHz、录音间隔10分钟录1分钟，WAV，16Bits)；设备编号贴纸已粘贴并牢固	☐
	备用录音机	至少1台备用设备，预防主设备故障或遗失	☐
	电池	足量正确型号的电池(根据设备型号准备)，已测试电量	☐
	SD卡	每台设备2张SD卡(建议256GB)，至少1张空卡用于更换	☐
	铅封与剪钳	每台设备至少配套90cm铅封2根和20cm铅封2根，剪钳1把	☐
记录材料	记录表	《PAM-CHINA点位信息表》和《鸟类人工调查记录表》打印或电子版备齐	☐
	笔/平板	纸质记录笔或电子表单填写设备	☐
	拍照APP	已安装“今日水印相机”等应用，调试正常	☐
	拍照指引	确认将拍摄“设备编号图”“生境概貌图”	☐
辅助工具	GPS设备或APP	已安装“两步路”或其他轨迹记录软件	☐
	望远镜	用于人工辅助观察	☐
	工具包	螺丝刀、绑带、固定支架等野外维修必需工具	☐

附录2 中国鸟类被动声学监测网络(PAM-CHINA)监测点位信息表
Appendix 2 Monitoring site information form for the China Avian Passive Acoustic Monitoring Network (PAM-CHINA)

<table>
<tr><th colspan="10">PAM-CHINA 点位信息表</th></tr>
<tr><td>点位信息</td><td>点位编号</td><td></td><td>省份</td><td></td><td>地点</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="5">设备信息</td><td>设备编号</td><td></td><td>类型</td><td></td><td rowspan="2">安装信息</td><td>人员</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>日期</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>是否首装</td><td colspan="2">是□
否□</td><td colspan="2">设备状态</td><td>正常□
异常□
丢失□</td><td colspan="3">异常情况说明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">维护信息</td><td>维护日期</td><td colspan="2"></td><td rowspan="2">维护方式</td><td colspan="4" rowspan="2">换电池 □
换内存卡 □
换铅封 □</td></tr>
<tr><td>维护时间</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6"></td><td>其他</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">干扰信息</td><td>麦克风朝向</td><td colspan="9">东□ 南□ 西□ 北□</td></tr>
<tr><td>干扰描述</td><td colspan="4">□靠近林道或公路(约__米)
□靠近建筑或设施(如哨所、电塔)
□有林木采伐痕迹或人为开垦
□有游客、放牧或其他人员活动迹象
□其他(请注明)：
□无明显人为干扰</td><td colspan="3">背景噪声：
风声 / 水声 /人工声 / 其他</td><td>强 □
中 □
弱 □</td></tr>
<tr><td rowspan="3">地理位置</td><td>经度(十进制)</td><td colspan="4"></td><td colspan="3" rowspan="2">海拔(米)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>纬度(十进制)</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>生境描述</td><td colspan="8">林型：阔叶林 / 针叶林 / 混交林 / 灌丛
林层结构：单层 / 两层 / 多层；林下植被稀疏 / 密闭
林冠闭合度：估计百分比(如 60% / 80%)
优势树种：
地形：平地 / 缓坡(坡度__°)/ 陡坡 / 山谷 / 山脊
与林缘距离：约 __ 米</td></tr>
<tr><td colspan="2">设备照片名称</td><td colspan="3"></td><td>生境照片名称</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="2">其他情况记录</td><td colspan="8"></td></tr>
</table>

附录3　基于被动声学监测的鸟类多样性与生态系统质量评估指标体系

Table 3　Assessment indicator system for avian diversity and ecosystem quality based on passive acoustic monitoring

评估维度 EBV class	关键变量 EBV name	声学替代指标 Acoustic proxies	评估目标与判读方法 Target & interpretation
物种种群 Species populations	物种分布 Species distributions	声学占域率 Acoustic occupancy	目标：监测旗舰种/濒危种的时空分布格局。Target: Monitor spatiotemporal distribution patterns of flagship/endangered species. 判读：比较当前占域率与历史基线。若关键物种在原分布区内的声学占域率检出率显著下降或归零，提示分布范围收缩或发生局部灭绝(Campos-Cerqueira & Aide, 2016)。Interpretation: Compare current occupancy rates with historical baselines. A significant decline or drop to zero in the acoustic detection/occupancy rates of key species within their original range indicates range contraction or local extinction (extirpation).
	种群丰度 Species abundances	鸣叫计数/强度 Call rate/Intensity	目标：评估目标种群的数量变化趋势。Target: Assess population abundance trends of target species. 判读：构建单位时间鸣叫密度的时间序列。若鸣声密度呈显著持续下降趋势，指示种群数量衰退或生境承载力下降(Pérez-Granados & Traba, 2021)。Interpretation: Construct time series of call density per unit time. A significant, sustained declining trend in vocalization density indicates population decline or reduced habitat carrying capacity.
群落组成 Community composition	群落多样性 Taxonomic diversity	声学多样性指数 Acoustic index	目标：评估群落结构的复杂性与丰富度。Target: Assess the complexity and richness of community structure. 判读：指数值与物种丰富度呈正相关。若数值长期维持低位，指示群落结构简单化或生物多样性丧失。Interpretation: Index values are positively correlated with species richness. Persistently low values indicate community simplification or biodiversity loss.

