

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第24卷 第4期 2016年4月

目次

编者按

- 363 中国西南干旱河谷的植物多样性: 区系和群落结构的
空间分异与成因
沈泽昊

研究报告

- 367 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异
刘晔 朱鑫鑫 沈泽昊 孙航
- 378 中国西南干旱河谷植物群落
的数量分类和排序分析
刘晔 李鹏 许玥 石松林 应凌霄 张婉君 彭培好 沈泽昊
- 389 怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子
许玥 李鹏 刘晔 张婉君 秦思雨 沈泽昊
- 399 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落 β 多样性的影响
李新辉 刘延虹 刘晔 许玥 杨阳 沈泽昊
- 407 金沙江干旱河谷植物群落
的数量分类及其结构分异的环境解释
刘晔 许玥 石松林 彭培好 沈泽昊
- 421 雅砻江和大渡河干旱河谷植被物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响
韩杰 沈泽昊 石松林 彭培好

- 431 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较

张志明 沈蕊 张建利 徐倩 罗园 遇翹楚 张秋霞 欧晓昆

- 440 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较

杨阳 韩杰 刘晔 忠永茨仁 石松林 斯那此里 许玥 应凌霄 张婉君 沈泽昊

- 453 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟

应凌霄 刘晔 陈绍田 沈泽昊

综述

- 462 云南干热河谷植被与环境研究进展

杨济达 张志明 沈泽昊 欧晓昆 耿宇鹏 杨明玉

- 475 西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用

沈泽昊 张志明 胡金明 韩杰 杨济达 应凌霄

生物编目

- 489 金沙江上游干旱河谷植被

李云琴 杜凡 汪健 李瑞年 刘洋

封面: 横断山区干旱河谷植被主要分布在横断山区及其南延山系所在的九条大河的干流河谷部分河段, 属于一类隐域性植被。刘晔等(见本期第378–388页)运用大量野外调查数据对干旱河谷的植物群落进行了数量分类。封面图示干旱河谷的主要植被类型及其分布。(提供者: 沈泽昊)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 24 No. 4 April 2016

CONTENTS

Editorial

- 363 **Plant diversity in the dry valleys of Southwest China: spatial deviation and determinants for flora and plant communities**
Zehao Shen

Original Papers

- 367 **Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China**
Ye Liu, Xinxin Zhu, Zehao Shen and Hang Sun
- 378 **Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China**
Ye Liu, Peng Li, Yue Xu, Songlin Shi, Lingxiao Ying, Wanjun Zhang, Peihao Peng and Zehao Shen
- 389 **Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley**
Yue Xu, Peng Li, Ye Liu, Wanjun Zhang, Siyu Qin and Zehao Shen
- 399 **Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River**
Xinhui Li, Yanhong Liu, Ye Liu, Yue Xu, Yang Yang and Zehao Shen
- 407 **Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River**
Ye Liu, Yue Xu, Songlin Shi, Peihao Peng and Zehao Shen
- 421 **Comparison of plant species diversity and composition in the dry valleys of Yalong River and Dadu River: evaluating the effects of climate, topography and space**
Jie Han, Zehao Shen, Songlin Shi and Peihao Peng

- 431 **Comparisons of species composition between soil seed banks and aboveground plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River**

Zhiming Zhang, Rui Shen, Jianli Zhang, Qian Xu, Yuan Luo, Qiaochu Yu, Qiuxia Zhang and Xiaokun Ou

- 440 **A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan**

Yang Yang, Jie Han, Ye Liu, Ciren Zhongyong, Songlin Shi, Cili Sina, Yue Xu, Lingxiao Ying, Wanjun Zhang and Zehao Shen

- 453 **Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model**

Lingxiao Ying, Ye Liu, Shaotian Chen and Zehao Shen

Reviews

- 462 **Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan**

Jida Yang, Zhiming Zhang, Zehao Shen, Xiaokun Ou, Yupeng Geng and Mingyu Yang

- 475 **Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China**

Zehao Shen, Zhiming Zhang, Jinming Hu, Jie Han, Jida Yang and Lingxiao Ying

Bioinventory

- 489 **Desert vegetation in dry valleys of the upstream of Jinsha River**

Yunqin Li, Fan Du, Jian Wang, Ruinian Li and Yang Liu

Cover Illustration: The dry valley vegetation of Hengduan Mountain ranges, defined as an azonal vegetation type, is distributed in the separated reaches of the nine major rivers embedded in the Hengduan Mountains ranges and its southern extensions. Liu et al (for details see pages 378–388 of this issue) provided a quantitative classification of the dry valley plant communities, based on a comprehensive field investigation. The picture shows the spatial distribution of major vegetation types of the dry valleys. (Courtesy of: Zehao Shen)

•编者按•

中国西南干旱河谷的植物多样性：区系和群落结构的空間分异与成因

沈泽昊*

(北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

Plant diversity in the dry valleys of Southwest China: spatial deviation and determinants for flora and plant communities

Zehao Shen*

Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

中国西南干旱河谷基本分布在横断山区及其南延山系范围之内(张荣祖, 1992), 涉及怒江、澜沧江、元江、金沙江、南盘江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江(含支流白水江)等的上、中游干流及部分支流的下陷河谷段, 多呈南北或西北–东南走向, 海拔范围在500–2,500 m。这些生境相似的河段在地形上相对封闭, 且被高耸的山岭彼此阻隔, 相距数十至数百公里, 形成了横断山区特有的倒置生境孤岛群。西南干旱河谷生物多样性的研究意义在于它代表了中国热带和亚热带湿润季风气候控制的自然地理背景下具有隐域和残遗性质的半干旱–干旱植被和植物区系(吴征镒和王荷生, 1983), 这是青藏高原隆起、南亚–东亚季风加强所产生的诸多自然地理变迁结果之一(张新时, 1978; 郑度和杨勤业, 1985), 并与全球同纬度以干旱–半干旱气候主导的植被与植物区系背景相呼应(张荣祖, 1992; 金振洲, 2002; 吴征镒等, 2011)。

关于西南干旱河谷生态与环境的零星研究可追溯到20世纪初。建国以后, 《四川植被》(四川植被协作组, 1980)、《中国植被》(吴征镒, 1980)和《云南植被》(吴征镒, 1987)先后对干旱河谷植被特征和群落类型进行了整体性的梳理。1981–1984年期间, 中国科学院组织的横断山区科学考察针对干旱河

谷开展了自然地理综合研究, 从多学科角度考察分析了这一独特自然地理类型的结构与成因(张荣祖, 1992), 并从农业资源开发和土地利用的角度进行了整体评价和区划(杨勤业等, 1988)。20世纪80年代起, 元江、金沙江作为干热河谷的代表, 岷江作为干暖河谷的代表, 其植物区系、植物群落、土地利用、环境变化与自然灾害等方面得到了较为持久和深入的调查、监测和实验研究, 并取得了大量成果, 对其成因机制形成了更加深刻的认识(刘伦辉和张建华, 1988; 朱华, 1990; 金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002; 杨钦周, 2007)。但由于干旱河谷彼此隔离、环境恶劣、交通不便, 过去30年来的生物多样性研究主要集中于特定河流或特定对象, 所采用的研究方法不一, 缺少长期监测, 因此结果的可比性较差, 整体研究的数据基础较为薄弱。

迄今为止, 关于干旱河谷植物多样性的宏观格局与区域分异仍缺乏清晰的整体认识, 在区域生物多样性形成与维持机制方面还存在众多争议和不确定性。特别是以下问题尚无定论: (1)干旱河谷植被的分类地位、地带性与非地带性以及原生与次生性质如何? (2)干旱河谷植物区系的历史、地理、生态与进化成因对当前生物多样性的分布与构成有怎样的影响? (3)干旱河谷中物种分布的主导环境限

收稿日期: 2016-02-20; 接受日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(41371190、31170449)和交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

制因子是什么? 植物物种对环境变化(包括气候变化和人类干扰)的敏感性如何? (4)在相对恶劣和脆弱的干旱河谷环境下, 为了维护干旱河谷的生态安全, 如何实现其独特生物多样性资源的保护与可持续利用?

在2009–2014年期间, 我们先后对怒江、澜沧江、金沙江、元江、南盘江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江(含支流白水江)干旱河谷进行了为期5年的植被调查, 总计行程1.2万公里。共调查了270个干旱河谷样点的725个群落样方, 和273个沿海拔梯度设置的样方, 前后采集并鉴定植物标本约1.5万号; 同时整理了金振洲和欧晓昆(2000)、金振洲(2002)、欧晓昆等(2006)、朱鑫鑫(2014)等滇、川干旱河谷专著中的植被样方信息, 共获得了1,635个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 植物群落样方数据, 包括186科1,016属2,794种(含种下等级)维管束植物在西南9大流域干旱河谷中的分布信息。这份详实的调查数据, 使本专辑得以首次从物种、群落和植物区系等层次出发, 对我国西南横断山区干旱河谷植物多样性的整体格局、空间分异及环境与地理成因进行全面系统的研究。

本专辑包括10篇针对干旱河谷全域和特定区域的生物多样性研究论文和2篇研究综述。在全域性研究中, 综合本次研究的实地植被调查结果和历史文献数据, 对9大江河干旱河谷的维管束植物区系进行了科、属构成特征与地理分异的数量分析(刘晔等, 2016c); 首次对西南干旱河谷全域的植被进行了群落分类, 并结合气候、地形、地理位置等进行了植被空间分异的环境和空间因素影响解析(刘晔等, 2016a)。在局域研究部分, 我们分别对怒江河谷的乡土植物与入侵植物多样性(许玥等, 2016)、元江干热河谷灌草丛群落的 β 多样性地理格局(李新辉等, 2016)、元江干热河谷灌草丛植物群落与土壤种子库的联系(张志明等, 2016)、金沙江干旱河谷的植物群落结构分异与环境、空间解释(刘晔等, 2016c)、金沙江上游干旱河谷植被的结构与组成(李云琴等, 2016)、雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落的植物群落多样性与群落构建的影响因子(韩杰等, 2016)进行了分析。在此基础上, 进一步比较分析了滇西北三江并流地区怒江、澜沧江和金沙江流域的6条植被垂直样带上植物丰富度与构成的差异及其主导影响因子(杨阳等, 2016); 另外, 针对代表性的

干旱河谷特有植物清香木(*Pistacia weinmannifolia*), 运用Maxent模型分析了该物种分布的限制性环境因子, 以及在过去和未来气候变化情景下其分布的变化(应凌霄等, 2016)。最后, 本专辑对云南干旱河谷的环境、植被、植物区系的主要问题及其研究历史进行了综述(杨济达等, 2016); 并在文献和部分数据分析的基础上, 阐述了西南干旱河谷自然环境与植物多样性的总体特征, 当前环境变化对生物多样性的影响, 并提出了生物多样性保护与可持续利用的思路与对策(沈泽昊等, 2016)。

综合看来, 本专辑为西南干旱河谷植物多样性的构成特征和地理分异提供了如下新的信息: (1)干旱河谷植物区系显示了强烈的热带亲缘和温带区系的后期影响, 以及突出的中国–喜马拉雅成分和一定的地中海–中亚残遗成分, 中国特有属比例偏低; 植物区系具有西南–东北方向的梯度变化, 怒江–澜沧江–元江与长江上游各支流之间的区系分离反映了流域地貌发育对河谷植物区系联系的显著影响(刘晔等, 2016a)。(2)干旱河谷植被类型与结构仍存在明显的区域分异, 低温和降水季节性的限制作用明显。稀树草丛、肉质灌丛是干热河谷的典型类型; 落叶小叶灌丛、常绿灌丛和常绿硬叶林是干暖河谷的优势类型; 暖性针叶林和落叶灌丛在干温河谷占优势(刘晔等, 2016b); (3)干旱河谷植物物种丰富度具有以大尺度分异为主的空间格局, 地理隔离效应明显高于环境异质性的影响(杨阳等, 2016; 韩杰等, 2016); 干旱河谷是入侵植物分布广泛而丰富的地区(许玥等, 2016); (4)干旱河谷的部分典型成分(如清香木)在冰期–间冰期可能呈现以东进–西退为主的分布区变化, 可以印证“glacial out-of-Hengduan Mts.”的观点(Fan et al, 2013), 干旱河谷可能是这些区系成分在当前气候下的避难所(应凌霄等, 2016)。

本系列研究侧重从植物区系和植物群落组成等方面, 对我国西南干旱河谷的植物多样性格局进行初步分析描述和成因探讨。未来有待进一步从以下3个方面作深入研究: (1)扩充物种分布信息和群落调查样本, 完善植物区系和植物群落结构与分异的概念体系; (2)加强植物功能属性、谱系结构和高精度干旱河谷环境空间数据库的建设, 开展干旱河谷植物群落构建的生物地理、进化与适应的机理研究; (3)根据干旱河谷植物分布、环境适应及其对自

然与非自然干扰的响应, 研究这类独特生物多样性资源的有效保护与合理利用对策。

致谢: 在本项研究2009–2014年的野外植被调查中, 我们先后得到成都理工大学园林系研究生段士中、褚延梅、杨健, 中国科学院昆明植物研究所的杨扬, 交通部科学院的陈学平、王云, 云南省公路交通规划设计研究院的房锐、姜睿等的大力支持和帮助。中国科学院武汉植物园赵子恩高工、云南迪庆州党校潘发生教授帮助鉴定了大部分植物标本, 在此一并致以衷心感谢! 特别感谢为本专辑研究提供大力支持的方精云院士、孙航研究员、彭培好教授和陈济丁研究员! 匿名审稿人、责任编辑的建设性意见对提高本专辑的学术质量帮助甚大, 主编马克平研究员对本专辑的出版给予了很大鼓励和帮助, 在此谨致谢忱! 最后, 我们愿将这本专辑特别敬献给长期从事我国西南干旱河谷生物多样性研究的老一辈科学家, 和正在从事干旱河谷生态保护与可持续发展研究的同行们。

参考文献

- Cooperating Group for Vegetation of Sichuan (1980) Vegetation of Sichuan. Sichuan People's Publishing House, Chengdu. (in Chinese) [四川植被协作组 (1980) 四川植被. 四川人民出版社, 成都.]
- Fan DM, Yue JP, Nie ZL, Li ZM, Comes HP, Sun H (2013) Phylogeography of *Sophora davidii* (Leguminosae) across the 'Tanaka-Kaiyong Line', an important phytogeographic boundary in Southwest China. *Molecular Ecology*, 22, 4270–4288.
- Han J, Shen ZH, Shi SL, Peng PH (2016) Comparison of plant species diversity and composition between dry valleys of Yalong River and Dadu River: evaluating the effects of climate, topography and space. *Biodiversity Science*, 24, 421–430. (in Chinese with English abstract) [韩杰, 沈泽昊, 石松林, 彭培好 (2016) 雅砻江和大渡河干旱河谷植物物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响. 生物多样性, 24, 421–430.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry Valley. Yunnan University Press & Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社和云南科技出版社, 昆明.]
- Li XH, Liu YH, Liu Y, Xu Y, Yang Y, Shen ZH (2016) Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. *Biodiversity Science*, 24, 399–406. (in Chinese with English abstract) [李新辉, 刘延虹, 刘晔, 许玥, 杨阳, 沈泽昊 (2016) 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落beta多样性的影响. 生物多样性, 24, 399–406.]
- Li YQ, Du F, Wang J, Li RN, Liu Y (2016) Desert vegetation in dry valleys of the upstream of Jinsha River. *Biodiversity Science*, 24, 488–493. (in Chinese with English abstract) [李云琴, 杜凡, 汪健, 李瑞年, 刘洋 (2016) 金沙江上游干旱河谷植被. 生物多样性, 24, 489–494.]
- Liu LH, Zhang JH (1988) A study on the dry valleys in Yunnan. *Tropical Geography*, 8, 355–362. (in Chinese) [刘伦辉, 张建华 (1988) 云南干旱河谷特点与治理途径. 热带地理, 8, 355–362.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016a) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016a) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. 生物多样性, 24, 378–388.]
- Liu Y, Xu Y, Shi SL, Peng PH, Shen ZH (2016b) Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River. *Biodiversity Science*, 24, 407–420. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 许玥, 石松林, 彭培好, 沈泽昊 (2016b) 金沙江干旱河谷植物群落的数量分类及其结构分异的环境解释. 生物多样性, 24, 407–420.]
- Liu Y, Zhu XX, Shen ZH, Sun H (2016c) Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 367–377. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 朱鑫鑫, 沈泽昊, 孙航 (2016c) 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异. 生物多样性, 24, 367–377.]
- Ou XK, Zhang ZM, Wang CY, Wu YC (2006) Vegetation of Meri Snow Mountain. Science Press, Beijing. (in Chinese) [欧晓昆, 张志明, 王崇云, 吴玉成 (2006) 梅里雪山植被研究. 科学出版社, 北京.]
- Shen ZH, Zhang ZM, Hu JM, Han J, Yang JD, Ying LX (2016) Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 475–488. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张志明, 胡金明, 韩杰, 杨济达, 应凌霄 (2016) 西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用. 生物多样性, 24, 475–488.]
- Wu ZY (1980) Vegetation of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY (1987) Vegetation of Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北