评估维度 EBV class	关键变量 EBV name	声学替代指标 Acoustic proxies	评估目标与判读方法 Target & interpretation
	时空动态 Spatio-temporal dynamics	声学相异度 Acoustic dissimilarity	目标：监测群落演替方向与时空异质性。Target: Monitor the direction of community succession and spatiotemporal heterogeneity. 判读：时间维度：若非季节性的声学指纹发生剧烈更替，提示群落稳定性受损；空间维度：若不同样点间的声学相异度显著降低，则存在生物均质化风险(Lellouch et al., 2014)。Interpretation: Temporal Dimension: Drastic non-seasonal shifts in acoustic fingerprints indicate compromised community stability; Spatial Dimension: A significant decrease in acoustic dissimilarity between sampling sites suggests a risk of biotic homogenization.
生态系统功能 Ecosystem function	生态系统干扰 Ecosystem disturbances	人为噪声 Anthrophony level	目标：评估鸟类发声空间质量。Target: Evaluate soundscape quality. 判读：监测1–8 kHz频段内的信噪比。若人为噪声频域对生物声构成显著遮蔽，表明声学空间质量下降，阻碍物种正常通讯(Barber et al., 2010)。Interpretation: Monitor the signal-to-noise ratio (SNR) within the 1–8 kHz band. If anthrophony significantly masks biophony in the frequency domain, it indicates degraded acoustic space quality and hinders normal species communication.
	生态功能完整性 Functional integrity	声学生态位 Acoustic niche	目标：评估生态系统对声学资源的利用效率与功能完整性。Target: Assess the utilization efficiency of acoustic resources and functional integrity of the ecosystem. 判读：基于声学生态位假说(ANH)，健康的生态系统应具有较高且和谐的频带占用情况(Burivalova et al., 2018)。Interpretation: Based on the acoustic niche hypothesis (ANH), healthy ecosystems should exhibit high and coordinated spectral occupancy.

参考文献 References

Barber JR, Crooks KR, Fristrup KM (2010) The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. Trends in Ecology & Evolution, 25, 180–189.

Burivalova Z, Towsey M, Boucher T, Truskinger A, Apelis C, Roe P, Game ET (2018) Using soundscapes to detect variable degrees of human influence on tropical forests in Papua New Guinea. Conservation Biology, 32, 205–215.

Campos-Cerqueira M, Aide TM (2016) Improving distribution data of threatened species by combining acoustic monitoring and occupancy modelling. Methods in Ecology and Evolution, 7, 1340–1348.

Lellouch L, Pavoine S, Jiguet F, Glotin H, Sueur J (2014) Monitoring temporal change of bird communities with dissimilarity acoustic indices. Methods in Ecology and Evolution, 5, 495–505.

Pérez-Granados C, Traba J (2021) Estimating bird density using passive acoustic monitoring: A review of methods and suggestions for further research. Ibis, 163, 765–783.

生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE

2026, 34 (5): 25423, pages 1–6
doi: 10.17520/biods.2025423
cstr: 32101.14.biods.2025423

•“一带一路”沿线生物多样性专题•

《肯尼亚植物志》编研概况和阶段性成果

魏能[1,2], 周亚东[3], 张彩飞[1,2], 王生位[1,2], 胡光万[1,2], Geoffrey Mwachala[4], 王青锋[1,2*]

1. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074, 中国; 2. 中国科学院中-非联合研究中心, 武汉 430074, 中国; 3. 南昌大学生命科学院学院, 南昌 330031, 中国; 4. National Museum of Kenya, Nairobi 45166-00100, Kenya

摘要: 作为首个由中国科学院全额资助的境外国家植物志编研项目, 《肯尼亚植物志》由中国科学院武汉植物园与肯尼亚国家博物馆共同主编。该项目由国内外20余家科研机构的180余位学者共同参与, 系统开展肯尼亚7,000余种维管植物的调查和研究, 计划出版《肯尼亚植物志》31卷。截至目前, 已组织实施60余次联合野外科考, 采集植物标本1.2万余号, 发现并发表新种22个(含1新变种)。基于“中肯共同编撰 + 联合出版”的模式, 已出版了茜草科和兰科两卷册, 获肯尼亚政府高度评价, 被赞为“对生物多样性保护的重要贡献”, 其中兰科卷被作为国礼, 成为中非科技合作的旗舰性成果。项目通过技术转移、知识共享与人才培养, 为“一带一路”框架下的南南合作提供了新范式, 彰显并提升了我国在全球生物多样性研究与保护中的引领作用。

关键词: 生物多样性; 植物分类学; 植物志; 非洲; 国际合作

魏能, 周亚东, 张彩飞, 王生位, 胡光万, Geoffrey Mwachala, 王青锋 (2025) 《肯尼亚植物志》编研概况和阶段性成果. 生物多样性, 34, 25423. doi: 10.17520/biods.2025423; cstr: 32101.14.biods.2025423.
Wei N, Zhou YD, Zhang CF, Wang SW, Hu GW, Mwachala G, Wang QF (2025) Compilation overview and the phase-specific outcomes of *Flora of Kenya*. Biodiversity Science, 34, 25423. doi: 10.17520/biods.2025423; cstr: 32101.14.biods.2025423.

Compilation overview and the phase-specific outcomes of *Flora of Kenya*

Neng Wei[1,2], Yadong Zhou[3], Caifeng Zhang[1,2], Shengwei Wang[1,2], Guangwan Hu[1,2], Geoffrey Mwachala[4], Qingfeng Wang[1,2*]

1 *Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China*
2 *Sino-Africa Joint Research Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China*
3 *School of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031, China*
4 *National Museum of Kenya, Nairobi 45166-00100, Kenya*

ABSTRACT

Background & Aims: As the first overseas national flora project fully funded by Chinese Academy of Sciences, *Flora of Kenya* is a collaborative project organized by Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences and National Museum of Kenya, involving more than 180 researchers from over 20 institutions. The project aims to systematically document over 7,000 species of vascular plants in Kenya, with a total of 31 planned volumes.

Review Results: Following a “co-compilation and joint publication” model, the project has organized and conducted over 60 joint Sino-Kenyan field expeditions, collected more than 12,000 specimens, discovered and published 22 new species (included 1 new variety), and completed two volumes—Rubiaceae and Orchidaceae, successively. The achievement has been recognized as “an important contribution to biodiversity conservation”. Notably, the Orchidaceae volume was presented as a national gift, symbolizing a flagship outcome of China-Africa scientific cooperation.

Conclusion: Through technology transfer, knowledge sharing, and capacity building, the project establishes a new paradigm for South-South cooperation under the Belt and Road Initiative, enhancing China’s leadership role in global biodiversity research and conservation.

Key words: biodiversity; plant taxonomy; flora; Africa; international cooperation

收稿日期 Received: 2025-10-26; 接受日期 Accepted: 2025-10-30
基金项目: 中国科学院国际合作局项目(SAJC202401; 067GJHZ2023027MI)、国家重点研发计划(2024YFF1307400; 2024YFE0214500)和国家自然科学基金(32200174; 32470225) Supported by the Project of Bureau of International Cooperation, Chinese Academy of Sciences (SAJC202401; 067GJHZ2023027MI), National Key Research & Development Program of China (2024YFF1307400; 2024YFE0214500), and National Natural Science Foundation of China (32200174; 32470225)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: qfwang@wbgcas.cn

1 肯尼亚的自然环境概况

肯尼亚位于非洲东部, 东非大裂谷纵贯南北, 赤道横跨中部, 因而有“东非十字架”之称。其地理坐标为5° S–5° N、34°–42° E, 境内以高原为主, 平均海拔1,500 m, 东非大裂谷将国土分为东西两翼, 呈西高东低的地势格局(Olago, 2013)。最高峰肯尼亚山海拔5,199 m, 为非洲第二高峰, 其冰川地貌与赤道雪景构成独特的自然景观; 气候上属热带草原气候, 西部高原年均温约18℃, 东部沿海地区湿热, 年均温约24℃, 旱季雨季分明(Western et al., 2015)。

由于独特的地理和特殊的气候条件, 肯尼亚孕育出多样的植被类型, 从沿海森林到干燥荒漠, 从低海拔的稀树草原到中海拔的山地森林, 再到高海拔的欧石南(*Erica*)灌丛, 及冰缘带的千里木(*Dendrosenecio*)–半边莲(*Lobelia*)群落(Western et al., 2015)。在全球36个生物多性热点地区中, 肯尼亚包含3个, 分别是东非高山区(Eastern Afromontane)、东非沿海森林带(Coastal Forests of Eastern Africa)和非洲之角(Horn of Africa) (Myers et al., 2000; Habel et al., 2019)。受经济发展滞后、人口不断增长等因素的影响, 包括肯尼亚在内的大多数非洲地区植被破坏严重, 生物多样性正以前所未有的速度快速丧失(Okello & Kiringe, 2004; Stévart et al., 2019)。因此, 加快开展肯尼亚植物多样性本底调查、分类学及保育研究, 将为该地区生物资源的保护与可持续利用提供重要的基础数据和科学依据(Beentje, 2016)。

2 肯尼亚植物分类学研究历史与现状

植物志是记载某国或某一地区植物多样性的“百科全书”。通过植物志的编研, 对其植物多样性进行本底调查, 是开展生物多样性研究、保护和利用的基础。由于植物志编研往往需要众多的植物分类学专业人员历时多年才能完成, 因此一套高质量植物志的出版, 是该地区植物区系与分类学综合研究实力的重要体现。由于历史条件限制, 肯尼亚至今没有完整的国家植物志书。过去百年间, 在肯尼亚乃至非洲开展植物志研究的力量主要来自欧美等发达国家, 我国植物学家鲜有机会涉足。据统计, 肯尼亚分布有约7,000种维管植物(Zhou et al., 2017a), 历史上覆盖该地区的主要植物志有两部: 英国皇家植物园邱园主持编撰的《热带非洲植物志》(*Flora of Tropical Africa*, *FTA*) (FTA , 1868–1937)及其后续著作《热带东非植物志》(*Flora of Tropical East Africa*, *FTEA*) (FTEA, 1948–2012)。其中, *FTEA*作为迄今规模最大的区域性热带植物志, 系统地收录了肯尼亚、乌干达和坦桑尼亚的12,000余种维管植物, 约占非洲大陆已知物种的1/4, 其中包含约2,500个区域特有物种(Beentje, 2015), 反映了欧美学者对热带东非地区植物多样性的调查研究水平。