- 京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011) Floristics of Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2011) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Wang HS (1983) Chinese Physical Geography. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理. 科学出版社, 北京.]
- Xu Y, Li P, Liu Y, Zhang WJ, Qin SY, Shen ZH (2016) Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley. Biodiversity Science, 24, 389–398. (in Chinese with English abstract) [许玥, 李鹏, 刘晔, 张婉君, 秦思雨, 沈泽昊 (2016) 怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子. 生物多样性, 24, 389–398.]
- Yang JD, Zhang ZM, Shen ZH, Ou XK, Geng YP, Yang MY (2016) Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan. Biodiversity Science, 24, 462–474. (in Chinese with English abstract) [杨济达, 张志明, 沈泽昊, 欧晓昆, 耿宇鹏, 杨明玉 (2016) 云南干热河谷植被与环境研究进展. 生物多样性, 24, 462–474.]
- Yang QY, Zheng D, Liu YH (1988) Physical-geographic feature and economic development of the dry valleys in the Hengduan Mountains, Southwest China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2(2), 17–24. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度, 刘燕华 (1988) 横断山区干旱河谷的自然特点及其开发利用. 干旱区资源与环境, 2(2), 17–24.]
- Yang QZ (2007) Study on the arid-valley scrubs in the upper reaches of Minjiang River. Journal of Mountain Science, 25, 1–32. (in Chinese with English abstract) [杨钦周 (2007) 岷江上游干旱河谷灌丛研究. 山地学报, 25, 1–32.]
- Yang Y, Han J, Liu Y, Zhongyong C, Shi SL, Sina C, Xu Y, Ying LX, Zhang WJ, Shen ZH (2016) A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers Region, northwestern Yunnan. Biodiversity Science, 24, 440–452. (in Chinese with English abstract) [杨阳, 韩杰, 刘晔, 忠永茨仁, 石松林, 斯那此里, 许玥, 应凌霄, 张婉君, 沈泽昊 (2016) 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较. 生物多样性, 24, 440–452.]
- Ying LX, Liu Y, Chen ST, Shen ZH (2016) Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model. Biodiversity Science, 24, 453–461. (in Chinese with English abstract) [应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊 (2016) 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 24, 453–461.]
- Zhang RZ (1992) The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang XS (1978) Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Vegetation in China: The Characteristics of Chinese Vegetation Geography Linked with the Effects of the Plateau on Atmospheric Cycling. Annual Proceedings of the Botanical Society of China in 1978, Urumqi, China. (in Chinese?) [张新时 (1978) 青藏高原与中国植被: 与高原对大气环流的作用相联系的中国植被地理分布特征. 中国植物学会1978年年会论文, 乌鲁木齐.]
- Zhang ZM, Shen R, Zhang JL, Xu Q, Luo Y, Yu QC, Zhang QX, Ou XK (2016) Comparisons of species composition between soil seed banks and aboveground plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. Biodiversity Science, 24, 431–439. (in Chinese with English abstract) [张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆 (2016) 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 24, 431–439.]
- Zheng D, Yang QY (1985) Some problems on the altitudinal belts in southeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. Acta Geographica Sinica, 40, 60–69. (in Chinese) [郑度, 杨勤业 (1985) 青藏高原东南部山地垂直自然带的几个问题. 地理学报, 40, 60–69.]
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in the dry-hot valley of Yuanjiang County. Acta Botanica Yunnanica, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷的肉质多刺灌丛研究. 云南植物研究, 12, 301–310.]
- Zhu XX (2014) The Flora of Seed Plants in Three Rivers Valley of SW China. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [朱鑫鑫 (2014) 华西南三江河谷种子植物区系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]

• 研究报告 •

中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异

刘 晔¹ 朱鑫鑫² 沈泽昊^{3*} 孙 航^{4*}

1 (北京大学深圳研究生院, 城市规划与设计学院, 深圳 518055)

2 (信阳师范学院生命科学学院, 河南信阳 464000)

3 (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

4 (中国科学院昆明植物研究所生物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650204)

摘要: 根据对云南、四川、甘肃三省九条主要河流干旱河谷的植物群落调查数据, 对我国西南干旱河谷维管束植物区系的科、属分布区类型进行划分, 并分析其地理分布格局。结果表明: (1)西南干旱河谷区的植物区系地理成分复杂, 联系广泛, 共包含11个科级和15个属级分布区类型; 总体上, 科、属两级热带/温带成分比例分别为3.06和1.77, 显示了强烈的热带区系亲缘及温带区系的后期影响; 与地中海-西亚至中亚植物区系存在一定联系; 其东亚成分和中国特有成分比例低于亚热带区系平均水平, 且中国-喜马拉雅成分比例高于中国-日本成分。(2)从西南向东北方向, 植物区系的热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强; 科、属水平区系成分与古地中海-中亚区系的相似性逐渐增强; 东亚和中国特有成分比例增加; 南盘江与元江的干旱河谷植物区系之间存在中国-日本和中国-喜马拉雅成分的分界线。(3)根据干旱河谷植物属区系成分的比例构成将怒江、澜沧江和元江与其他流域分开, 显示了长江溯源侵蚀和水系合并对西南诸河流植物区系发育的影响。

关键词: 中国西南干旱河谷; 维管束植物; 区系成分; 相似性; 空间分异

Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China

Ye Liu¹, Xinxin Zhu², Zehao Shen^{3*}, Hang Sun^{4*}

1 School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055

2 College of Life Science, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000

3 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

4 Key Laboratory of Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204

Abstract: Based on plant community data collected from dry valleys of nine major rivers in Gansu, Sichuan and Yunnan provinces of Southwest China, we divided the families and genera of the vascular plants into geographic elements of Chinese flora, and analyzed the spatial patterns. We found the flora of dry valleys of Southwest China revealed a complex composition of geographic elements with wide floristic connections, including 11 family area-types and 15 genera area-types. The ratio of tropical versus temperate floristic elements was 3.06 at the family level, and 1.77 at the genus level, showing a distinctive affinity for tropical floras, and later imprints of temperate floras. A clear floristic linkage existed between the dry valley floras and the Mediterranean, Western- and Central-Asian floras. The percentages of East Asian elements and endemic Chinese elements were below the average value in the flora found for the subtropical region in China. The Sino-Himalayan element had a value higher than that for the Sino-Japan element in the dry valley floras. The floristic affinity to the tropics weakened while affinity to temperate flora intensified moving in the region from the southwest to northeast. Linkages with the Mediterranean-Central Asian floras, and also the percentage of East Asian elements and endemic Chinese elements increased in the same direction. A boundary between the Sino-Japan type and Sino-Himalayan type was detected between the dry valley floras of Nanpan-

收稿日期: 2015-09-11; 接受日期: 2016-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn; hsun@mail.kib.ac.cn

jiang River and Yuanjiang River. With respect to the genus level floristic composition of geographic elements, Nujiang River, Lancangjiang River and Yuanjiang River were separated from the other rivers, which are all upper branches of the Yangtze River. This departure indicated the impacts of the evolution of the Yangtze River, which were characterized by headward erosion, river confluences, on the characteristics of modern flora in dry valleys.

Key words: dry valleys of Southwest China; vascular plants; floristic elements; similarity; spatial differentiation

现代植物区系的空间结构是植物对区域环境,尤其是气候条件长期适应的结果,可以反映植物类群的扩散、迁移和分布情况(王荷生, 1997), 对其进行研究不仅有助于了解植物群落的特征、性质、起源和分布(宋永昌, 2001), 还是植物群落分类、植被分区和植物地理研究的基础, 并且可为制定生物多样性保护对策、可持续地利用植物资源提供重要参考(Vetaas & Grytnes, 2002)。植物科的分布型可以反映相对古老的区系联系, 代表植物演化的区域共性。植物属的分类特征相对稳定, 同属种通常起源相同、进化趋势类似, 因此属的分布型可以反映更加一致的演化历程和区系发育环境(彭华和吴征镒, 1997; 吴征镒等, 2011; 应俊生和陈梦玲, 2011)。

西南干旱河谷的植物区系具有特定的来源组成, 并且在独具特色的干旱河谷气候条件(杨勤业和郑度, 1989)和相对封闭的河谷环境下经历了长期的适应和演化过程(吴征镒和王荷生, 1983), 物种组成具有很显著的特有性(金振洲, 2002)。其中干热河谷以热带性质的科、属、种为主(金振洲和欧晓昆, 2000), 典型植被呈稀树草原外貌; 干暖河谷以热带性质的科、属占优势, 发育了与地中海沿岸的马基植被(Maquis)(河谷型马基植被)相似的外貌结构(张荣祖, 1992; 金振洲和欧晓昆, 2000); 干温河谷植物区系中温带成分的比例高于热带成分, 同时掺杂较多的高山(喜马拉雅)–北极成分(张荣祖, 1992)。

对我国西南地区干旱河谷的植物研究始于20世纪50年代; 80年代后, 《中国植被》、《四川植被》、《云南植被》等先后总结了干旱河谷植被的类型、结构及物种组成, 局部研究主要涉及植被、植物区系以及古植物学等方面(朱华, 1990; 曹永恒和金振洲, 1993; 金振洲和欧晓昆, 2000; 孙航和李志敏, 2003; Zhang et al, 2011), 特别是金振洲等(1995)和金振洲(2002)对川西和云南的干旱河谷植物区系地理、植被分类和地理进行了系统总结。然而, 迄今未见对我国西南各干旱河谷植物区系的汇总分析,

因此其整体特征、结构成分与地理分异还不清楚。

本文在对我国西南地区九大江河干旱河谷段的植被进行全面群落学调查的基础上, 进一步汇集有关文献中的植物分布数据, 首次对该区域干旱河谷植物区系的科、属地理成分的组成、分布及各流域之间的相关性进行分析、比较, 探讨西南干旱河谷植物区系的性质、组成特征和空间分化格局, 以期对其形成发育的背景、对外联系, 包括各大河流之间的关联有所反映。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

我国亚热带干旱河谷, 主要分布在横断山区范围内的几条大江河流域, 包括南盘江、元江、怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江以及白龙江等流域的局部河谷段(张荣祖, 1992; 包维楷和王春明, 2000; 明庆忠, 2006; 邱祖青等, 2007), 具有独特的气候、地貌和植被组合特征。区域地势整体北高南低、各条大江河谷底部的海拔也自北向南降低。具有干旱气候的河谷段随河道走向不规则分布, 一般只是在河谷底至两侧山地的一定海拔范围内, 总面积较小(金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。总体上, 西南干旱河谷的温度高、年降雨量低、蒸发量大, 与垂直带的高海拔地区及同一纬度东部地区的气候特征不同(张荣祖, 1992), 且不同河谷气候也有较大差异(张荣祖, 1992; 金振洲, 1998, 1999)。其中, 半湿润–半干旱河谷出现在西南纵向岭谷区的南部边缘与东部, 半干旱–干旱河谷出现在滇西北与川西南的三江上段。

干热河谷植被普遍具有扭曲、变矮、叶变小、革质、多毛或刺的形态特征, 以适应干旱气候。“稀树灌木草丛”以旱生禾草草丛为主构成大片草地植被, 并散生稀疏的乔木和灌木, 并有少数的肉质多刺灌丛(金振洲和欧晓昆, 2000; 刘晔等, 2016)。干暖河谷植被多为小叶、硬叶、多刺、疏生、矮生的

灌丛, 常成半荒漠状外貌, 有散生的耐旱乔木和硬叶栎类灌丛分布(金振洲和欧晓昆, 2000; 刘晔等, 2016)。干温河谷的主要植被类型为干旱小叶灌丛, 以成丛散生的阔叶灌丛为主, 草本植物稀少(刘伦辉, 1989; 张荣祖, 1992; 刘晔等, 2016)。

针对地质历史时期金沙江从石鼓被河流袭夺、与元江分离这一历史事件(Barbour, 1936; 任美镠等, 1959; Clark et al, 2004), 将金沙江流域干旱河谷以石鼓为界, 分为金沙江上段和金沙江下段。

1.2 样地设置与调查

2009年7月至2013年8月, 分别对云南、四川、甘肃境内的怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江流域的干旱河谷进行野外样方调查, 共设置采样点275个, 调查了面积100 m² (10 m × 10 m)的植被样方993个, 采样区域基本覆盖了西南地区亚热带干旱河谷的分布范围(图1)。

植被调查采样尽量选取人为干扰不明显的地点。采样点总体上沿江设置, 样点之间的距离10 km左右。根据生境条件在每个样点设置2–6个样方。调查样方中草本、灌木的种类、多度、盖度, 以及乔木的种类、胸径、株高。测量记录样方经纬度和海拔信息, 以及坡度、坡向、坡位等环境因子。

在植被调查过程中, 野外采集植物标本6,000余份, 主要依据《中国植物志》、《云南植物志》和

《四川植物志》完成分类鉴定, 共记录2,340个物种。为了充分反映干旱河谷植物区系的构成及其分布状况, 本研究还收录已出版的云南和四川境内干旱河谷植物区系的研究成果, 包括金振洲和欧晓昆(2000)、金振洲(2002)、欧晓昆等(2006)及朱鑫鑫(2014)中的数据, 最终参照《中国植物志》(中国植物志编辑委员会, 1959–2004)统一拉丁名, 建立物种数据库。共包含分布于西南九大江河干旱河谷中的186科1,016属2,794种维管束植物(表1)。

1.3 数据处理

1.3.1 植物区系地理成分分析

根据吴征镒等(2011)对世界和中国种子植物区系地理成分的划分, 以及《中国植物志第一卷》(吴征镒和陈心启, 2004)中对蕨类和石松类植物区系组成的划分, 对西南干旱河谷分布的维管束植物科、属进行分布区类型划分(附录1); 参照沈泽昊和张新时(2000), 将各分布区类型划分为世界分布成分、热带成分、北方温带成分、古地中海成分和东亚成分五大类, 分别在科、属水平上作进一步统计分析。

1.3.2 植物区系地理成分相似性

选择Jaccard指数(C_j)比较不同流域干旱河谷植物区系构成的相似性。计算公式是:

$$C_j = c / (a + b - c) \quad (1)$$

其中, c 表示两个样本共有的物种数, a 和 b 分别表示样本A和样本B的物种数。 C_j 的取值范围在0–1, 值

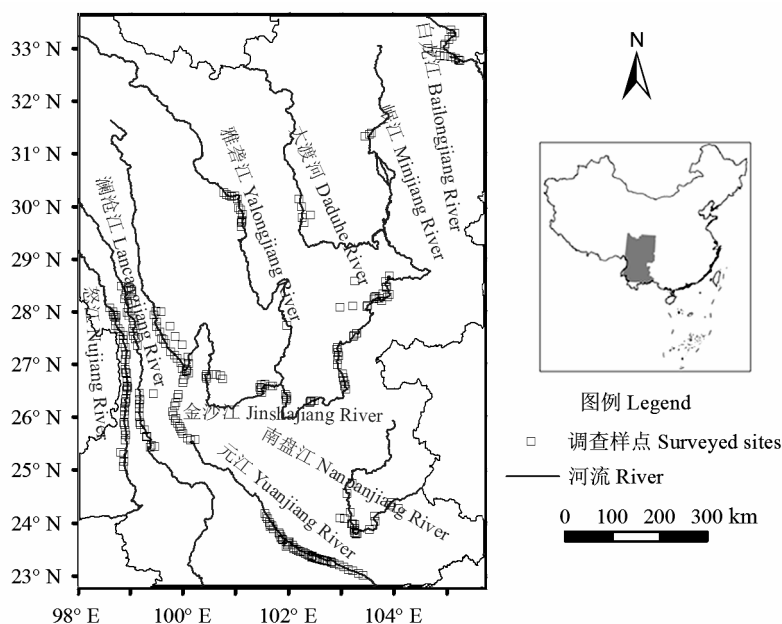


图1 西南九个流域干旱河谷的植物调查采样点分布(中国全图审图号GS(2008)1157号)

Fig. 1 The distribution of sampling sites for the vegetation investigation in dry valleys of 9 rivers of Southwest China

表1 中国西南各流域干旱河谷植被的样方分布
Table 1 The plot distribution of vascular plants in dry valleys of Southwest China

| 流域 Valley | 样方数 Number of plots | 海拔 Elevation (m) | 东经 East longitude (°) | 北纬 North latitude (°) |
|------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 白龙江 Bailongjiang River | 136 | 762–1,016 | 104.6–105.21 | 32.76–33.35 |
| 大渡河 Daduhe River | 47 | 1,200–1,432 | 102.17–102.38 | 29.64–30.14 |
| 金沙江 Jinshajiang River | 563 | 358–3,298 | 99.17–103.88 | 25.56–28.69 |
| 澜沧江 Lancangjiang River | 129 | 1,010–4,297 | 98.8–100.22 | 24.82–28.48 |
| 岷江 Minjiang River | 24 | 1,710–2,270 | 103.42–103.54 | 31.33–31.4 |
| 南盘江 Nanpanjiang River | 38 | 952–1,787 | 102.94–104.04 | 23.78–24.74 |
| 怒江 Nujiang River | 385 | 680–1,999 | 98.42–98.91 | 24.65–28.07 |
| 雅砻江 Yalongjiang River | 62 | 1,236–2,736 | 100.74–101.93 | 27.73–30.27 |
| 元江 Yuanjiang River | 228 | 182–1,530 | 100.43–103.38 | 23.01–25.17 |