然而, *FTEA*是以一科一册(少数大科又分单册)的方式出版, 跨度长达64年之久, 即便在专业植物学研究机构中, 完整收藏者亦属罕见。当前, 该志书缺乏可公开访问的在线资源, 早期卷册内容也亟待更新。而且整套书仅含少量代表性线描图, 仅在兰科第3册中附有少量彩色照片(Cribb, 1989), 且引证标本少。尽管该志书被誉为有着很高研究水平的植物志(Beentje, 2015), 然而在实际应用中, 学者较少直接依赖其进行肯尼亚植物的鉴定。目前, 更常用的工具书主要是1994年出版的《肯尼亚乔灌木与藤本植物》(*Kenya Trees, Shrubs, and Lianas*) (Beentje, 1994)和2013年出版的《肯尼亚高地野生花卉和蕨类》(第三版) (*Upland Kenya Wild Flowers and Ferns, 3rd edn*) (Agnew, 2013)。这些工具书虽然在物种鉴定方面有较好的针对性, 但覆盖物种和区域不全, 且提供的形态、分布及生境信息等极其有限, 难以与内容详实、信息权威、具有“百科全书”性质的植物志相比。

尽管*FTEA*提供了翔实的分类学资料, 但近30年来分子系统学迅猛发展带来的分类系统变动导致该志书显得陈旧, 尤其是早期出版的卷册。据统计, 各卷册自出版至2022年间, 热带东非地区新增444个新类群和新记录种, 涉及81科218属植物(Du et al., 2023)。近年来, 受经济等因素影响, 欧美国家对非洲国家的科研投入显著减少, 且当地科研力量尚不足以独立开展系统性调查和研究, 这与日益紧迫的生物多样性保护需求形成鲜明对比, 亟需通过国际合作弥补该地区的研究空白(Wang & Lou, 2010; 王青锋, 2015)。

3 《肯尼亚植物志》的编研内容和特点

我国科研力量的崛起和国际合作拓展为肯尼

亚的植物志编研带来了新的机遇。随着中非科研合作的深化, 特别是中国科学院“走出去”战略的实施, 在中国科学院国际合作局的资助下, 《肯尼亚植物志》编研项目于2015年11月正式启动。作为首个由中国科学家主导的境外国家植物志编研项目, 该植物志借鉴和吸收了《泛喜马拉雅植物志》的先进理念和编研经验(萨仁和洪德元, 2014; Wang & Hong, 2022), 采用中肯联合编撰和出版的模式, 整合分子系统学、居群概念等现代研究方法, 通过大规模野外本底调查获取第一手资料, 填补该领域研究空白, 其成果将有助于提升该地区的生物多样性研究水平。

在项目支持下, 中肯科研人员将对肯尼亚的植物多样性进行长期的调查和分类研究, 逐步厘清肯尼亚境内植物资源状况、原生和重要的外来植物种类及其分布, 并在科、属、种(含种下单元)等分类等级上进行科学地分类订证。在此基础上编撰出版《肯尼亚植物志》, 记述肯尼亚植物的科、属、种(含种下单元)的科学名称、主要引证文献、引证标本、形态特征、生长环境、分布及分布图, 并尽可能辅以彩色照片与线描图展示植物类群的形态特征和生境等信息。

本志书特点包括: (1)以广泛的野外考察和标本查阅为第一手材料, 实地查阅和引证馆藏标本, 尽可能使用精细照片或线描图充分展示植物各器官细节特征; (2)采用最新的分类系统与最新研究成果, 如被子植物采用APG IV系统, 对于种的划分则强调基于居群概念, 整合分子系统学与综合证据提出新的分类观点; (3)基于经确认的每一份标本和观察记录中的详细地理坐标, 为每个物种提供精确的散点式分布图, 并以县为单位引证主要凭证标本; (4)配套建设《肯尼亚植物志》网站, 为读者提供包含更多内容的在线网络版植物志; (5)采用“中肯共同编撰 + 联合出版”的模式, 由湖北科学技术出版社与东非自然历史学会联合出版, 进一步激发肯方合作者的学术参与热情和研究主动性。

4 《肯尼亚植物志》的编研进展

自2015年《肯尼亚植物志》编研项目启动以来, 先后已有中、肯20余家科研机构的180余位科研人员参与编研工作。中国科学院中-非联合研究中心组织中肯学者和研究生在肯尼亚境内各地已进行了60余次系统的野外资源调查和标本采集, 累计采集维管植物标本超1.2万号。在编研过程中, 研究人员已命名并发表22个肯尼亚新种(含1新变种) (表1), 澄清了肯尼亚茜草科、葫芦科、大戟科、夹竹桃科等植物类群的诸多分类学难题, 逐步建立了肯尼亚维管植物分布数据库, 在国际植物分类学主流期刊发表了一系列有影响力的研究论文。编研团队先后出版了《肯尼亚常见植物》(*Common Plants of Kenya*) (Wang et al., 2016)、《非洲常见植物野外识别手册: 肯尼亚山》(*Field Guide to Wild Plants of Africa: Mt. Kenya*) (Zhou et al., 2018), 发布了加兰切尼山、阿伯德尔山、肯尼亚沿海、肯尼亚山等7个地区的维管植物名录(Mbuni et al., 2019; Kipkoech et al., 2020; Melly et al., 2020; Ngumbau et al., 2020a; Watuma et al., 2022; Zhou et al., 2022; Rono et al., 2023)等阶段性研究成果。

目前, 该项目已经完成《肯尼亚植物志》两卷的出版。第二十三卷(茜草科)为项目首个出版的卷册, 共收录茜草科植物83属334种(含种下单元) (Zhou et al., 2023)。该书得到肯尼亚政府的高度评价, 被赞为“对生物多样性保护的重要贡献”。第四卷(兰科)为项目第二个出版的卷册, 收录兰科植物48属303种(含种下单元) (Zhang et al., 2025)。兰科卷中包含165种的原色图版、162种的墨线图版, 使得兰科卷中超过80%的物种都有图版展示。同时, 新编研的植物志与*FTEA*对应卷册相比, 包含了最新研究成果, 内容有较大变动。例如, 兰科植物种数较*FTEA*中记录的肯尼亚兰花种类增加56种。但在这两卷的编研过程中, 仍然存在物种划分以及部分属的界定等诸多争议或未解决的分类学疑难问题, 为今后专科专属更深入的分类修订研究提供了可借鉴的案例。

2025年6月12日, 在成都举办的第二届“一带一路”科技交流大会上, 肯尼亚国家博物馆馆长玛丽·吉昆古(Mary Gikungu)表示: “感谢中肯植物学家为肯尼亚及东非生物多样性保护做出的重要贡献, 兰科卷的出版是中肯科技合作的重要里程碑, 《肯尼亚植物志》项目也为全球生物多样性保护国际合作提供了新范式”。菊科、豆科、大戟科、夹竹桃科、葫芦科、锦葵科等卷册的编研正有序推进, 即将陆续出版。通过该项目区系调查和分类学研究,

表1 基于《肯尼亚植物志》项目已命名并发表的肯尼亚植物新类群
Table 1 The named and published new taxa based on the *Flora of Kenya* project

新类群 New taxa	科名 Family name	属名 Genus name	来源 Reference
肯尼亚景天 *Sedum keniense* Y. D. Zhou, G. W. Hu & Q. F. Wang	景天科 Crassulaceae	景天属 *Crassula*	Zhou et al., 2016a
近革叶马愈儿 *Zehneria subcoriacea* Y. D. Zhou & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	马愈儿属 *Zehneria*	Zhou et al., 2016b
有棱蒴莲 *Adenia angulosa* G. W. Hu & Q. F. Wang	西番莲科 Passifloraceae	蒴莲属 *Adenia*	Ngumbau et al., 2017
肯尼亚锡生藤 *Cissampelos keniensis* Y. D. Zhou & Q. F. Wang	防己科 Menispermaceae	锡生藤属 *Cissampelos*	Zhou et al., 2017b
白花拟堇菜凤仙 *Impatiens pseudoviola* var. *alba* G. W. Hu & Q. F. Wang	凤仙花科 Balsaminaceae	凤仙花属 *Impatiens*	钟志祥等, 2017
长花马愈儿 *Zehneria longiflora* G. W. Hu & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	马愈儿属 *Zehneria*	Wei et al., 2017
钩叶芦荟 *Aloe uncinata* L. E. Newton & Wabuyele	阿福花科 Asphodelaceae	芦荟属 *Aloe*	Newton & Wabuyele, 2018
拉巴伊姊妹芦荟 *Aloe zygorabaiensis* L. E. Newton & Wabuyele	阿福花科 Asphodelaceae	芦荟属 *Aloe*	Newton & Wabuyele, 2018
肯尼亚膜叶铁角蕨 *Hymenasplenium kenyense* Li Bing Zhang, K. W. Xu & Kamau	铁角蕨科 Aspleniaceae	膜叶铁角蕨属 *Hymenasplenium*	Xu et al., 2019
丹尼尔多穗兰 *Polystachya danielana* G. W. Hu, W. C. Huang & Q. F. Wang	兰科 Orchidaceae	多穗兰属 *Polystachya*	Tian et al., 2019
块茎马愈儿 *Zehneria tuberifera* G. W. Hu & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	马愈儿属 *Zehneria*	Watuma et al., 2019
努特瓦芦荟 *Aloe ngutwaensis* T. Mwadime & Matheka	阿福花科 Asphodelaceae	芦荟属 *Aloe*	Matheka et al., 2020
奇农多巴豆 *Croton kinondoensis* G. W. Hu, Ngumbau & Q. F. Wang	大戟科 Euphorbiaceae	巴豆属 *Croton*	Ngumbau et al., 2020c
蛛形硫桑 *Dorstenia arachniformis* Matheka, Malombe, T. Mwadime & Mwachala	桑科 Moraceae	硫桑属 *Dorstenia*	Malombe et al., 2020
埃尔贡悦猴瓜 *Peponium elgonense* N. Wei, G. W. Hu & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	悦猴瓜属 *Peponium*	Mutie et al., 2020
大苞马愈儿 *Zehneria grandibracteata* G. W. Hu, N. Wei & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	马愈儿属 *Zehneria*	Wei et al., 2020
单果马愈儿 *Zehneria monocarpa* G. W. Hu, Ngumbau & Q. F. Wang	葫芦科 Cucurbitaceae	马愈儿属 *Zehneria*	Ngumbau et al., 2020b
火山岩大戟 *Euphorbia mbuinzauensis* N. Wei, Mwachala, G. W. Hu & Q. F. Wang	大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 *Euphorbia*	Wei et al., 2021
滨海豆腐柴 *Premna mwadimei* Ngumbau & G. W. Hu	唇形科 Lamiaceae	豆腐柴属 *Premna*	Ngumbau et al., 2021
基安贡贝彩列当 *Harveya kiangombensis* Ngugi, Kirika & Mwachala	列当科 Orobanchaceae	彩列当属 *Harveya*	Ngugi et al., 2022
安德里亚娜芦荟 *Aloe nderiana* Wabuyele & L. E. Newton	阿福花科 Asphodelaceae	芦荟属 *Aloe*	Wabuyele & Newton, 2023
溪崖芦荟 *Aloe rupestorrens* Wabuyele & Sus. Br.	阿福花科 Asphodelaceae	芦荟属 *Aloe*	Wabuyele & Brown, 2025