越大，相似性越高。

2 结果

2.1 植物科属组成

所记录的西南干旱河谷分布的维管束植物共计186科1,016属2,794种，包括蕨类和石松类植物29科56属165种、裸子植物4科12属20种、被子植物153科948属2,609种。其中，种类最多的前四个科依次为菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科，共占总属数的25.69%，总种数的26.38%；另外，唇形科、毛茛科、大戟科、茜草科也包含较多的种、属，共占总属数的8.66%和总种数的11.20%。有15个属的物种数 >15，分别为铁线莲属 (*Clematis*)、蒿属 (*Artemisia*)、悬钩子属 (*Rubus*)、栒子属 (*Cotoneaster*)、大戟属 (*Euphorbia*)、藁草属 (*Carex*)、蔷薇属 (*Rosa*)、柳属 (*Salix*)、栎属 (*Quercus*)、木蓝属 (*Indigofera*)、唐松草属 (*Thalictrum*)、榕属 (*Ficus*)、蓼属 (*Polygonum*)、薯蓣属 (*Dioscorea*)、堇菜属 (*Viola*)，占总种数的11.48%。总体上，本区维管束植物优势科、优势属明显，另有36个单属单种科，520个单种属，分别占本区总科数的19.35%，总属数的51.18%，反映了西南干旱河谷地区相对古老和复杂的植物区系组成。

不同流域由于干旱河谷的范围大小不同(表1)，科、属、种数差别较大(表2)，但菊科、蝶形花科、禾本科在各河流区系中均为种类最多的科(表2)。

2.2 植物区系地理成分构成

2.2.1 科的区系成分构成与分布

记录的全部186科维管束植物属于11个分布区类型，29科蕨类和石松类植物属于6个分布区类型，

4科裸子植物属于2个分布区类型，153科被子植物属于11个分布区类型(表3)。其中包括世界分布58科，占总数的31.2%。余下128科中不同地理成分占除世界分布科外总科数的百分比从大到小分别为：泛热带分布(54.7%)、北温带分布(19.5%)、东亚和热带美洲间断分布(9.4%)、东亚和北美洲间断分布(3.9%)、热带亚洲至热带大洋洲分布(3.9%)、旧世界热带分布(3.1%)，其他类型仅含1–2科。温带分布(分布型8–10)合计31科，占除世界分布科外总科数的24.2%，而热带分布(分布型2–7)有95科，占除世界分布科外总科数的74.2%，近于前者3倍，反映了干旱河谷植物区系较强的热带亲缘。

各流域的科分布类型组成，均以泛热带分布为主，其次为北温带分布，还有一定数量的东亚(热带、亚热带)和热带美洲间断分布；除主体的热带成分和温带成分，大渡河、金沙江下段、澜沧江和怒江还有东亚分布(表3)。

2.2.2 属的植物区系成分构成与分布

记录到的全部1,016属维管束植物属于中国植物区系的全部15个分布区类型，56属蕨类和石松类植物属于11个分布区类型，12属裸子植物属于6个分布区类型，948属被子植物属于15个分布区类型(表4)。其中世界分布有71属，占总属数的7.0%。余下945属中不同地理成分占除世界分布属外总属数的百分比从大到小的顺序为：泛热带分布(22.2%)、北温带分布(16.0%)、热带亚洲(印度–马来西亚，太平洋诸岛)分布(9.6%)、旧世界热带分布(8.1%)、旧世界温带分布(7.6%)、热带亚洲至热带大洋洲分布(6.2%)、东亚和北美洲间断分布(5.4%)、热带亚洲至热带非洲分布(5.0%)、热带亚洲和热带美洲间断

表2 中国西南各流域干旱河谷植被的主要维管束植物科组成
Table 2 The composition of dominant families of vascular plants in dry valleys of Southwest China

| 流域 Valley | 科数 Number of families | 属数 Number of genera | 种数 Number of species | 种类最多的科 Top families of vascular plants | | | 单属单种科数 Families with single genus and single species |
|--|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|---------------------|--------------|--|
| | | | | 科 Family | 百分比 Percentage % | | |
| | | | | | 属 Genus | 种 Species | |
| 白龙江 Bailongjiang River | 63 | 125 | 153 | 禾本科、菊科、蔷薇科、蝶形花科 Gramineae, Compositae, Rosaceae, Fabaceae | 32.80 | 37.25 | 38 |
| 大渡河 Daduhe River | 80 | 174 | 239 | 菊科、禾本科、蝶形花科、百合科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Liliaceae | 31.61 | 32.22 | 33 |
| 金沙江下段 Jinshajiang River Downstream | 145 | 597 | 1,174 | 菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae | 29.65 | 29.56 | 40 |
| 金沙江上段 Jinshajiang River Upstream | 118 | 401 | 714 | 菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae | 31.42 | 33.19 | 40 |
| 澜沧江 Lancangjiang River | 138 | 465 | 882 | 菊科、禾本科、蝶形花科、蔷薇科 Compositae, Gramineae, Fabaceae, Rosaceae | 28.17 | 31.41 | 37 |
| 岷江 Minjiang River | 39 | 82 | 99 | 菊科、蔷薇科、蝶形花科、禾本科 Compositae, Rosaceae, Fabaceae, Gramineae | 37.80 | 41.41 | 19 |
| 南盘江 Nanpanjiang River | 66 | 163 | 206 | 禾本科、菊科、蝶形花科、大戟科 Gramineae, Compositae, Fabaceae, Euphorbiaceae | 37.42 | 37.86 | 36 |
| 怒江 Nujiang River | 161 | 621 | 1,176 | 禾本科、菊科、蝶形花科、唇形科 Gramineae, Compositae, Fabaceae, Labiatae | 27.05 | 26.02 | 44 |
| 雅砻江 Yalongjiang River | 73 | 164 | 240 | 菊科、蝶形花科、唇形科、蔷薇科 Compositae, Fabaceae, Labiatae, Rosaceae | 29.27 | 31.67 | 35 |
| 元江 Yuanjiang River | 89 | 338 | 496 | 禾本科、蝶形花科、菊科、大戟科 Gramineae, Fabaceae, Compositae, Euphorbiaceae | 36.09 | 40.32 | 30 |

分布(4.2%)、东亚(东喜马拉雅-日本)分布(3.9%)、中国-喜马拉雅分布(3.7%)、温带亚洲分布(2.3%)、中国-日本分布(2.1%)、中国特有分布(1.7%)、地中海区、西亚至中亚分布(1.5%)、中亚分布(0.3%)(表4)。热带分布属(分布型2-7)有524属, 占总属数的55.4%; 温带分布属(分布型8-13)为313属, 占33.1%, 其中北方温带成分的属(分布型8-11)为296属, 占总数的31.3%, 古地中海成分的属(分布型12-13)为17属, 占1.8%, 东亚成分的属(分布型14及其2个亚型, 15)为108属, 占11.4%。

各流域干旱河谷种子植物区系的属级区系成分均以泛热带分布和北方温带分布为主, 而温带成分所占比例在属级远高于科级。此外, 岷江无热带亚洲和热带美洲间断分布分布型; 南盘江、怒江、元江不存在代表温带荒漠成分的中亚分布型; 南盘江无中国-喜马拉雅分布型, 岷江、雅砻江没有中国-日本分布型; 而雅砻江无中国特有分布属。其余12个分布型在西南干旱河谷各江段均有分布(表4)。

2.3 古地中海成分的分布比较

科水平没有古地中海成分的分布, 而属水平古

地中海成分的比例为1.8%, 包括17个属2个分布型, 其中木犀榄属(*Olea*)、牻牛儿苗属(*Erodium*)、小蓬属(*Nanophyton*)等14个属为地中海区-西亚至中亚分布, 紫菀木属(*Asterothamnus*)、对节刺属(*Horaninovia*)、角蒿属(*Incarvillea*)等3个属为中亚分布。

不同流域的古地中海成分比例从大到小依次为岷江、白龙江、大渡河、雅砻江、金沙江上段-金沙江下段-澜沧江、怒江、元江、南盘江(表4)。其中: 地中海区-西亚至中亚分布的比例从大到小依次为白龙江、大渡河、澜沧江-怒江、金沙江上段-金沙江下段-岷江-元江、雅砻江、南盘江; 中亚分布的比例从大到小依次为岷江、白龙江、雅砻江、大渡河、金沙江下段、金沙江上段-澜沧江(表4)。

从区内的西南向东北方向, 古地中海成分的比例逐渐增加, 表明与古地中海的联系逐渐增强; 地中海区-西亚至中亚分布, 以及中亚分布也有类似的格局。

2.4 热带成分/温带成分的分布比较

在整个研究区域, 植物区系中科级的热带成分与温带成分比值为3.06, 不同流域从大到小依次为

Table 3 The floristic elements composition of vascular plant family in dry valleys of nine major rivers of Southwest China

[illegible]

表5 西南各流域干旱河谷维管束植物科、属水平热带成分与温带成分的比值
Table 5 Tropical / temperate floristic elements ratio of vascular plants at family and genus level in dry valleys of Southwest China

| 分类等级 Taxonomic level | 白龙江 Bailongjiang River | 大渡河 Daduhe River | 金沙江下段 Jinshajiang River Downstream | 金沙江上段 Jinshajiang River Upstream | 澜沧江 Lancangjiang River | 岷江 Minjiang River | 南盘江 Nanpanjiang River | 怒江 Nujiang River | 雅砻江 Yalongjiang River | 元江 Yuanjiang River |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| 科 Family | 2.56 | 2.55 | 3.23 | 2.45 | 2.70 | 1.25 | 6.17 | 3.46 | 2.36 | 4.89 |
| 属 Genus | 1.05 | 1.25 | 1.90 | 0.94 | 1.20 | 0.39 | 5.66 | 2.18 | 0.74 | 4.59 |

南盘江、元江、怒江、金沙江下段、澜沧江、白龙江、大渡河、金沙江上段、雅砻江、岷江(表5), 大致反映了纬度对热带和温带区系成分分布的影响。

属级植物区系热带成分与温带成分的比值为1.77, 反映了温带成分的影响在区系发育近期增强。不同流域比值从大到小依次为南盘江、元江、怒江、金沙江下段、大渡河、澜沧江、白龙江、金沙江上段、雅砻江、岷江(表5)。从西南向东北, 以及随着河谷平均海拔的上升, 热带成分与温带成分的比值逐渐减小, 热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强。

2.5 东亚成分的分布比较

科水平东亚成分的比例为1.6%, 仅怒江、澜沧江、金沙江下段和大渡河4个流域有东亚成分的分布, 该比例从大到小依次为澜沧江、大渡河、怒江、金沙江下段(表3)。

属水平东亚成分的比例为11.4%, 不同流域比例从大到小依次为白龙江、大渡河、澜沧江、金沙江上段-金沙江下段、岷江、怒江、雅砻江、元江、南盘江。其中中国-喜马拉雅分布的比例从大到小依次为大渡河、金沙江下段、澜沧江、岷江、金沙江上段、雅砻江、白龙江-怒江、元江, 在南盘江流域没有分布; 中国-日本分布的比例从大到小依次

为金沙江下段、澜沧江、金沙江上段、大渡河、怒江、白龙江、南盘江、元江, 而在岷江和雅砻江流域没有分布; 中国特有分布的比例从大到小依次为岷江、金沙江上段-金沙江下段、怒江、白龙江、大渡河-澜沧江、南盘江、元江, 雅砻江流域没有中国特有属的分布(表4)。

因此, 从西南向东北, 东亚成分的比例逐渐增加, 与东亚的联系逐渐增强; 除南盘江外, 其余9个流域干旱河谷的植物区系与喜马拉雅地区的联系均高于与日本的联系, 且中心区域与喜马拉雅和日本的联系高于周边区域。

2.6 不同流域植物区系组成相似性

综上所述, 西南各流域干旱河谷植物区系成分呈现了西南-东北方向的空间梯度分异。其区系成分组成相似性也表现出类似的空间格局(图2)。

科水平上(图2a), 10个流域首先分为2组: 位于西南部的怒江、元江和澜沧江河谷为一组; 另一组中, 雅砻江、大渡河、白龙江、南盘江相似性较高, 与金沙江(含上, 下段)河谷的相似性较低, 与岷江的相似性更低。同样, 在属水平上(图2b), 西南部的元江、怒江、澜沧江和金沙江干旱河谷区系成分分为一组, 其中元江更为特殊; 而甘肃、四川境内的其他河流为另一组。

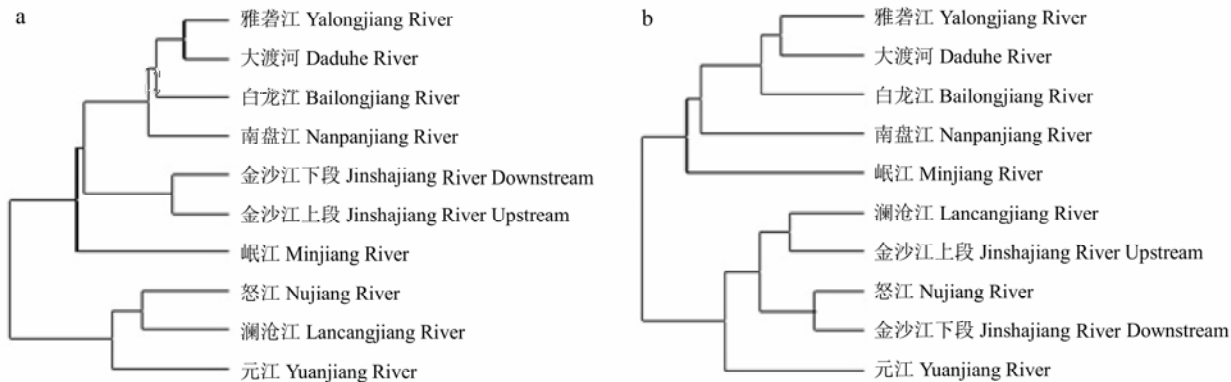


图2 中国西南不同流域干旱河谷的植物区系成分相似性。a: 科区系, b: 属区系。
Fig. 2 The similarity of flora types among dry valleys at family and genus level. a, family flora; b, genus flora.

3 讨论

中国亚热带地区的植物区系以泛热带和北温带分布的地理成分为主, 相对全国来说是东亚区系的核心地段, 特有性强(沈泽昊和张新时, 2000; 陈卫娟, 2006^①); 而中国西南亚热带地区的山体为温带性质, 以温带成分为主, 其次为东亚分布和以泛热带为主的热带成分, 热带成分随海拔上升而减少, 温带成分随海拔上升而增加(沈泽昊等, 2004; 伍杰等, 2012)。

干旱河谷位于我国西南亚热带地区的河谷低地, 植物区系成分主要为泛热带分布、北温带分布、热带亚洲分布, 以热带成分为主, 其次是温带成分, 并有一定的东亚成分和少数的古地中海成分, 中国特有属16属, 占中国种子植物特有分布属239属(吴征镒等, 2011)的7%。从科到属的区系地理成分构成中, 温带成分显著增加, 体现了热带向温带过渡的区系特征, 与我国亚热带植物区系的性质(陈卫娟, 2006^①; 沈泽昊和张新时, 2000)基本一致, 但由于干旱河谷特殊的环境条件, 其东亚成分的比例很小, 特有度低于亚热带区域的平均水平, 反映了本区植物区系的交汇过渡性质, 而特有性在各流域的差异, 说明了各流域古老性和孤立性程度的不同(应俊生和张志松, 1985; 苏志尧, 1999)。

东亚成分中, 除南盘江外, 其他各流域均为中国-喜马拉雅分布多于中国-日本分布, 表明本区与喜马拉雅植物区系有更近的亲缘, 并且这两个变型的总和明显超过了典型东亚成分, 说明东亚成分在元江与南盘江之间存在显著的过渡性, 该结果很好地支持了“田中线”假说(Tanaka, 1954; 李锡文和李捷, 1992; Li & Li, 1997), 表明红河断裂带对云南植物地理的影响在干旱河谷植物区系的分化中同样明显, 与针对云南植物区系分异的早期相关结果一致(朱华和阎丽春, 2003)。

本区与古地中海地区的联系共有17属, 其中与地中海、西亚等地联系的有14属, 与中亚联系的仅有3属, 反映了其与古地中海, 特别是地中海-西亚地区植物区系的渊源, 但这一联系并不突出。与中亚地区的区系联系很弱, 这与喜马拉雅山脉的隆起, 以及青藏高原的旱化和寒化, 导致两者所处环

境在水热方面的差异很大有关(朱鑫鑫, 2014)。沈泽昊和张新时(2000)统计了我国亚热带76个区域植物区系的属级地理成分构成; 地中海区, 西亚至中亚成分所占比例的平均值为0.82%; 中亚成分比例的均值为0.21%。相比而言, 西南干旱河谷植物区系中, 南盘江和雅砻江的地中海、西亚至中亚成分的百分比低于亚热带区域平均值, 澜沧江、怒江、元江和南盘江的中亚成分低于区域平均值。显示古地中海植物区系对当前西南干旱河谷植物区系的影响主要保留在区内偏东北部, 而非目前西南季风影响强烈的西南部分。

以流域为单位的植物区系组成相似性主要呈现了西南和东北的分化。从西南向东北, 热带性质逐渐减弱, 温带性质逐渐增强, 且与古地中海和东亚区系的联系逐渐增强, 特有性逐渐增加, 这一空间分异格局既可联系到水热条件的梯度差异(刘晔, 2015), 也应与河流发育的历史过程有关。青藏高原隆升以后, 长江溯源侵蚀, 导致河流袭夺自东向西的发生(崔之久等, 1998; 杨达源等, 2008), 嘉陵江、岷江、金沙江先后被纳入长江流域体系, 应对其上游各支流干旱河谷的植物区系构成产生深刻影响(张体操, 2010; Zhang et al, 2011; 朱鑫鑫, 2014), 并使之与迄今仍在长江流域以外的怒江、澜沧江和元江(包括其干旱河谷段)的植物区系保持更大的差异。

目前, 关于西南诸河流的干旱河谷缺乏全面的植物区系调查资料。本文基于植物群落的样方调查法, 对各干旱河谷植被进行了系统地植物采集调查, 并综合了部分干旱河谷的植物区系调查数据, 基于一个不完整但具代表性的物种样本完成相关分析。为了降低研究结果的不确定性, 我们针对植物科、属水平进行区系分析。今后我们将在进一步完善植物区系分布数据的基础上, 深化相关研究。

致谢: 衷心感谢北京大学生态系沈利峰、王韬、张婉君、秦思雨、李鹏、杨健、许玥、应凌霄等同学在野外调查中的付出! 衷心感谢赵子恩先生、石松林博士在标本鉴定方面给与的帮助。

参考文献

- Bao WK, Wang CM (2000) Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 18, 57–62. (in Chinese with English abstract) [包维楷, 王春明 (2000) 岷

^① 陈卫娟 (2006) 中亚热带常绿阔叶林植物区系地理研究. 华东师范大学硕士学位论文, 上海.

- 江上游山地生态系统的退化机制. 山地学报, 18, 57–62.]
- Barbour GB (1936) Physiographic history of the Yangtze. *Geographical Journal*, 87, 17–32.
- Cao YH, Jin ZZ (1993) A research on the flora of Nujiang dry-hot valley in Lujiangba, Yunnan. *Guihaia*, 15, 132–138. (in Chinese with English abstract) [曹永恒, 金振洲 (1993) 云南潞江坝怒江干热河谷植被研究. *广西植物*, 15, 132–138.]
- Clark MK, Schoenbohm LM, Royden LH, Whipple KX, Burchfiel BC, Zhang X, Tang W, Wang E, Chen L (2004) Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23, 1006.
- Cui ZJ, Wu YQ, Liu GN, Ge DK, Pang QQ, Xu QH (1998) About “Kunlun-Yellow River” tectonic movement. *Science in China*, 28, 53–59. (in Chinese) [崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 葛道凯, 庞其清, 许清海 (1998) 关于“昆仑-黄河运动”. *中国科学*, 28, 53–59.]
- Editorial Committee of *Flora Republicae Popularis Sinicae* (1959–2004) *Flora Republicae Popularis Sinicae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国植物志编辑委员会 (1959–2004) *中国植物志*. 科学出版社, 北京.]
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1998) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (1999) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-hot valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 19, 1–14. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 19, 1–14.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Yang YP, Tao GD (1995) The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry-hot valley of Southwest China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 129–143. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 杨永平, 陶国达 (1995) 华西南干热河谷种子植物区系的特征, 性质和起源. *云南植物研究*, 17, 129–143.]
- Li XW, Li J (1992) On the validity of Tanaka Line and its significance viewed from the distribution of eastern Asiatic genera in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 14, 1–12. (in Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1992) 从滇产东亚属的分布论述田中线的真实性和意义. *云南植物研究*, 14, 1–12.]
- Li XW, Li J (1997) The Tanaka-Kaiyong line: an important floristic line for the study of the flora of East Asia. *Annals of the Missouri Botanic Garden*, 84, 888–892.
- Liu LH (1989) Vegetational types of the arid valleys in the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, 7, 175–182. (in Chinese with English abstract) [刘伦辉 (1989) 横断山区干旱河谷植被类型. *山地研究*, 7, 175–182.]
- Liu Y (2015) Plant Diversity and Phytogeography of Arid Valley in Major Rivers of the Southwestern China. PhD dissertation, Peking University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晔 (2015) 中国西南干旱河谷植被与植物多样性空间格局与生物地理机制. 博士学位论文, 北京大学, 北京.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. *生物多样性*, 24, 378–388.]
- Ming QZ (2006) The Landform Development and Environment Effects in the Area of Three Parallel Rivers, Northern Longitudinal Range-gorge Region. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. (in Chinese with English abstract) [明庆忠 (2006) 纵向岭谷北部三江并流区河谷地貌发育及其环境效应研究. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Ou XK, Zhang ZM, Wang CY, Wu YC (2006) Meri Snow Mountain Vegetation Research. Science Press, Beijing. (in Chinese) [欧晓昆, 张志明, 王崇云, 吴玉成 (2006) 梅里雪山植被研究. 科学出版社, 北京.]
- Peng H, Wu ZY (1997) On the floristic relationships and position of seed plants in Mt. Wuliangshan. *Mountain Research*, 15(3), 1–6. (in Chinese with English abstract) [彭华, 吴征镒 (1997) 滇中南无量山种子植物区系联系及其地位. *山地研究*, 15(3), 1–6.]
- Qiu ZQ, Yang YH, Cao XW, Sun PJ, Sun XG (2007) Species diversity and floristic characteristics of woody plants in the dry valley of the Bailong River, China. *Journal of Gansu Agricultural University*, 42(5), 119–125. (in Chinese with English abstract) [邱祖青, 杨永宏, 曹秀文, 孙培坚, 孙学刚 (2007) 白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征. *甘肃农业大学学报*, 42(5), 119–125.]
- Ren ME, Bao HS, Han TC, Wang FY, Huang PH (1959) The landform and river capture in Jinshajiang valley in northwest Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 25, 135–155. (in Chinese with English abstract) [任美镠, 包浩生, 韩同春, 王飞燕, 黄培华 (1959) 云南西北部金沙江河谷地貌与河流袭夺问题. *地理学报*, 25, 135–155.]
- Shen ZH, Liu ZL, Wu J (2004) Altitudinal pattern of flora on the eastern slope of Mt. Gongga. *Biodiversity Science*, 12, 89–98. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 刘增力, 伍杰 (2004) 贡嘎山东坡植物区系的垂直分布格局. *生物多样性*, 12, 89–98.]
- Shen ZH, Zhang XS (2000) A quantitative analysis on the floristic elements of the Chinese subtropical region and their

- spatial patterns. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 38, 366–380. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张新时 (2000) 中国亚热带地区植物区系地理成分及其空间格局的数量分析. *植物分类学报*, 38, 366–380.]
- Song YC (2001) *Vegetation Ecology*. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2001) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Su ZY (1999) Quantification of floristic endemism. *Journal of South China Agricultural University*, 20, 92–96. (in Chinese with English abstract) [苏志尧 (1999) 植物特有现象的量化. *华南农业大学学报*, 20, 92–96.]
- Sun H, Li ZM (2003) Qinghai-Tibet Plateau uplift and its impact on Tethys flora. *Advance in Earth Sciences*, 18, 852–862. (in Chinese with English abstract) [孙航, 李志敏 (2003) 古地中海植物区系在青藏高原隆起后的演变和发展. *地球科学进展*, 18, 852–862.]
- Tanaka T (1954) Species Problem in *Citrus*, pp. 58–69. Japanese Society for the Promotion of Science, Tokyo.
- Vetaas OR, Grytnes JA (2002) Distribution of vascular plant species richness and endemic richness along the Himalayan elevation gradient in Nepal. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 291–301.
- Wang HS (1997) Floristic Geography of North China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王荷生 (1997) 华北植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu J, Yin XM, Liu ZF, Ruan JY (2012) Research on seed plant flora in Gongga Mountain Nature Reserve. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 33, 46–49. (in Chinese with English abstract) [伍杰, 尹学明, 刘兆发, 阮建英 (2012) 贡嘎山自然保护区种子植物区系研究. *四川林业科技*, 33, 46–49.]
- Wu ZY, Chen XQ (2004) *Flora Republicae Popularis Sinicae*, Vol.1. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 陈心启 (2004) 中国植物志第一卷. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Wang HS (1983) *Phytogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011) Floristics of Seed Plants from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德铎, 彭华 (2011) 中国种子植物区系地理. 科学出版社, 北京.]
- Yang DY, Han ZY, Ge ZS, Xu QM, Chen KF, Xu YH, Li LP, Huang D, Lu HY (2008) Geomorphic process of the formation and incision of the section from Shigu to Yibin of the Jinshajiang River. *Quaternary Sciences*, 28, 564–568. (in Chinese with English abstract) [杨达源, 韩志勇, 葛兆帅, 胥勤勉, 陈可峰, 徐永辉, 李郎平, 黄典, 鹿化煜 (2008) 金沙江石鼓–宜宾河段的贯通与深切地貌过程的研究. 第四纪研究, 28, 564–568.]
- Yang QY, Zheng D (1989) An outline of physic-geographic regionalization of the Hengduan mountainous region. *Mountain Research*, 7, 56–64. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度 (1989) 横断山区综合自然区划纲要. *山地研究*, 7, 56–64.]
- Ying JS, Chen ML (2011) *Chinese Plant Geography*. Shanghai Science & Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [应俊生, 陈梦玲 (2011) 中国植物地理. 上海科学技术出版社, 上海.]
- Ying JS, Zhang ZS (1985) Endemism in the flora of China: studies on the endemic genera. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 22, 259–268. (in Chinese with English abstract) [应俊生, 张志松 (1985) 中国植物区系中的特有现象: 特有属研究. *植物分类学报*, 22, 259–268.]
- Zhang RZ (1992) *The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang TC (2010) *Phylogeography and Phylogeny of Terminalia franchetii and Its Correlation with Honghe Diversion Events*. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [张体操 (2010) 滇榄仁谱系地理学, 种系分异及其与红河水系变迁的关系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Zhang TC, Comes HP, Sun H (2011) Chloroplast phylogeography of *Terminalia franchetii* (Combretaceae) from the eastern Sino-Himalayan region and its correlation with historical river capture events. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 60, 1–12.
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County. *Acta Botanica Yunnanica*, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. *云南植物研究*, 12, 301–310.]
- Zhu H, Yan LC (2003) Notes on the realities and significances of the “Tanaka Line” and the “Ecogeographical Diagonal Line” in Yunnan. *Advance in Earth Sciences*, 18, 870–876. (in Chinese with English abstract) [朱华, 阎丽春 (2003) 再论“田中线”和“滇西–滇东南生态地理(生物地理)对角线”的真实性和意义. *地球科学进展*, 18, 870–876.]
- Zhu XX (2014) *The Flora of Seed Plants in Three Rivers Valley of SW China*. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [朱鑫鑫 (2014) 华西南三江河谷种子植物区系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 西南干旱河谷维管束植物科、属区系地理成分

Appendix 1 The floristic elements composition of vascular plant family and genera in dry valleys of Southwest China
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015240-1.pdf>

附录1 西南干旱河谷维管束植物科、属区系地理成分

Appendix 1 The floristic elements composition of vascular plant family and genera in dry valleys of Southwest China