已成功培养30多位青年学者，其中多位已成长为肯尼亚植物分类学研究的骨干力量。

5 《肯尼亚植物志》的重要意义

《肯尼亚植物志》力争记载肯尼亚223科1,773属的7,000余种维管植物，计划出版31卷(Duocet Group, 2025)，使其成为肯尼亚乃至东非地区植物资源可持续利用和生态环境保护的工具书。这项工作将实现肯尼亚植物多样性家底的厘清，促进对植物资源的认识和利用，为生物多样性研究和保护提供极为重要的基础本底信息和科学依据。通过对肯尼亚境内植物进行系统深入地科学考察和调查，全面采集区域内植物标本，丰富了中肯两国植物标本馆的馆藏，为进化生物学、植物生理学、分子生物学等研究提供了材料。此外，据多识植物百科的统计，肯尼亚维管植物记载的1,773属中，中国原产的属仅有783个(Duocet Group, 2025)，表明两国的植物组成差异显著。巨大的差异说明两国植物资源类型高度互补，在经济、科学以及社会发展等方面蕴藏着巨大价值，可通过双方合作进行深入研究和挖掘。作为首部由中国科学家组织编撰的境外国家植物志，它的出版标志着中国科学院“走出去”发展布局取得重要成果，扩大了我国植物科学研究在国际上的影响力，提升了我国科研工作者和研究机构的国际形象。此外，该书的编研将为我国和非洲国家培养更多的植物学青年人才。综合而言，该项目对肯尼亚乃至东非国家的基础科学研究、自然资源保护、经济和社会可持续性发展具有十分重要的意义，为肯尼亚乃至东非地区植物分类学的发展和非洲生物多样性保护和可持续利用提供了“中国方案”。

中肯共同编撰、联合出版的《肯尼亚植物志》开创了“科研合作 + 能力建设”的南南合作全新模式。该模式既弥补了肯尼亚本土科研资源短板，又通过技术转移、知识共享和人才培养深化了双边合作。*Nature*杂志特别指出，该项目已成为“一带一路”科技合作的示范案例：China’s Belt and Road Initiative is boosting science (Nature Editorial, 2023)。2025年4月，在肯尼亚总统访华之际，《肯尼亚植物志》兰科卷被遴选为国礼，并被肯尼亚新闻媒体称为“中非合作论坛框架下的旗舰成果”。这一外交实践凝聚了中肯两国科研人员10年协作的智慧结晶，成为新时代中非命运共同体的科技人文象征。与肯方深入开展生物多样性合作研究是“一带一路”倡议在科技合作领域的落实和践行，也将有力推动我国与其他“一带一路”国家的全面科技合作。

参考文献

Agnew ADQ (2013) Upland Kenya Wild Flowers and Ferns: A Flora of the Flowers, Ferns, Grasses, and Sedges of Highland Kenya, 3rd edn. Nature Kenya, Nairobi.

Beentje HJ (1994) Kenya Trees, Shrubs and Lianas. National Museums of Kenya, Nairobi.

Beentje HJ (2015) Science comes from collaboration and communication: The *Flora of Tropical East Africa* as an example. Webbia, 70, 171–179.

Beentje HJ (2016) Tropical African floras: Progress, gaps, and future. Symbolae Botanicae Upsalienses, 38, 101–119.

Cribb PJ (1989) Orchidaceae (Part 3). In: Flora of Tropical East Africa (ed. Polhill RM). Royal Botanic Gardens, Kew, London.

Du SL, Wang MX, Wei N, Mwachala G, Hu GW, Wu L, Wang SW, Wang QF (2023) Contributions to the *Flora of Tropical East Africa*. Plants, 12, 1336.

Duocet Group (2025) Duocet Wiki of Plants. http://duocet.ibiodiversity.net/. (accessed on 2025-09-22)

FTA (1868–1937) Flora of Tropical Africa. Royal Botanic Gardens, Kew, London.

FTEA (1948–2012) Flora of Tropical East Africa. Royal Botanic Gardens, Kew, London.

Habel JC, Rasche L, Schneider UA, Engler JO, Schmid E, Rödder D, Meyer ST, Trapp N, Sos del Diego R, Eggermont H, Lens L, Stork NE (2019) Final countdown for biodiversity hotspots. Conservation Letters, 12, e12668.

Kipkoech S, Melly DK, Muema BW, Wei N, Kamau P, Kirika PM, Wang QF, Hu GW (2020) An annotated checklist of the vascular plants of Aberdare Ranges Forest, a part of Eastern Afromontane Biodiversity Hotspot. PhytoKeys, 149, 1–88.

Malombe I, Matheka KW, Mwadime T, Mwachala G (2020) *Dorstenia arachniformis* (Moraceae), a new species from *Combretum* wooded grasslands in Makueni County, Kenya. Phytotaxa, 468, 226–230.

Matheka KW, Malombe I, Mwadime T, Wabuyele E, Newton LE (2020) *Aloe ngutwaensis* (Asphodelaceae), a new species in Makueni County, south-eastern Kenya. Cactus World, 38, 211–215.

Mbuni YM, Zhou YD, Wang SW, Ngumbau VM, Musili PM, Mutie FM, Njoroge B, Kirika PM, Mwachala G, Vivian K, Rono PC, Hu GW, Wang QF (2019) An annotated checklist of vascular plants of Cherangani hills, Western Kenya. Phytokeys, 120, 1–90.

Melly DK, Kipkoech S, Muema BW, Kamau P, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2020) An annotated checklist of the vascular flora of South and North Nandi Forests, Kenya. PhytoKeys, 155, 87–139.

Mutie FM, Rono PC, Kathambi V, Wei N, Kamau P, Gituru RW, Hu GW, Wang QF (2020) *Peponium elgonense* (Cucurbitaceae), a new species from Mount Elgon in Kenya. Phytotaxa, 443, 189–197.

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403, 853–858.

Nature Editorial (2023) China’s Belt and Road Initiative is boosting science—The west must engage, not withdraw. Nature, 622, 669–670.

Newton LE, Wabuyele EN (2018) Two new species of *Aloe* (Asphodelaceae) in Kenya. Cactus World, 36, 185–188.

Ngugi G, Kirika PM, Mwachala G (2022) *Harveya kiangombensis* (Orobanchaceae), a new parasitic species from Kenya, East Africa. Phytotaxa, 559, 293–297.

Ngumbau VM, Luke Q, Nyange M, Wanga VO, Watuma BM, Mbuni YM, Munyao JN, Oulo MA, Mkala EM, Kipkoech S, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2020a) An annotated checklist of the coastal forests Kenya, East Africa. PhytoKeys, 147, 1–191.

Ngumbau VM, Musili PM, Hu GW (2021) *Premna mwadimei* (Lamiaceae), a new species from Cha Simba, a remnant of coastal forests of Kenya, East Africa. Phytotaxa, 510, 155–162.

Ngumbau VM, Nyange M, Dai C, Zhong ZX, Wei N, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2017) *Adenia angulosa* (Passifloraceae), a new species from coastal forests of Kenya and Tanzania. PhytoKeys, 313, 137–142.

Ngumbau VM, Nyange M, Wei N, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2020b) *Zehneria monocarpa* (Cucurbitaceae), a new species from the relicts of Kenya’s coastal forests. Phytotaxa, 443, 258–264.

Ngumbau VM, Nyange M, Wei N, van Ee BW, Berry PE, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2020c) A new species of *Croton* (Euphorbiaceae) from a Madagascan lineage discovered in coastal Kenya. Systematic Botany, 45, 242–248.

Okello MM, Kiringe JW (2004) Threats to biodiversity and their implications in protected and adjacent dispersal areas of Kenya. Journal of Sustainable Tourism, 12, 55–69.

Olago DO (2013) Quaternary evolution. In: Kenya: A Natural

Outlook——Geo-environmental Resources and Hazards (Vol. 16) (eds Paron P, Olago DO, Omuto CT), pp. 31–37. Elsevier, Oxford.

Rono PC, Mutie FM, Kathambi V, Wei N, Watuma BM, Nanjala C, Wagutu GK, Kirika PM, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2023) An annotated plant checklist of the transboundary volcanic Mt. Elgon, East Africa. PhytoKeys, 223, 1–174.

Sa R, Hong DY (2014) Introduction to the compilation and research project of *Flora of the Pan-Himalayas*. Bulletin of Biology, 49(1), 1–3. (in Chinese) [萨仁, 洪德元 (2014) 《泛喜马拉雅植物志》编研项目简介. 生物学通报, 49(1), 1–3.]

Stévart T, Dauby G, Lowry PP, Blach-Overgaard A, Droissart V, Harris DJ, Mackinder BA, Schatz GE, Sonké B, Sosef MS, Svenning JC, Wieringa JJ, Couvreur TLP (2019) A third of the tropical African flora is potentially threatened with extinction. Science Advances, 5, eaax9444.

Tian J, Huang WC, Mbuni YM, Kamau P, Mwachala G, Malombe I, Hu GW, Wang QF (2019) *Polystachya danielana* (Orchidaceae: Polystachyinae), a new species from Kenya. Phytotaxa, 405, 195–202.

Wabuyele E, Brown S (2025) *Aloe rupestorrens* (Asphodelaceae), a new pendulous species from northern Kenya. Haseltonia, 32, 1–8.

Wabuyele E, Newton L (2023) A new shrubby species of *Aloe* (Asphodelaceae) in a UNESCO Heritage Site in northern Kenya. Cactus World, 41, 273–277.

Wang Q, Hong DY (2022) Understanding the plant diversity on the roof of the world. The Innovation, 3, 100215.