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 爵床科 Acanthaceae | 假杜鹃属 <i>Barleria</i> | 2 | 2 |
| 爵床科 Acanthaceae | 鳢冠花属 <i>Cystacanthus</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 狗肝菜属 <i>Dicliptera</i> | 2 | 2 |
| 爵床科 Acanthaceae | 驳骨草属 <i>Gendarussa</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 山一笼鸡属 <i>Gutzlaffia</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 枪刀药属 <i>Hypoestes</i> | 2 | 4 |
| 爵床科 Acanthaceae | 鳞花草属 <i>Lepidagathis</i> | 2 | 2 |
| 爵床科 Acanthaceae | 地皮消属 <i>Pararuellia</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 肾苞草属 <i>Phaulopsis</i> | 2 | 6 |
| 爵床科 Acanthaceae | 火焰花属 <i>Phlogacanthus</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 马蓝属 <i>Pteracanthus</i> | 2 | 14(SH) |
| 爵床科 Acanthaceae | 爵床属 <i>Rostellularia</i> | 2 | 4 |
| 爵床科 Acanthaceae | 肖笼鸡属 <i>Tarphochlamys</i> | 2 | 7 |
| 爵床科 Acanthaceae | 山牵牛属 <i>Thunbergia</i> | 2 | 4 |
| 槭树科 Aceraceae | 槭属 <i>Acer</i> | 8 | 8 |
| 猕猴桃科 Actinidiaceae | 猕猴桃属 <i>Actinidia</i> | 14 | 14 |
| 猕猴桃科 Actinidiaceae | 水东哥属 <i>Saurauia</i> | 14 | 3 |
| 猕猴桃科 Actinidiaceae | 毒药树属 <i>Sladenia</i> | 14 | 7 |
| 龙舌兰科 Agavaceae | 龙舌兰属 <i>Agave</i> | 3 | 3 |
| 龙舌兰科 Agavaceae | 丝兰属 <i>Yucca</i> | 3 | 9 |
| 八角枫科 Alangiaceae | 八角枫属 <i>Alangium</i> | 4 | 4 |
| 苋科 Amaranthaceae | 牛膝属 <i>Achyranthes</i> | 1 | 4 |
| 苋科 Amaranthaceae | 白花苋属 <i>Aerva</i> | 1 | 4 |
| 苋科 Amaranthaceae | 莲子草属 <i>Alternanthera</i> | 1 | 2 |
| 苋科 Amaranthaceae | 苋属 <i>Amaranthus</i> | 1 | 1 |
| 苋科 Amaranthaceae | 青葙属 <i>Celosia</i> | 1 | 2 |
| 苋科 Amaranthaceae | 浆果苋属 <i>Cladostachys</i> | 1 | 5 |
| 苋科 Amaranthaceae | 杯苋属 <i>Cyathula</i> | 1 | 2 |
| 石蒜科 Amaryllidaceae | 仙茅属 <i>Curculigo</i> | 2 | 2 |
| 石蒜科 Amaryllidaceae | 小金梅草属 <i>Hypoxis</i> | 2 | 2 |
| 石蒜科 Amaryllidaceae | 石蒜属 <i>Lycoris</i> | 2 | 14 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 山楝子属 <i>Buchanania</i> | 2 | 5 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 黄栌属 <i>Cotinus</i> | 2 | 8 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 九子母属 <i>Dobinea</i> | 2 | 14(SH) |
| 漆树科 Anacardiaceae | 厚皮树属 <i>Lannea</i> | 2 | 6 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 杧果属 <i>Mangifera</i> | 2 | 7 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 黄连木属 <i>Pistacia</i> | 2 | 12 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 盐肤木属 <i>Rhus</i> | 2 | 8 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 三叶漆属 <i>Terminthia</i> | 2 | 6 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 漆树科 Anacardiaceae | 漆属 <i>Toxicodendron</i> | 2 | 9 |
| 番荔枝科 Annonaceae | 假鹰爪属 <i>Desmos</i> | 2 | 5 |
| 番荔枝科 Annonaceae | 瓜馥木属 <i>Fissistigma</i> | 2 | 5 |
| 番荔枝科 Annonaceae | 暗罗属 <i>Polyalthia</i> | 2 | 4 |
| 番荔枝科 Annonaceae | 紫玉盘属 <i>Uvaria</i> | 2 | 4 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 假虎刺属 <i>Carissa</i> | 2 | 4 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 夹竹桃属 <i>Nerium</i> | 2 | 10 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 杜仲藤属 <i>Parabarium</i> | 2 | 7 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 帘子藤属 <i>Pottsia</i> | 2 | 7 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 萝芙木属 <i>Rauvolfia</i> | 2 | 2 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 尖子藤属 <i>Rhynchodia</i> | 2 | 7 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 络石属 <i>Trachelospermum</i> | 2 | 9 |
| 夹竹桃科 Apocynaceae | 组子花属 <i>Vallaris</i> | 2 | 7 |
| 冬青科 Aquifoliaceae | 冬青属 <i>Ilex</i> | 3 | 2 |
| 天南星科 Araceae | 菖蒲属 <i>Acorus</i> | 2 | 8 |
| 天南星科 Araceae | 磨芋属 <i>Amorphophallus</i> | 2 | 4 |
| 天南星科 Araceae | 天南星属 <i>Arisaema</i> | 2 | 8 |
| 天南星科 Araceae | 半夏属 <i>Pinellia</i> | 2 | 14(SJ) |
| 天南星科 Araceae | 犁头尖属 <i>Typhonium</i> | 2 | 5 |
| 天南星科 Araceae | 马蹄莲属 <i>Zantedeschia</i> | 2 | 8 |
| 五加科 Araliaceae | 五加属 <i>Acanthopanax</i> | 3 | 14 |
| 五加科 Araliaceae | 楸木属 <i>Aralia</i> | 3 | 9 |
| 五加科 Araliaceae | 罗伞属 <i>Brassaiopsis</i> | 3 | 7 |
| 五加科 Araliaceae | 掌叶树属 <i>Euaraliopsis</i> | 3 | 7 |
| 五加科 Araliaceae | 常春藤属 <i>Hedera</i> | 3 | 12 |
| 五加科 Araliaceae | 大参属 <i>Macropanax</i> | 3 | 7 |
| 五加科 Araliaceae | 梁王茶属 <i>Nothopanax</i> | 3 | 5 |
| 五加科 Araliaceae | 五叶参属 <i>Pentapanax</i> | 3 | 2 |
| 五加科 Araliaceae | 鹅掌柴属 <i>Schefflera</i> | 3 | 2 |
| 马兜铃科 Aristolochiaceae | 马兜铃属 <i>Aristolochia</i> | 2 | 2 |
| 马兜铃科 Aristolochiaceae | 细辛属 <i>Asarum</i> | 2 | 8 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 马利筋属 <i>Asclepias</i> | 2 | 2 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 秦岭藤属 <i>Biondia</i> | 2 | 15 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 牛角瓜属 <i>Calotropis</i> | 2 | 6 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 吊灯花属 <i>Ceropegia</i> | 2 | 4 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 白叶藤属 <i>Cryptolepis</i> | 2 | 4 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 鹅绒藤属 <i>Cynanchum</i> | 2 | 10 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 南山藤属 <i>Dregea</i> | 2 | 6 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 匙羹藤属 <i>Gymnema</i> | 2 | 4 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 牛奶菜属 <i>Marsdenia</i> | 2 | 2 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 萝藦属 <i>Metaplexis</i> | 2 | 14(SJ) |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 翅果藤属 <i>Myriopteron</i> | 2 | 7 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 杠柳属 <i>Periploca</i> | 2 | 6 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 弓果藤属 <i>Toxocarpus</i> | 2 | 4 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 娃儿藤属 <i>Tylophora</i> | 2 | 4 |
| 凤仙花科 Balsaminaceae | 凤仙花属 <i>Impatiens</i> | 2 | 2 |
| 落葵科 Basellaceae | 落葵薯属 <i>Anredera</i> | 2 | 3 |
| 落葵科 Basellaceae | 落葵属 <i>Basella</i> | 2 | 2 |
| 秋海棠科 Begoniaceae | 秋海棠属 <i>Begonia</i> | 2 | 2 |
| 小檗科 Berberidaceae | 小檗属 <i>Berberis</i> | 8 | 8 |
| 小檗科 Berberidaceae | 十大功劳属 <i>Mahonia</i> | 8 | 9 |
| 小檗科 Berberidaceae | 南天竹属 <i>Nandina</i> | 8 | 14(SJ) |
| 桦木科 Betulaceae | 桤木属 <i>Alnus</i> | 8 | 8 |
| 桦木科 Betulaceae | 桦木属 <i>Betula</i> | 8 | 8 |
| 桦木科 Betulaceae | 鹅耳枥属 <i>Carpinus</i> | 8 | 8 |
| 桦木科 Betulaceae | 榛属 <i>Corylus</i> | 8 | 8 |
| 桦木科 Betulaceae | 虎榛子属 <i>Ostryopsis</i> | 8 | 15 |
| 紫葳科 Bignoniaceae | 凌霄属 <i>Campsis</i> | 2 | 9 |
| 紫葳科 Bignoniaceae | 梓属 <i>Catalpa</i> | 2 | 9 |
| 紫葳科 Bignoniaceae | 角蒿属 <i>Incarvillea</i> | 2 | 13 |
| 紫葳科 Bignoniaceae | 老鸦烟筒花属 <i>Millingtonia</i> | 2 | 7 |
| 紫葳科 Bignoniaceae | 菜豆树属 <i>Radermachera</i> | 2 | 7 |
| 木棉科 Bombacaceae | 木棉属 <i>Bombax</i> | 2 | 6 |
| 紫草科 Boraginaceae | 斑种草属 <i>Bothriospermum</i> | 1 | 14 |
| 紫草科 Boraginaceae | 破布木属 <i>Cordia</i> | 1 | 2 |
| 紫草科 Boraginaceae | 琉璃草属 <i>Cynoglossum</i> | 1 | 8 |
| 紫草科 Boraginaceae | 厚壳树属 <i>Ehretia</i> | 1 | 2 |
| 紫草科 Boraginaceae | 紫草属 <i>Lithospermum</i> | 1 | 8 |
| 紫草科 Boraginaceae | 微孔草属 <i>Microula</i> | 1 | 14(SH) |
| 紫草科 Boraginaceae | 滇紫草属 <i>Onosma</i> | 1 | 10 |
| 紫草科 Boraginaceae | 紫筒草属 <i>Stenosolenium</i> | 1 | 11 |
| 紫草科 Boraginaceae | 附地菜属 <i>Trigonotis</i> | 1 | 10 |
| 醉鱼草科 Buddlejaceae | 醉鱼草属 <i>Buddleja</i> | 2 | 2 |
| 橄榄科 Burseraceae | 嘉榄属 <i>Garuga</i> | 2 | 5 |
| 橄榄科 Burseraceae | 马蹄果属 <i>Protium</i> | 2 | 2 |
| 黄杨科 Buxaceae | 板凳果属 <i>Pachysandra</i> | 8 | 9 |
| 黄杨科 Buxaceae | 野扇花属 <i>Sarcococca</i> | 8 | 7 |
| 仙人掌科 Cactaceae | 仙人柱属 <i>Cereus</i> | 3 | 3 |
| 仙人掌科 Cactaceae | 仙人掌属 <i>Opuntia</i> | 3 | 3 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 羊蹄甲属 <i>Bauhinia</i> | 2 | 2 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 云实属 <i>Caesalpinia</i> | 2 | 2 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 决明属 <i>Cassia</i> | 2 | 2 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 云实科 Caesalpiniaceae | 紫荆属 <i>Cercis</i> | 2 | 8 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 凤凰木属 <i>Delonix</i> | 2 | 6 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 皂荚属 <i>Gleditsia</i> | 2 | 9 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 老虎刺属 <i>Pterolobium</i> | 2 | 6 |
| 云实科 Caesalpiniaceae | 酸豆属 <i>Tamarindus</i> | 2 | 6 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 沙参属 <i>Adenophora</i> | 1 | 10 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 牧根草属 <i>Asyneuma</i> | 1 | 10 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 风铃草属 <i>Campanula</i> | 1 | 8 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 金钱豹属 <i>Campanumoea</i> | 1 | 7 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 党参属 <i>Codonopsis</i> | 1 | 14 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 半边莲属 <i>Lobelia</i> | 1 | 2 |
| 桔梗科 Campanulaceae | 桔梗属 <i>Platycodon</i> | 1 | 14(SJ) |
| 桔梗科 Campanulaceae | 蓝花参属 <i>Wahlenbergia</i> | 1 | 2 |
| 大麻科 Cannabaceae | 大麻属 <i>Cannabis</i> | 8 | 11 |
| 美人蕉科 Cannaceae | 美人蕉属 <i>Canna</i> | 2 | 3 |
| 山柑科 Capparaceae | 山柑属 <i>Capparis</i> | 2 | 2 |
| 山柑科 Capparaceae | 白花菜属 <i>Cleome</i> | 2 | 2 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 六道木属 <i>Abelia</i> | 8 | 9 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 双盾木属 <i>Dipelta</i> | 8 | 15 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 鬼吹箫属 <i>Leycesteria</i> | 8 | 14(SH) |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 忍冬属 <i>Lonicera</i> | 8 | 8 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 接骨木属 <i>Sambucus</i> | 8 | 8 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 毛核木属 <i>Symphoricarpos</i> | 8 | 9 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 莛子藎属 <i>Triosteum</i> | 8 | 9 |
| 忍冬科 Caprifoliaceae | 荚蒾属 <i>Viburnum</i> | 8 | 8 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 无心菜属 <i>Arenaria</i> | 1 | 8 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 狗筋蔓属 <i>Cucubalus</i> | 1 | 10 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 石竹属 <i>Dianthus</i> | 1 | 10 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 剪秋罗属 <i>Lychnis</i> | 1 | 8 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 鹅肠菜属 <i>Myosoton</i> | 1 | 10 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 金铁锁属 <i>Psammossilene</i> | 1 | 15 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 蝇子草属 <i>Silene</i> | 1 | 8 |
| 石竹科 Caryophyllaceae | 繁缕属 <i>Stellaria</i> | 1 | 1 |
| 卫矛科 Celastraceae | 南蛇藤属 <i>Celastrus</i> | 2 | 2 |
| 卫矛科 Celastraceae | 卫矛属 <i>Euonymus</i> | 2 | 1 |
| 卫矛科 Celastraceae | 美登木属 <i>Maytenus</i> | 2 | 2 |
| 藜科 Chenopodiaceae | 驼绒藜属 <i>Ceratoides</i> | 1 | 11 |
| 藜科 Chenopodiaceae | 藜属 <i>Chenopodium</i> | 1 | 1 |
| 藜科 Chenopodiaceae | 对节刺属 <i>Horaninowia</i> | 1 | 13 |
| 藜科 Chenopodiaceae | 地肤属 <i>Kochia</i> | 1 | 8 |
| 藜科 Chenopodiaceae | 小蓬属 <i>Nanophyton</i> | 1 | 12 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 藜科 Chenopodiaceae | 猪毛菜属 <i>Salsola</i> | 1 | 1 |
| 金粟兰科 Chloranthaceae | 金粟兰属 <i>Chloranthus</i> | 2 | 7 |
| 金粟兰科 Chloranthaceae | 草珊瑚属 <i>Sarcandra</i> | 2 | 7 |
| 使君子科 Combretaceae | 诃子属 <i>Terminalia</i> | 2 | 2 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 鸭跖草属 <i>Commelina</i> | 2 | 2 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 蓝耳草属 <i>Cyanotis</i> | 2 | 4 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 水竹叶属 <i>Murdannia</i> | 2 | 4 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 杜若属 <i>Polia</i> | 2 | 2 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 竹叶子属 <i>Streptolirion</i> | 2 | 14(SH) |
| 菊科 Compositae | 刺苞果属 <i>Acanthospermum</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 下田菊属 <i>Adenostemma</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 藿香蓟属 <i>Ageratum</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 兔儿风属 <i>Ainsliaea</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 亚菊属 <i>Ajania</i> | 1 | 11 |
| 菊科 Compositae | 香青属 <i>Anaphalis</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 山黄菊属 <i>Anisopappus</i> | 1 | 6 |
| 菊科 Compositae | 牛蒡属 <i>Arctium</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 蒿属 <i>Artemisia</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 紫菀属 <i>Aster</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 紫菀木属 <i>Asterothamnus</i> | 1 | 13 |
| 菊科 Compositae | 鬼针草属 <i>Bidens</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 百能葳属 <i>Blainvillea</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 艾纳香属 <i>Blumea</i> | 1 | 4 |
| 菊科 Compositae | 飞廉属 <i>Carduus</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 天名精属 <i>Carpesium</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 毛鳞菊属 <i>Chaetosiris</i> | 1 | 14(SH) |
| 菊科 Compositae | 茼蒿属 <i>Chrysanthemum</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 蓟属 <i>Cirsium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 藤菊属 <i>Cissampelopsis</i> | 1 | 7 |
| 菊科 Compositae | 白酒草属 <i>Conyza</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 金鸡菊属 <i>Coreopsis</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 秋英属 <i>Cosmos</i> | 1 | 3 |
| 菊科 Compositae | 野茼蒿属 <i>Crassocephalum</i> | 1 | 6 |
| 菊科 Compositae | 还阳参属 <i>Crepis</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 杯菊属 <i>Cyathocline</i> | 1 | 7 |
| 菊科 Compositae | 菊属 <i>Dendranthema</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 鱼眼草属 <i>Dichrocephala</i> | 1 | 4 |
| 菊科 Compositae | 川木香属 <i>Dolomiaea</i> | 1 | 14(SH) |
| 菊科 Compositae | 蓝刺头属 <i>Echinops</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 鳢肠属 <i>Eclipta</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 地胆草属 <i>Elephantopus</i> | 1 | 2 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 菊科 Compositae | 一点红属 <i>Emilia</i> | 1 | 4 |
| 菊科 Compositae | 菊苣属 <i>Erechthites</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 飞蓬属 <i>Erigeron</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 泽兰属 <i>Eupatorium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 牛膝菊属 <i>Galinsoga</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 大丁草属 <i>Gerbera</i> | 1 | 6 |
| 菊科 Compositae | 鼠麴草属 <i>Gnaphalium</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 菊三七属 <i>Gynura</i> | 1 | 4 |
| 菊科 Compositae | 向日葵属 <i>Helianthus</i> | 1 | 9 |
| 菊科 Compositae | 泥胡菜属 <i>Hemistepta</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 狗娃花属 <i>Heteropappus</i> | 1 | 11 |
| 菊科 Compositae | 山柳菊属 <i>Hieracium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 旋覆花属 <i>Inula</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 小苦苣属 <i>Ixeridium</i> | 1 | 7 |
| 菊科 Compositae | 苦苣菜属 <i>Ixeris</i> | 1 | 7 |
| 菊科 Compositae | 马兰属 <i>Kalimeris</i> | 1 | 11 |
| 菊科 Compositae | 莴苣属 <i>Lactuca</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 六棱菊属 <i>Laggera</i> | 1 | 6 |
| 菊科 Compositae | 火絨草属 <i>Leontopodium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 橐吾属 <i>Ligularia</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 小舌菊属 <i>Microglossa</i> | 1 | 6 |
| 菊科 Compositae | 粘冠草属 <i>Myriactis</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 紫菊属 <i>Notoseris</i> | 1 | 15 |
| 菊科 Compositae | 栌菊木属 <i>Nouelia</i> | 1 | 15 |
| 菊科 Compositae | 黄瓜菜属 <i>Paraixeris</i> | 1 | 14(SJ) |
| 菊科 Compositae | 假福王草属 <i>Paraprenanthes</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 蟹甲草属 <i>Parasenecio</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 银胶菊属 <i>Parthenium</i> | 1 | 3 |
| 菊科 Compositae | 葶苈草属 <i>Pentanema</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 帚菊属 <i>Pertya</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 毛连菜属 <i>Picris</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 翅果菊属 <i>Pterocypsela</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 蚤草属 <i>Pulicaria</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 匹菊属 <i>Pyrethrum</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 秋分草属 <i>Rhynchospermum</i> | 1 | 14 |
| 菊科 Compositae | 蛇目菊属 <i>Sanvitalia</i> | 1 | 3 |
| 菊科 Compositae | 凤毛菊属 <i>Saussurea</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 千里光属 <i>Senecio</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 绢蒿属 <i>Seriphidium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 豨薟属 <i>Siegesbeckia</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 蒲儿根属 <i>Sinosenecio</i> | 1 | 14(SJ) |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 菊科 Compositae | 一枝黄花属 <i>Solidago</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 苦苣菜属 <i>Sonchus</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 戴星草属 <i>Sphaeranthus</i> | 1 | 4 |
| 菊科 Compositae | 金纽扣属 <i>Spilanthes</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 万寿菊属 <i>Tagetes</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 蒲公英属 <i>Taraxacum</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 肿柄菊属 <i>Tithonia</i> | 1 | 3 |
| 菊科 Compositae | 婆罗门参属 <i>Tragopogon</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 羽芒菊属 <i>Tridax</i> | 1 | 3 |
| 菊科 Compositae | 碱菀属 <i>Tripolium</i> | 1 | 8 |
| 菊科 Compositae | 款冬属 <i>Tussilago</i> | 1 | 10 |
| 菊科 Compositae | 斑鸠菊属 <i>Vernonia</i> | 1 | 2 |
| 菊科 Compositae | 苍耳属 <i>Xanthium</i> | 1 | 1 |
| 菊科 Compositae | 黄鹌菜属 <i>Youngia</i> | 1 | 11 |
| 菊科 Compositae | 百日菊属 <i>Zinnia</i> | 1 | 3 |
| 牛栓藤科 Connaraceae | 单叶豆属 <i>Ellipanthus</i> | 2 | 6 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 心萼薯属 <i>Aniseia</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 银背藤属 <i>Argyreia</i> | 1 | 5 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 打碗花属 <i>Calystegia</i> | 1 | 8 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 旋花属 <i>Convolvulus</i> | 1 | 1 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 菟丝子属 <i>Cuscuta</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 马蹄金属 <i>Dichondra</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 土丁桂属 <i>Evolvulus</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 番薯属 <i>Ipomoea</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 鱼黄草属 <i>Merremia</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 牵牛属 <i>Pharbitis</i> | 1 | 2 |
| 旋花科 Convolvulaceae | 飞蛾藤属 <i>Porana</i> | 1 | 4 |
| 马桑科 Coriariaceae | 马桑属 <i>Coriaria</i> | 8 | 8 |
| 山茱萸科 Cornaceae | 桃叶珊瑚属 <i>Aucuba</i> | 8 | 14 |
| 山茱萸科 Cornaceae | 四照花属 <i>Dendrobenthamia</i> | 8 | 14 |
| 山茱萸科 Cornaceae | 青荚叶属 <i>Helwingia</i> | 8 | 14 |
| 山茱萸科 Cornaceae | 楝木属 <i>Swida</i> | 8 | 8 |
| 山茱萸科 Cornaceae | 鞘柄木属 <i>Toricellia</i> | 8 | 14(SH) |
| 景天科 Crassulaceae | 落地生根属 <i>Bryophyllum</i> | 1 | 2 |
| 景天科 Crassulaceae | 瓦松属 <i>Orostachys</i> | 1 | 10 |
| 景天科 Crassulaceae | 红景天属 <i>Rhodiola</i> | 1 | 8 |
| 景天科 Crassulaceae | 瓦莲属 <i>Rosularia</i> | 1 | 12 |
| 景天科 Crassulaceae | 景天属 <i>Sedum</i> | 1 | 8 |
| 景天科 Crassulaceae | 石莲属 <i>Sinocrassula</i> | 1 | 14(SH) |
| 十字花科 Cruciferae | 鼠耳芥属 <i>Arabidopsis</i> | 1 | 8 |
| 十字花科 Cruciferae | 南芥属 <i>Arabis</i> | 1 | 8 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 十字花科 Cruciferae | 山芥属 <i>Barbarea</i> | 1 | 8 |
| 十字花科 Cruciferae | 芸薹属 <i>Brassica</i> | 1 | 10 |
| 十字花科 Cruciferae | 芥属 <i>Capsella</i> | 1 | 1 |
| 十字花科 Cruciferae | 碎米荠属 <i>Cardamine</i> | 1 | 1 |
| 十字花科 Cruciferae | 岩芥属 <i>Cochlearia</i> | 1 | 8 |
| 十字花科 Cruciferae | 独行菜属 <i>Lepidium</i> | 1 | 1 |
| 十字花科 Cruciferae | 蔊菜属 <i>Rorippa</i> | 1 | 1 |
| 十字花科 Cruciferae | 蔊蕈属 <i>Thlaspi</i> | 1 | 8 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 南瓜属 <i>Cucurbita</i> | 2 | 3 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 绞股蓝属 <i>Gynostemma</i> | 2 | 7 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 丝瓜属 <i>Luffa</i> | 2 | 2 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 帽儿瓜属 <i>Mukia</i> | 2 | 4 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 茅瓜属 <i>Solena</i> | 2 | 5 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 赤瓟属 <i>Thladiantha</i> | 2 | 7 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 栝楼属 <i>Trichosanthes</i> | 2 | 5 |
| 葫芦科 Cucurbitaceae | 马交儿属 <i>Zehneria</i> | 2 | 4 |
| 莎草科 Cyperaceae | 扁穗草属 <i>Blysmus</i> | 1 | 8 |
| 莎草科 Cyperaceae | 薹草属 <i>Carex</i> | 1 | 1 |
| 莎草科 Cyperaceae | 莎草属 <i>Cyperus</i> | 1 | 1 |
| 莎草科 Cyperaceae | 羊胡子草属 <i>Eriophorum</i> | 1 | 8 |
| 莎草科 Cyperaceae | 飘拂草属 <i>Fimbristylis</i> | 1 | 2 |
| 莎草科 Cyperaceae | 水莎草属 <i>Juncellus</i> | 1 | 1 |
| 莎草科 Cyperaceae | 水蜈蚣属 <i>Kyllinga</i> | 1 | 2 |
| 莎草科 Cyperaceae | 砖子苗属 <i>Mariscus</i> | 1 | 2 |
| 莎草科 Cyperaceae | 扁莎属 <i>Pycnus</i> | 1 | 2 |
| 莎草科 Cyperaceae | 珍珠茅属 <i>Scleria</i> | 1 | 2 |
| 五桠果科 Dilleniaceae | 五桠果属 <i>Dillenia</i> | 2 | 5 |
| 薯蓣科 Dioscoreaceae | 薯蓣属 <i>Dioscorea</i> | 2 | 2 |
| 川续断科 Dipsacaceae | 川续断属 <i>Dipsacus</i> | 10 | 10 |
| 川续断科 Dipsacaceae | 翼首花属 <i>Pterocephalus</i> | 10 | 10 |
| 川续断科 Dipsacaceae | 双参属 <i>Triplostegia</i> | 10 | 14(SH) |
| 茅膏菜科 Droseraceae | 茅膏菜属 <i>Drosera</i> | 8 | 1 |
| 柿科 Ebenaceae | 柿属 <i>Diospyros</i> | 2 | 2 |
| 胡颓子科 Elaeagnaceae | 胡颓子属 <i>Elaeagnus</i> | 8 | 8 |
| 胡颓子科 Elaeagnaceae | 沙棘属 <i>Hippophae</i> | 8 | 10 |
| 杜英科 Elaeocarpaceae | 杜英属 <i>Elaeocarpus</i> | 3 | 5 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 树萝卜属 <i>Agapetes</i> | 6 | 7 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 岩须属 <i>Cassiope</i> | 6 | 8 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 白珠树属 <i>Gaultheria</i> | 6 | 3 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 珍珠花属 <i>Lyonia</i> | 6 | 9 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 马醉木属 <i>Pieris</i> | 6 | 9 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|-------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 杜鹃花科 Ericaceae | 杜鹃属 <i>Rhododendron</i> | 6 | 8 |
| 杜鹃花科 Ericaceae | 越桔属 <i>Vaccinium</i> | 6 | 8 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 铁苋菜属 <i>Acalypha</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 山麻杆属 <i>Alchornea</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 五月茶属 <i>Antidesma</i> | 2 | 4 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 黑面神属 <i>Breynia</i> | 2 | 5 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 土蜜树属 <i>Bridelia</i> | 2 | 6 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 粗毛藤属 <i>Cnesmone</i> | 2 | 7 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 巴豆属 <i>Croton</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 核果木属 <i>Drypetes</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 黄桐属 <i>Endospermum</i> | 2 | 5 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 大戟属 <i>Euphorbia</i> | 2 | 1 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 海漆属 <i>Excoecaria</i> | 2 | 6 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 白饭树属 <i>Flueggea</i> | 2 | 4 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 算盘子属 <i>Glochidion</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 麻疯树属 <i>Jatropha</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 雀舌木属 <i>Leptopus</i> | 2 | 5 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 野桐属 <i>Mallotus</i> | 2 | 4 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 木薯属 <i>Manihot</i> | 2 | 3 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 山嵛属 <i>Mercurialis</i> | 2 | 10 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 叶下珠属 <i>Phyllanthus</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 蓖麻属 <i>Ricinus</i> | 2 | 6 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 乌柏属 <i>Sapium</i> | 2 | 2 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 地构叶属 <i>Speranskia</i> | 2 | 15 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 宿萼木属 <i>Strophoblachia</i> | 2 | 7 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 油桐属 <i>Vernicia</i> | 2 | 14 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 相思子属 <i>Abrus</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 合萌属 <i>Aeschynomene</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 链荚豆属 <i>Alysicarpus</i> | 1 | 4 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 紫穗槐属 <i>Amorpha</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 两型豆属 <i>Amphicarpacea</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 土圞儿属 <i>Apios</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 黄耆属 <i>Astragalus</i> | 1 | 1 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 木豆属 <i>Cajanus</i> | 1 | 6 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 杭子梢属 <i>Campylotropis</i> | 1 | 11 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 锦鸡儿属 <i>Caragana</i> | 1 | 11 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 蝙蝠草属 <i>Christia</i> | 1 | 5 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 香槐属 <i>Cladrastis</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 旋花豆属 <i>Cochlianthus</i> | 1 | 14(SH) |
| 蝶形花科 Fabaceae | 舞草属 <i>Codariocalyx</i> | 1 | 5 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 猪屎豆属 <i>Crotalaria</i> | 1 | 2 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 蝶形花科 Fabaceae | 黄檀属 <i>Dalbergia</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 假木豆属 <i>Dendrolobium</i> | 1 | 5 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 鱼藤属 <i>Derris</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 山蚂蝗属 <i>Desmodium</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 山黑豆属 <i>Dumasia</i> | 1 | 4 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 刺桐属 <i>Erythrina</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 千斤拔属 <i>Flemingia</i> | 1 | 4 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 大豆属 <i>Glycine</i> | 1 | 5 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 岩黄耆属 <i>Hedysarum</i> | 1 | 8 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 木蓝属 <i>Indigofera</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 鸡眼草属 <i>Kummerowia</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 山黧豆属 <i>Lathyrus</i> | 1 | 8 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 胡枝子属 <i>Lespedeza</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 百脉根属 <i>Lotus</i> | 1 | 10 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 马鞍树属 <i>Maackia</i> | 1 | 14(SJ) |
| 蝶形花科 Fabaceae | 大翼豆属 <i>Macropitilium</i> | 1 | 3 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 苜蓿属 <i>Medicago</i> | 1 | 10 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 草木犀属 <i>Melilotus</i> | 1 | 10 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 崖豆藤属 <i>Millettia</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 黧豆属 <i>Mucuna</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 豆薯属 <i>Pachyrhizus</i> | 1 | 3 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 紫雀花属 <i>Parochetus</i> | 1 | 6 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 菜豆属 <i>Phaseolus</i> | 1 | 3 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 排钱树属 <i>Phyllodium</i> | 1 | 5 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 长柄山蚂蝗属 <i>Podocarpium</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 葛属 <i>Pueraria</i> | 1 | 7 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 鹿藿属 <i>Rhynchosia</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 田菁属 <i>Sesbania</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 宿苞豆属 <i>Shuteria</i> | 1 | 7 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 槐属 <i>Sophora</i> | 1 | 1 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 笔花豆属 <i>Stylosanthes</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 灰毛豆属 <i>Tephrosia</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 高山豆属 <i>Tibetia</i> | 1 | 14(SH) |
| 蝶形花科 Fabaceae | 车轴草属 <i>Trifolium</i> | 1 | 8 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 狸尾豆属 <i>Uraria</i> | 1 | 4 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 野豌豆属 <i>Vicia</i> | 1 | 8 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 豇豆属 <i>Vigna</i> | 1 | 2 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 紫藤属 <i>Wisteria</i> | 1 | 9 |
| 蝶形花科 Fabaceae | 丁癸草属 <i>Zornia</i> | 1 | 2 |
| 壳斗科 Fagaceae | 栗属 <i>Castanea</i> | 8 | 8 |
| 壳斗科 Fagaceae | 锥属 <i>Castanopsis</i> | 8 | 9 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 壳斗科 Fagaceae | 青冈属 <i>Cyclobalanopsis</i> | 8 | 7 |
| 壳斗科 Fagaceae | 柯属 <i>Lithocarpus</i> | 8 | 9 |
| 壳斗科 Fagaceae | 栎属 <i>Quercus</i> | 8 | 8 |
| 大风子科 Flacourtiaceae | 梔子皮属 <i>Itoa</i> | 2 | 7 |
| 大风子科 Flacourtiaceae | 柞木属 <i>Xylosma</i> | 2 | 2 |
| 龙胆科 Gentianaceae | 蔓龙胆属 <i>Crawfurdia</i> | 1 | 14(SH) |
| 龙胆科 Gentianaceae | 藻百年属 <i>Exacum</i> | 1 | 4 |
| 龙胆科 Gentianaceae | 龙胆属 <i>Gentiana</i> | 1 | 1 |
| 龙胆科 Gentianaceae | 花锚属 <i>Halenia</i> | 1 | 8 |
| 龙胆科 Gentianaceae | 獐牙菜属 <i>Swertia</i> | 1 | 8 |
| 龙胆科 Gentianaceae | 双蝴蝶属 <i>Tripterospermum</i> | 1 | 14 |
| 牻牛儿苗科 Geraniaceae | 牻牛儿苗属 <i>Erodium</i> | 8 | 12 |