Wang QF (2015) What conservation needs? Man and Biosphere, (4), 71. (in Chinese) [王青锋 (2015) 保护需要什么? 人与生物圈, (4), 71.]

Wang QF, Lou ZP (2010) A look into Sino-African joint studies on biodiversity. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 24, 268–272.

Wang QF, Zhou YD, Hu GW, Yan X, Mwachala G, Gituru R (2016) Common Plants of Kenya. Hubei Science and Technology Press, Wuhan.

Watuma BM, Kipkoech S, Melly DK, Ngumbau VM, Rono PC, Mutie FM, Mkala EM, Nzei JM, Mwachala G, Gituru RW, Hu GW, Wang QF (2022) An annotated checklist of the vascular plants of Taita Hills, Eastern Arc Mountain. PhytoKeys, 191, 1–158.

Watuma BM, Wei N, Melly DK, Kipkoech S, Kirika PM, Hu GW, Wang QF (2019) *Zehneria tuberifera* (Cucurbitaceae), a new species from Taita Hills, Kenya. Phytotaxa, 411, 215–222.

Wei N, Miyawa DO, David MK, Ngumbau VM, Zhong ZX, Mwachala G, Hu GW, Wang QF (2017) *Zehneria longiflora* (Cucurbitaceae), a new species from Kenya. Phytotaxa, 324, 89–94.

Wei N, Mutie FM, Mwachala G, Grace OM, Hu GW, Wang QF (2021) *Euphorbia mbuinzauensis*, a new succulent species in Kenya from the Synadenium group in *Euphorbia* sect. *Monadenium* (Euphorbiaceae). PhytoKeys, 183, 21–35.

Wei N, Zhong ZX, Melly DK, Kipkoech S, Watuma BM, Ngumbau VM, Kamau P, Hu GW, Wang QF (2020) *Zehneria grandibracteata* (Cucurbitaceae), an overlooked new species from western Kenyan forests. PhytoKeys, 165, 85–98.

Western D, Musyoki C, Mwangi E, Mwachala G, Said M, Wargute P, Matiku P, Landsberg F, Kamala E, Waruingi L, Kariuki PC, Yobterik A, Situma C, Ojwang G, Njino L, Mulenkei L, Muli D, Malombe I, Marchant R, Platts P, Muchai M, Kamau P, Njoroge P, Wabuyele E, Mbaluka JK, Kangethe S, Malonza P, Nyingi D, Mbau J, Gikungu M, Kioko E, Otieno N, Baraza F, Kanga E, Chege S, Henninger N, Jetz W, Stickler M (2015) Kenya's Natural Capital: A Biodiversity Atlas. Government of Kenya, Ministry of Environment Natural Resources and Regional Development Authorities.

Xu KW, Chen CW, Kamau P, Liao WB, Zhang LB (2019) Four new species of the fern genus *Hymenasplenium* (Aspleniaceae) from Africa and Asia. Phytotaxa, 416, 34–42.

Zhang CF, Hu GW, Tian J, Huang WC, Ngumbau VM (2025) Orchidaceae. In: Flora of Kenya, Vol. 4 (eds Wang QF, Mwachala G). Hubei Science and Technology Press, Wuhan & Nature Kenya, Nairobi.

Zhong ZX, Miyawa DO, Hu GW, Wang QF (2017) A new variety of *Impatiens* L. from Taita, Kenya. Plant Science Journal, 35, 318–320. (in Chinese with English abstract) [钟志祥, Daniel Odhiambo Miyawa, 胡光万, 王青锋 (2017) 肯尼亚凤仙花属一新变种. 植物科学学报, 35, 318–320.]

Zhou YD, Hu GW, Mwachala G, Wang QF (2018) Field Guide to Wild Plants of Africa: Mt. Kenya. Hubei Science and Technology Press, Wuhan.

Zhou YD, Hu GW, Yan X, Mwachala G, Gituru RW, Wang QF (2016a) *Sedum keniense* (Crassulaceae), a new species from Mt. Kenya, East Africa. Phytotaxa, 261, 177–184.

Zhou YD, Liu B, Mbuni Y, Yan X, Mwachala G, Hu GW, Wang QF (2017a) Vascular flora of Kenya, based on the *Flora of Tropical East Africa*. PhytoKeys, 90, 113–126.

Zhou YD, Mbuni Y, Hu GW, Yan X, Mwachala G, Wang QF (2016b) *Zehneria subcoriacea* (Cucurbitaceae), a new species from Kenya. Phytotaxa, 277, 282–286.

Zhou YD, Mbuni Y, Hu GW, Zhong ZX, Yan X, Mwachala G, Wang QF (2017b) *Cissampelos keniensis* (Menispermaceae), a new species from Mt. Kenya, East Africa. Phytotaxa, 292, 57–64.

Zhou YD, Mwachala G, Hu GW, Wang QF (2022) Annotated checklist of the vascular plants of Mount Kenya, East Africa. Phytotaxa, 546, 1–108.

Zhou YD, Zhang CF, Hu GW, Mwachala G (2023) Rubiaceae. In: Flora of Kenya (eds Wang QF, Mwachala G), vol. 23. Hubei Science and Technology Press, Wuhan & Nature Kenya, Nairobi.

(责任编委: 高连明　责任编辑: 黄祥忠)