| 牻牛儿苗科 Geraniaceae | 老鹳草属 <i>Geranium</i> | 8 | 1 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 旋蒴苣苔属 <i>Boea</i> | 3 | 5 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 唇柱苣苔属 <i>Chirita</i> | 3 | 7 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 苦苣苔属 <i>Conandron</i> | 3 | 14(SJ) |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 珊瑚苣苔属 <i>Corallodiscus</i> | 3 | 14(SH) |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 金盏苣苔属 <i>Isometrum</i> | 3 | 15 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 吊石苣苔属 <i>Lysionotus</i> | 3 | 14 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 喜鹊苣苔属 <i>Ornithoboea</i> | 3 | 7 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 蛛毛苣苔属 <i>Paraboea</i> | 3 | 7 |
| 苦苣苔科 Gesneriaceae | 石蝴蝶属 <i>Petrocosmea</i> | 3 | 7 |
| 禾本科 Gramineae | 芨芨草属 <i>Achnatherum</i> | 1 | 10 |
| 禾本科 Gramineae | 尖稈草属 <i>Acrachne</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 剪股颖属 <i>Agrostis</i> | 1 | 1 |
| 禾本科 Gramineae | 须芒草属 <i>Andropogon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 水蔗草属 <i>Apluda</i> | 1 | 7 |
| 禾本科 Gramineae | 三芒草属 <i>Aristida</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 荻草属 <i>Arthraxon</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 野古草属 <i>Arundinella</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 芦竹属 <i>Arundo</i> | 1 | 10 |
| 禾本科 Gramineae | 燕麦属 <i>Avena</i> | 1 | 10 |
| 禾本科 Gramineae | 地毯草属 <i>Axonopus</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 筍竹属 <i>Bambusa</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 孔颖草属 <i>Bothriochloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 臂形草属 <i>Brachiaria</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 雀麦属 <i>Bromus</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 拂子茅属 <i>Calamagrostis</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 细柄草属 <i>Capillipedium</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 酸模芒属 <i>Centothea</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 空竹属 <i>Cephalostachyum</i> | 1 | 7 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 禾本科 Gramineae | 虎尾草属 <i>Chloris</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 金须茅属 <i>Chrysopogon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 香茅属 <i>Cymbopogon</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 狗牙根属 <i>Cynodon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 弓果黍属 <i>Cyrtococcum</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 龙爪茅属 <i>Dactyloctenium</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 牡竹属 <i>Dendrocalamus</i> | 1 | 7 |
| 禾本科 Gramineae | 野青茅属 <i>Deyeuxia</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 双药芒属 <i>Diandranthus</i> | 1 | 14(SH) |
| 禾本科 Gramineae | 双花草属 <i>Dichanthium</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 马唐属 <i>Digitaria</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 油芒属 <i>Eccoilopus</i> | 1 | 14 |
| 禾本科 Gramineae | 稗属 <i>Echinochloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 穆属 <i>Eleusine</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 肠须草属 <i>Enteropogon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 画眉草属 <i>Eragrostis</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 蜈蚣草属 <i>Eremochloa</i> | 1 | 5 |
| 禾本科 Gramineae | 旱茅属 <i>Eremopogon</i> | 1 | 12 |
| 禾本科 Gramineae | 蔗茅属 <i>Erianthus</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 野黍属 <i>Eriochloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 黄金茅属 <i>Eulalia</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 拟金茅属 <i>Eulaliopsis</i> | 1 | 7 |
| 禾本科 Gramineae | 箭竹属 <i>Fargesia</i> | 1 | 14(SH) |
| 禾本科 Gramineae | 羊茅属 <i>Festuca</i> | 1 | 1 |
| 禾本科 Gramineae | 球穗草属 <i>Hackelochloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 镰稈草属 <i>Harpachne</i> | 1 | 6 |
| 禾本科 Gramineae | 牛鞭草属 <i>Hemarthria</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 黄茅属 <i>Heteropogon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 大麦属 <i>Hordeum</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 苞茅属 <i>Hyparrhenia</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 白茅属 <i>Imperata</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 柳叶箬属 <i>Isachne</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 鸭嘴草属 <i>Ischaemum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 千金子属 <i>Leptochloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 黑麦草属 <i>Lolium</i> | 1 | 10 |
| 禾本科 Gramineae | 淡竹叶属 <i>Lophatherum</i> | 1 | 5 |
| 禾本科 Gramineae | 小草属 <i>Microchloa</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 莠竹属 <i>Microstegium</i> | 1 | 6 |
| 禾本科 Gramineae | 芒属 <i>Miscanthus</i> | 1 | 6 |
| 禾本科 Gramineae | 慈竹属 <i>Neosinocalamus</i> | 1 | 15 |
| 禾本科 Gramineae | 类芦属 <i>Neyraudia</i> | 1 | 4 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 禾本科 Gramineae | 求米草属 <i>Oplismenus</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 稻属 <i>Oryza</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 黍属 <i>Panicum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 类雀稗属 <i>Paspalidium</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 雀稗属 <i>Paspalum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 狼尾草属 <i>Pennisetum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 茅根属 <i>Perotis</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 显子草属 <i>Phaenosperma</i> | 1 | 14(SJ) |
| 禾本科 Gramineae | 芦苇属 <i>Phragmites</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 刚竹属 <i>Phyllostachys</i> | 1 | 14 |
| 禾本科 Gramineae | 早熟禾属 <i>Poa</i> | 1 | 1 |
| 禾本科 Gramineae | 金发草属 <i>Pogonatherum</i> | 1 | 7 |
| 禾本科 Gramineae | 棒头草属 <i>Polypogon</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 假金发草属 <i>Pseudopogonatherum</i> | 1 | 5 |
| 禾本科 Gramineae | 碱茅属 <i>Puccinellia</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 鹅观草属 <i>Roegneria</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 筒轴茅属 <i>Rottboellia</i> | 1 | 6 |
| 禾本科 Gramineae | 甘蔗属 <i>Saccharum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 囊颖草属 <i>Sacciolepis</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 裂稃草属 <i>Schizachyrium</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 狗尾草属 <i>Setaria</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 高粱属 <i>Sorghum</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 大油芒属 <i>Spodiopogon</i> | 1 | 11 |
| 禾本科 Gramineae | 鼠尾粟属 <i>Sporobolus</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 针茅属 <i>Stipa</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 菅属 <i>Themeda</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 锋芒草属 <i>Tragus</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 草沙蚕属 <i>Tripogon</i> | 1 | 2 |
| 禾本科 Gramineae | 三毛草属 <i>Trisetum</i> | 1 | 8 |
| 禾本科 Gramineae | 小麦属 <i>Triticum</i> | 1 | 12 |
| 禾本科 Gramineae | 尾稃草属 <i>Urochloa</i> | 1 | 4 |
| 禾本科 Gramineae | 玉山竹属 <i>Yushania</i> | 1 | 14(SH) |
| 禾本科 Gramineae | 玉蜀黍属 <i>Zea</i> | 1 | 3 |
| 藤黄科 Guttiferae | 藤黄属 <i>Garcinia</i> | 2 | 6 |
| 藤黄科 Guttiferae | 金丝桃属 <i>Hypericum</i> | 2 | 1 |
| 小二仙草科 Haloragidaceae | 狐尾藻属 <i>Myriophyllum</i> | 1 | 1 |
| 金缕梅科 Hamamelidaceae | 檣木属 <i>Loropetalum</i> | 8 | 14 |
| 莲叶桐科 Hernandiaceae | 青藤属 <i>Illigera</i> | 2 | 6 |
| 水鳖科 Hydrocharitaceae | 水鳖属 <i>Hydrocharis</i> | 1 | 4 |
| 水鳖科 Hydrocharitaceae | 苦草属 <i>Vallisneria</i> | 1 | 2 |
| 茶茱萸科 Icacinaceae | 假海桐属 <i>Pittosporopsis</i> | 2 | 7 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 鸢尾科 Iridaceae | 射干属 <i>Belamcanda</i> | 2 | 14 |
| 鸢尾科 Iridaceae | 唐菖蒲属 <i>Gladiolus</i> | 2 | 12 |
| 鸢尾科 Iridaceae | 鸢尾属 <i>Iris</i> | 2 | 8 |
| 鸢尾科 Iridaceae | 虎皮花属 <i>Tigridia</i> | 2 | 3 |
| 胡桃科 Juglandaceae | 山核桃属 <i>Carya</i> | 8 | 9 |
| 胡桃科 Juglandaceae | 黄杞属 <i>Engelhardtia</i> | 8 | 8 |
| 胡桃科 Juglandaceae | 胡桃属 <i>Juglans</i> | 8 | 8 |
| 胡桃科 Juglandaceae | 化香树属 <i>Platycarya</i> | 8 | 14(SJ) |
| 胡桃科 Juglandaceae | 枫杨属 <i>Pterocarya</i> | 8 | 11 |
| 灯心草科 Juncaceae | 灯心草属 <i>Juncus</i> | 8 | 1 |
| 唇形科 Labiatae | 筋骨草属 <i>Ajuga</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 水棘针属 <i>Amethystea</i> | 1 | 11 |
| 唇形科 Labiatae | 风轮菜属 <i>Clinopodium</i> | 1 | 8 |
| 唇形科 Labiatae | 羽萼木属 <i>Colebrookea</i> | 1 | 7 |
| 唇形科 Labiatae | 火把花属 <i>Colquhounia</i> | 1 | 14(SH) |
| 唇形科 Labiatae | 簇序草属 <i>Craniotome</i> | 1 | 14(SH) |
| 唇形科 Labiatae | 香薷属 <i>Elsholtzia</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 广防风属 <i>Epimeredi</i> | 1 | 5 |
| 唇形科 Labiatae | 网萼木属 <i>Geniosporum</i> | 1 | 6 |
| 唇形科 Labiatae | 锥花属 <i>Gomphostemma</i> | 1 | 7 |
| 唇形科 Labiatae | 夏至草属 <i>Lagopsis</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 益母草属 <i>Leonurus</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 绣球防风属 <i>Leucas</i> | 1 | 4 |
| 唇形科 Labiatae | 米团花属 <i>Leucosceptrum</i> | 1 | 14(SH) |
| 唇形科 Labiatae | 地笋属 <i>Lycopus</i> | 1 | 8 |
| 唇形科 Labiatae | 龙头草属 <i>Meehania</i> | 1 | 9 |
| 唇形科 Labiatae | 蜜蜂花属 <i>Melissa</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 薄荷属 <i>Mentha</i> | 1 | 8 |
| 唇形科 Labiatae | 冠唇花属 <i>Microtoena</i> | 1 | 7 |
| 唇形科 Labiatae | 石芥苎属 <i>Mosla</i> | 1 | 7 |
| 唇形科 Labiatae | 荆芥属 <i>Nepeta</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 钩萼草属 <i>Notochaete</i> | 1 | 14(SH) |
| 唇形科 Labiatae | 罗勒属 <i>Ocimum</i> | 1 | 2 |
| 唇形科 Labiatae | 牛至属 <i>Origanum</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 鸡脚参属 <i>Orthosiphon</i> | 1 | 4 |
| 唇形科 Labiatae | 假糙苏属 <i>Paraphlomis</i> | 1 | 7 |
| 唇形科 Labiatae | 紫苏属 <i>Perilla</i> | 1 | 14 |
| 唇形科 Labiatae | 糙苏属 <i>Phlomis</i> | 1 | 10 |
| 唇形科 Labiatae | 夏枯草属 <i>Prunella</i> | 1 | 8 |
| 唇形科 Labiatae | 香茶菜属 <i>Rabdosia</i> | 1 | 4 |
| 唇形科 Labiatae | 鼠尾草属 <i>Salvia</i> | 1 | 1 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 唇形科 Labiatae | 裂叶荆芥属 <i>Schizonepeta</i> | 1 | 11 |
| 唇形科 Labiatae | 黄芩属 <i>Scutellaria</i> | 1 | 1 |
| 唇形科 Labiatae | 水苏属 <i>Stachys</i> | 1 | 1 |
| 唇形科 Labiatae | 香科科属 <i>Teucrium</i> | 1 | 8 |
| 唇形科 Labiatae | 百里香属 <i>Thymus</i> | 1 | 10 |
| 木通科 Lardizabalaceae | 木通属 <i>Akebia</i> | 3 | 14(SJ) |
| 木通科 Lardizabalaceae | 八月瓜属 <i>Holboellia</i> | 3 | 14(SH) |
| 樟科 Lauraceae | 樟属 <i>Cinnamomum</i> | 2 | 3 |
| 樟科 Lauraceae | 山胡椒属 <i>Lindera</i> | 2 | 9 |
| 樟科 Lauraceae | 木姜子属 <i>Litsea</i> | 2 | 3 |
| 樟科 Lauraceae | 润楠属 <i>Machilus</i> | 2 | 7 |
| 樟科 Lauraceae | 新樟属 <i>Neocinnamomum</i> | 2 | 7 |
| 樟科 Lauraceae | 楠属 <i>Phoebe</i> | 2 | 7 |
| 樟科 Lauraceae | 檫木属 <i>Sassafras</i> | 2 | 9 |
| 浮萍科 Lemnaceae | 浮萍属 <i>Lemna</i> | 1 | 1 |
| 狸藻科 Lentibulariaceae | 狸藻属 <i>Utricularia</i> | 1 | 1 |
| 百合科 Liliaceae | 粉条儿菜属 <i>Alettris</i> | 8 | 9 |
| 百合科 Liliaceae | 葱属 <i>Allium</i> | 8 | 8 |
| 百合科 Liliaceae | 天门冬属 <i>Asparagus</i> | 8 | 4 |
| 百合科 Liliaceae | 万寿竹属 <i>Disporum</i> | 8 | 14 |
| 百合科 Liliaceae | 鹭鸶草属 <i>Diuranthera</i> | 8 | 15 |
| 百合科 Liliaceae | 萱草属 <i>Hemerocallis</i> | 8 | 10 |
| 百合科 Liliaceae | 百合属 <i>Lilium</i> | 8 | 8 |
| 百合科 Liliaceae | 山麦冬属 <i>Liriope</i> | 8 | 14(SJ) |
| 百合科 Liliaceae | 沿阶草属 <i>Ophiopogon</i> | 8 | 14 |
| 百合科 Liliaceae | 重楼属 <i>Paris</i> | 8 | 10 |
| 百合科 Liliaceae | 黄精属 <i>Polygonatum</i> | 8 | 8 |
| 百合科 Liliaceae | 吉祥草属 <i>Reineckia</i> | 8 | 14(SJ) |
| 百合科 Liliaceae | 万年青属 <i>Rohdea</i> | 8 | 14(SJ) |
| 百合科 Liliaceae | 鹿药属 <i>Smilacina</i> | 8 | 9 |
| 百合科 Liliaceae | 藜芦属 <i>Veratrum</i> | 8 | 8 |
| 亚麻科 Linaceae | 亚麻属 <i>Linum</i> | 8 | 8 |
| 亚麻科 Linaceae | 石海椒属 <i>Reinwardtia</i> | 8 | 14(SH) |
| 马钱科 Loganiaceae | 马钱属 <i>Strychnos</i> | 5 | 2 |
| 桑寄生科 Loranthaceae | 桑寄生属 <i>Loranthus</i> | 2 | 10 |
| 桑寄生科 Loranthaceae | 鞘花属 <i>Macrosolen</i> | 2 | 7 |
| 桑寄生科 Loranthaceae | 钝果寄生属 <i>Taxillus</i> | 2 | 7 |
| 千屈菜科 Lythraceae | 紫薇属 <i>Lagerstroemia</i> | 1 | 5 |
| 千屈菜科 Lythraceae | 千屈菜属 <i>Lythrum</i> | 1 | 1 |
| 千屈菜科 Lythraceae | 虾子花属 <i>Woodfordia</i> | 1 | 6 |
| 木兰科 Magnoliaceae | 木兰属 <i>Magnolia</i> | 9 | 9 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 木兰科 Magnoliaceae | 含笑属 <i>Michelia</i> | 9 | 7 |
| 锦葵科 Malvaceae | 秋葵属 <i>Abelmoschus</i> | 2 | 4 |
| 锦葵科 Malvaceae | 苘麻属 <i>Abutilon</i> | 2 | 2 |
| 锦葵科 Malvaceae | 棉属 <i>Gossypium</i> | 2 | 2 |
| 锦葵科 Malvaceae | 木槿属 <i>Hibiscus</i> | 2 | 2 |
| 锦葵科 Malvaceae | 锦葵属 <i>Malva</i> | 2 | 10 |
| 锦葵科 Malvaceae | 赛葵属 <i>Malvastrum</i> | 2 | 3 |
| 锦葵科 Malvaceae | 黄花稔属 <i>Sida</i> | 2 | 2 |
| 锦葵科 Malvaceae | 梵天花属 <i>Urena</i> | 2 | 2 |
| 野牡丹科 Melastomataceae | 野牡丹属 <i>Melastoma</i> | 2 | 5 |
| 野牡丹科 Melastomataceae | 金锦香属 <i>Osbeckia</i> | 2 | 4 |
| 野牡丹科 Melastomataceae | 尖子木属 <i>Oxyspora</i> | 2 | 7 |
| 野牡丹科 Melastomataceae | 锦香草属 <i>Phyllagathis</i> | 2 | 7 |
| 楝科 Meliaceae | 浆果楝属 <i>Cipadessa</i> | 2 | 7 |
| 楝科 Meliaceae | 楝属 <i>Melia</i> | 2 | 4 |
| 楝科 Meliaceae | 地黄连属 <i>Munronia</i> | 2 | 7 |
| 楝科 Meliaceae | 香椿属 <i>Toona</i> | 2 | 5 |
| 防己科 Menispermaceae | 木防己属 <i>Cocculus</i> | 2 | 2 |
| 防己科 Menispermaceae | 轮环藤属 <i>Cyclea</i> | 2 | 7 |
| 防己科 Menispermaceae | 蝙蝠葛属 <i>Menispermum</i> | 2 | 9 |
| 防己科 Menispermaceae | 细圆藤属 <i>Pericampylus</i> | 2 | 7 |
| 防己科 Menispermaceae | 风龙属 <i>Sinomenium</i> | 2 | 14(SJ) |
| 防己科 Menispermaceae | 千金藤属 <i>Stephania</i> | 2 | 4 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 金合欢属 <i>Acacia</i> | 2 | 2 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 合欢属 <i>Albizia</i> | 2 | 2 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 棋子豆属 <i>Cylindrokelupha</i> | 2 | 5 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 银合欢属 <i>Leucaena</i> | 2 | 2 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 含羞草属 <i>Mimosa</i> | 2 | 2 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 假含羞草属 <i>Neptunia</i> | 2 | 2 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 牧豆树属 <i>Prosopis</i> | 2 | 2 |
| 桑科 Moraceae | 构属 <i>Broussonetia</i> | 1 | 7 |
| 桑科 Moraceae | 柘属 <i>Cudrania</i> | 1 | 5 |
| 桑科 Moraceae | 水蛇麻属 <i>Fatoua</i> | 1 | 4 |
| 桑科 Moraceae | 榕属 <i>Ficus</i> | 1 | 2 |
| 桑科 Moraceae | 葎草属 <i>Humulus</i> | 1 | 8 |
| 桑科 Moraceae | 桑属 <i>Morus</i> | 1 | 8 |
| 芭蕉科 Musaceae | 芭蕉属 <i>Musa</i> | 4 | 5 |
| 芭蕉科 Musaceae | 地涌金莲属 <i>Musella</i> | 4 | 15 |
| 杨梅科 Myricaceae | 杨梅属 <i>Myrica</i> | 1 | 8 |
| 紫金牛科 Myrsinaceae | 紫金牛属 <i>Ardisia</i> | 2 | 2 |
| 紫金牛科 Myrsinaceae | 杜茎山属 <i>Maesa</i> | 2 | 4 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 紫金牛科 Myrsinaceae | 铁仔属 <i>Myrsine</i> | 2 | 6 |
| 紫金牛科 Myrsinaceae | 密花树属 <i>Rapanea</i> | 2 | 2 |
| 桃金娘科 Myrtaceae | 桉属 <i>Eucalyptus</i> | 2 | 5 |
| 桃金娘科 Myrtaceae | 番石榴属 <i>Psidium</i> | 2 | 3 |
| 桃金娘科 Myrtaceae | 蒲桃属 <i>Syzygium</i> | 2 | 4 |
| 紫茉莉科 Nyctaginaceae | 黄细心属 <i>Boerhavia</i> | 3 | 2 |
| 紫茉莉科 Nyctaginaceae | 叶子花属 <i>Bougainvillea</i> | 3 | 3 |
| 紫茉莉科 Nyctaginaceae | 粘腺果属 <i>Commicarpus</i> | 3 | 2 |
| 紫茉莉科 Nyctaginaceae | 紫茉莉属 <i>Mirabilis</i> | 3 | 3 |
| 蓝果树科 Nyssaceae | 喜树属 <i>Camptotheca</i> | 9 | 15 |
| 木犀科 Oleaceae | 流苏树属 <i>Chionanthus</i> | 1 | 9 |
| 木犀科 Oleaceae | 栲属 <i>Fraxinus</i> | 1 | 8 |
| 木犀科 Oleaceae | 素馨属 <i>Jasminum</i> | 1 | 2 |
| 木犀科 Oleaceae | 女贞属 <i>Ligustrum</i> | 1 | 10 |
| 木犀科 Oleaceae | 木犀榄属 <i>Olea</i> | 1 | 12 |
| 木犀科 Oleaceae | 木犀属 <i>Osmanthus</i> | 1 | 9 |
| 木犀科 Oleaceae | 丁香属 <i>Syringa</i> | 1 | 10 |
| 柳叶菜科 Onagraceae | 露珠草属 <i>Circaea</i> | 1 | 8 |
| 柳叶菜科 Onagraceae | 柳叶菜属 <i>Epilobium</i> | 1 | 8 |
| 柳叶菜科 Onagraceae | 丁香蓼属 <i>Ludwigia</i> | 1 | 2 |
| 柳叶菜科 Onagraceae | 月见草属 <i>Oenothera</i> | 1 | 3 |
| 兰科 Orchidaceae | 开唇兰属 <i>Anoectochilus</i> | 1 | 5 |
| 兰科 Orchidaceae | 白及属 <i>Bletilla</i> | 1 | 14 |
| 兰科 Orchidaceae | 虾脊兰属 <i>Calanthe</i> | 1 | 2 |
| 兰科 Orchidaceae | 兰属 <i>Cymbidium</i> | 1 | 5 |
| 兰科 Orchidaceae | 蛇舌兰属 <i>Diploprora</i> | 1 | 7 |
| 兰科 Orchidaceae | 火烧兰属 <i>Epipactis</i> | 1 | 8 |
| 兰科 Orchidaceae | 地宝兰属 <i>Geodorum</i> | 1 | 4 |
| 兰科 Orchidaceae | 玉凤花属 <i>Habenaria</i> | 1 | 8 |
| 兰科 Orchidaceae | 芋兰属 <i>Nervilia</i> | 1 | 4 |
| 兰科 Orchidaceae | 红门兰属 <i>Orchis</i> | 1 | 8 |
| 兰科 Orchidaceae | 阔蕊兰属 <i>Peristylus</i> | 1 | 5 |
| 兰科 Orchidaceae | 苞舌兰属 <i>Spathoglottis</i> | 1 | 5 |
| 列当科 Orobanchaceae | 列当属 <i>Orobanche</i> | 8 | 8 |
| 酢浆草科 Oxalidaceae | 感应草属 <i>Biophytum</i> | 1 | 2 |
| 酢浆草科 Oxalidaceae | 酢浆草属 <i>Oxalis</i> | 1 | 1 |
| 芍药科 Paeoniaceae | 芍药属 <i>Paeonia</i> | 8 | 8 |
| 棕榈科 Palmae | 油棕属 <i>Elaeis</i> | 2 | 2 |
| 罂粟科 Papaveraceae | 紫堇属 <i>Corydalis</i> | 8 | 8 |
| 罂粟科 Papaveraceae | 紫金龙属 <i>Dactylicapnos</i> | 8 | 14(SH) |
| 罂粟科 Papaveraceae | 秃疮花属 <i>Dicranostigma</i> | 8 | 14(SH) |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 罂粟科 Papaveraceae | 罂粟属 <i>Papaver</i> | 8 | 8 |
| 西番莲科 Passifloraceae | 西番莲属 <i>Passiflora</i> | 2 | 2 |
| 胡麻科 Pedaliaceae | 胡麻属 <i>Sesamum</i> | 4 | 4 |
| 透骨草科 Phrymaceae | 透骨草属 <i>Phryma</i> | 9 | 9 |
| 商陆科 Phytolaccaceae | 商陆属 <i>Phytolacca</i> | 2 | 2 |
| 胡椒科 Piperaceae | 草胡椒属 <i>Peperomia</i> | 2 | 2 |
| 胡椒科 Piperaceae | 胡椒属 <i>Piper</i> | 2 | 2 |
| 海桐花科 Pittosporaceae | 海桐花属 <i>Pittosporum</i> | 4 | 4 |
| 车前科 Plantaginaceae | 车前属 <i>Plantago</i> | 1 | 1 |
| 白花丹科 Plumbaginaceae | 蓝雪花属 <i>Ceratostigma</i> | 1 | 6 |
| 白花丹科 Plumbaginaceae | 白花丹属 <i>Plumbago</i> | 1 | 2 |
| 远志科 Polygalaceae | 远志属 <i>Polygala</i> | 1 | 1 |
| 蓼科 Polygonaceae | 金线草属 <i>Antenoron</i> | 1 | 9 |
| 蓼科 Polygonaceae | 荞麦属 <i>Fagopyrum</i> | 1 | 10 |
| 蓼科 Polygonaceae | 何首乌属 <i>Fallopia</i> | 1 | 8 |
| 蓼科 Polygonaceae | 山蓼属 <i>Oxyria</i> | 1 | 8 |
| 蓼科 Polygonaceae | 蓼属 <i>Polygonum</i> | 1 | 8 |
| 蓼科 Polygonaceae | 虎杖属 <i>Reynoutria</i> | 1 | 11 |
| 蓼科 Polygonaceae | 酸模属 <i>Rumex</i> | 1 | 1 |
| 马齿苋科 Portulacaceae | 马齿苋属 <i>Portulaca</i> | 1 | 2 |
| 马齿苋科 Portulacaceae | 土人参属 <i>Talinum</i> | 1 | 2 |
| 报春花科 Primulaceae | 点地梅属 <i>Androsace</i> | 1 | 8 |
| 报春花科 Primulaceae | 珍珠菜属 <i>Lysimachia</i> | 1 | 1 |
| 报春花科 Primulaceae | 报春花属 <i>Primula</i> | 1 | 8 |
| 山龙眼科 Proteaceae | 山龙眼属 <i>Helicia</i> | 2 | 5 |
| 鹿蹄草科 Pyrolaceae | 鹿蹄草属 <i>Pyrola</i> | 8 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 乌头属 <i>Aconitum</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 类叶升麻属 <i>Actaea</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 银莲花属 <i>Anemone</i> | 1 | 1 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 耧斗菜属 <i>Aquilegia</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 水毛茛属 <i>Batrachium</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 升麻属 <i>Cimicifuga</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 铁线莲属 <i>Clematis</i> | 1 | 1 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 翠雀属 <i>Delphinium</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 白头翁属 <i>Pulsatilla</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 毛茛属 <i>Ranunculus</i> | 1 | 1 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 唐松草属 <i>Thalictrum</i> | 1 | 8 |
| 毛茛科 Ranunculaceae | 金莲花属 <i>Trollius</i> | 1 | 8 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 勾儿茶属 <i>Berchemia</i> | 1 | 9 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 蛇藤属 <i>Colubrina</i> | 1 | 2 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 马甲子属 <i>Paliurus</i> | 1 | 10 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 鼠李科 Rhamnaceae | 猫乳属 <i>Rhamnella</i> | 1 | 5 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 鼠李属 <i>Rhamnus</i> | 1 | 1 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 雀梅藤属 <i>Sageretia</i> | 1 | 3 |
| 鼠李科 Rhamnaceae | 枣属 <i>Ziziphus</i> | 1 | 2 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 龙芽草属 <i>Agrimonia</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 桃属 <i>Amygdalus</i> | 1 | 10 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 杏属 <i>Armeniaca</i> | 1 | 11 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 樱属 <i>Cerasus</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 木瓜属 <i>Chaenomeles</i> | 1 | 14 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 栒子属 <i>Cotoneaster</i> | 1 | 10 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 山楂属 <i>Crataegus</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 蛇莓属 <i>Duchesnea</i> | 1 | 7 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 枇杷属 <i>Eriobotrya</i> | 1 | 7 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 草莓属 <i>Fragaria</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 路边青属 <i>Geum</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 苹果属 <i>Malus</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 绣线梅属 <i>Neillia</i> | 1 | 14 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 小石积属 <i>Osteomeles</i> | 1 | 14 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 石楠属 <i>Photinia</i> | 1 | 9 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 委陵菜属 <i>Potentilla</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 扁核木属 <i>Prinsepia</i> | 1 | 14(SH) |
| 蔷薇科 Rosaceae | 李属 <i>Prunus</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 火棘属 <i>Pyracantha</i> | 1 | 10 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 梨属 <i>Pyrus</i> | 1 | 10 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 石斑木属 <i>Rhaphiolepis</i> | 1 | 7 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 蔷薇属 <i>Rosa</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 悬钩子属 <i>Rubus</i> | 1 | 1 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 山莓草属 <i>Sibbaldia</i> | 1 | 10 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 花楸属 <i>Sorbus</i> | 1 | 8 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 绣线菊属 <i>Spiraea</i> | 1 | 8 |
| 茜草科 Rubiaceae | 丰花草属 <i>Borreria</i> | 1 | 2 |
| 茜草科 Rubiaceae | 山石榴属 <i>Catunaregam</i> | 1 | 6 |
| 茜草科 Rubiaceae | 拉拉藤属 <i>Galium</i> | 1 | 1 |
| 茜草科 Rubiaceae | 耳草属 <i>Hedyotis</i> | 1 | 2 |
| 茜草科 Rubiaceae | 须弥茜树属 <i>Himalrandia</i> | 1 | 14(SH) |
| 茜草科 Rubiaceae | 土连翘属 <i>Hymenodictyon</i> | 1 | 6 |
| 茜草科 Rubiaceae | 红芽大戟属 <i>Knoxia</i> | 1 | 6 |
| 茜草科 Rubiaceae | 野丁香属 <i>Leptodermis</i> | 1 | 14 |
| 茜草科 Rubiaceae | 滇丁香属 <i>Luculia</i> | 1 | 14(SH) |
| 茜草科 Rubiaceae | 玉叶金花属 <i>Mussaenda</i> | 1 | 6 |
| 茜草科 Rubiaceae | 新耳草属 <i>Neanotis</i> | 1 | 5 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 茜草科 Rubiaceae | 蛇根草属 <i>Ophiorrhiza</i> | 1 | 7 |
| 茜草科 Rubiaceae | 鸡矢藤属 <i>Paederia</i> | 1 | 7 |
| 茜草科 Rubiaceae | 大沙叶属 <i>Pavetta</i> | 1 | 4 |
| 茜草科 Rubiaceae | 茜草属 <i>Rubia</i> | 1 | 8 |
| 茜草科 Rubiaceae | 水锦树属 <i>Wendlandia</i> | 1 | 5 |
| 芸香科 Rutaceae | 酒饼筋属 <i>Atalantia</i> | 2 | 5 |
| 芸香科 Rutaceae | 石椒草属 <i>Boenninghausenia</i> | 2 | 7 |
| 芸香科 Rutaceae | 柑橘属 <i>Citrus</i> | 2 | 7 |
| 芸香科 Rutaceae | 黄皮属 <i>Clausena</i> | 2 | 4 |
| 芸香科 Rutaceae | 九里香属 <i>Murraya</i> | 2 | 7 |
| 芸香科 Rutaceae | 芸香属 <i>Ruta</i> | 2 | 10 |
| 芸香科 Rutaceae | 飞龙掌血属 <i>Toddalia</i> | 2 | 6 |
| 芸香科 Rutaceae | 花椒属 <i>Zanthoxylum</i> | 2 | 2 |
| 清风藤科 Sabiaceae | 泡花树属 <i>Meliosma</i> | 7 | 3 |
| 清风藤科 Sabiaceae | 清风藤属 <i>Sabia</i> | 7 | 7 |
| 杨柳科 Salicaceae | 杨属 <i>Populus</i> | 8 | 8 |
| 杨柳科 Salicaceae | 柳属 <i>Salix</i> | 8 | 8 |
| 檀香科 Santalaceae | 沙针属 <i>Osyris</i> | 2 | 12 |
| 檀香科 Santalaceae | 百蕊草属 <i>Thesium</i> | 2 | 4 |
| 无患子科 Sapindaceae | 倒地铃属 <i>Cardiospermum</i> | 2 | 2 |
| 无患子科 Sapindaceae | 茶条木属 <i>Delavaya</i> | 2 | 7 |
| 无患子科 Sapindaceae | 龙眼属 <i>Dimocarpus</i> | 2 | 5 |
| 无患子科 Sapindaceae | 车桑子属 <i>Dodonaea</i> | 2 | 2 |
| 无患子科 Sapindaceae | 栲树属 <i>Koelreuteria</i> | 2 | 15 |
| 无患子科 Sapindaceae | 荔枝属 <i>Litchi</i> | 2 | 7 |
| 无患子科 Sapindaceae | 无患子属 <i>Sapindus</i> | 2 | 3 |
| 三白草科 Saururaceae | 蕺菜属 <i>Houttuynia</i> | 9 | 14 |
| 三白草科 Saururaceae | 三白草属 <i>Saururus</i> | 9 | 9 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 落新妇属 <i>Astilbe</i> | 1 | 9 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 岩白菜属 <i>Bergenia</i> | 1 | 11 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 赤壁木属 <i>Decumaria</i> | 1 | 9 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 溲疏属 <i>Deutzia</i> | 1 | 9 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 常山属 <i>Dichroa</i> | 1 | 7 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 绣球属 <i>Hydrangea</i> | 1 | 9 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 梅花草属 <i>Parnassia</i> | 1 | 8 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 山梅花属 <i>Philadelphus</i> | 1 | 8 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 茶藨子属 <i>Ribes</i> | 1 | 8 |
| 虎耳草科 Saxifragaceae | 虎耳草属 <i>Saxifraga</i> | 1 | 8 |
| 五味子科 Schisandraceae | 南五味子属 <i>Kadsura</i> | 9 | 7 |
| 五味子科 Schisandraceae | 五味子属 <i>Schisandra</i> | 9 | 9 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 毛麝香属 <i>Adenosma</i> | 1 | 5 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 玄参科 Scrophulariaceae | 来江藤属 <i>Brandisia</i> | 1 | 7 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 鞭打绣球属 <i>Hemiphragma</i> | 1 | 14(SH) |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 钟萼草属 <i>Lindenbergia</i> | 1 | 6 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 母草属 <i>Lindernia</i> | 1 | 2 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 通泉草属 <i>Mazus</i> | 1 | 5 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 山罗花属 <i>Melampyrum</i> | 1 | 8 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 沟酸浆属 <i>Mimulus</i> | 1 | 8 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 马先蒿属 <i>Pedicularis</i> | 1 | 8 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 松蒿属 <i>Phtheirospermum</i> | 1 | 14 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 翅茎草属 <i>Pterygiella</i> | 1 | 15 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 野甘草属 <i>Scoparia</i> | 1 | 3 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 阴行草属 <i>Siphonostegia</i> | 1 | 10 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 独脚金属 <i>Striga</i> | 1 | 4 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 蝴蝶草属 <i>Torenia</i> | 1 | 4 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 毛蕊花属 <i>Verbascum</i> | 1 | 10 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 婆婆纳属 <i>Veronica</i> | 1 | 8 |
| 玄参科 Scrophulariaceae | 腹水草属 <i>Veronicastrum</i> | 1 | 9 |
| 苦木科 Simaroubaceae | 臭椿属 <i>Ailanthus</i> | 2 | 5 |
| 苦木科 Simaroubaceae | 苦树属 <i>Picrasma</i> | 2 | 3 |
| 菝葜科 Smilacaceae | 肖菝葜属 <i>Heterosmilax</i> | 2 | 7 |
| 菝葜科 Smilacaceae | 菝葜属 <i>Smilax</i> | 2 | 2 |
| 茄科 Solanaceae | 山莨菪属 <i>Anisodus</i> | 1 | 14(SH) |
| 茄科 Solanaceae | 地海椒属 <i>Archiphysalis</i> | 1 | 14(SJ) |
| 茄科 Solanaceae | 颠茄属 <i>Atropa</i> | 1 | 12 |
| 茄科 Solanaceae | 曼陀罗属 <i>Datura</i> | 1 | 2 |
| 茄科 Solanaceae | 红丝线属 <i>Lycianthes</i> | 1 | 3 |
| 茄科 Solanaceae | 蕃茄属 <i>Lycopersicon</i> | 1 | 3 |
| 茄科 Solanaceae | 假酸浆属 <i>Nicandra</i> | 1 | 3 |
| 茄科 Solanaceae | 酸浆属 <i>Physalis</i> | 1 | 1 |
| 茄科 Solanaceae | 泡囊草属 <i>Physochlaina</i> | 1 | 11 |
| 茄科 Solanaceae | 茄属 <i>Solanum</i> | 1 | 1 |
| 旌节花科 Stachyuraceae | 旌节花属 <i>Stachyurus</i> | 14 | 14 |
| 省沽油科 Staphyleaceae | 野鸦椿属 <i>Euscaphis</i> | 3 | 14(SJ) |
| 省沽油科 Staphyleaceae | 山香圆属 <i>Turpinia</i> | 3 | 3 |
| 百部科 Stemonaceae | 百部属 <i>Stemona</i> | 5 | 5 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 昂天莲属 <i>Ambroma</i> | 2 | 5 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 刺果藤属 <i>Byttneria</i> | 2 | 2 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 火绳树属 <i>Eriolaena</i> | 2 | 7 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 梧桐属 <i>Firmiana</i> | 2 | 14(SJ) |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 山芝麻属 <i>Helicteres</i> | 2 | 2 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 梅蓝属 <i>Melhania</i> | 2 | 6 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 梧桐科 Sterculiaceae | 马松子属 <i>Melochia</i> | 2 | 2 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 翅子树属 <i>Pterospermum</i> | 2 | 7 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 苹婆属 <i>Sterculia</i> | 2 | 2 |
| 梧桐科 Sterculiaceae | 蛇婆子属 <i>Waltheria</i> | 2 | 2 |
| 安息香科 Styracaceae | 安息香属 <i>Styrax</i> | 3 | 3 |
| 山矾科 Symplocaceae | 山矾属 <i>Symplocos</i> | 2 | 2 |
| 山茶科 Theaceae | 山茶属 <i>Camellia</i> | 2 | 7 |
| 山茶科 Theaceae | 柃木属 <i>Eurya</i> | 2 | 3 |
| 山茶科 Theaceae | 木荷属 <i>Schima</i> | 2 | 7 |
| 瑞香科 Thymelaeaceae | 沉香属 <i>Aquilaria</i> | 1 | 7 |
| 瑞香科 Thymelaeaceae | 瑞香属 <i>Daphne</i> | 1 | 8 |
| 瑞香科 Thymelaeaceae | 狼毒属 <i>Stellera</i> | 1 | 11 |
| 瑞香科 Thymelaeaceae | 茺花属 <i>Wikstroemia</i> | 1 | 5 |
| 椴树科 Tiliaceae | 一担柴属 <i>Colona</i> | 2 | 7 |
| 椴树科 Tiliaceae | 田麻属 <i>Corchoropsis</i> | 2 | 14(SJ) |
| 椴树科 Tiliaceae | 黄麻属 <i>Corchorus</i> | 2 | 2 |
| 椴树科 Tiliaceae | 滇桐属 <i>Craigia</i> | 2 | 7 |
| 椴树科 Tiliaceae | 扁担杆属 <i>Grewia</i> | 2 | 4 |
| 椴树科 Tiliaceae | 刺蒴麻属 <i>Triumfetta</i> | 2 | 2 |
| 榆科 Ulmaceae | 朴属 <i>Celtis</i> | 1 | 2 |
| 榆科 Ulmaceae | 山黄麻属 <i>Trema</i> | 1 | 2 |
| 榆科 Ulmaceae | 榆属 <i>Ulmus</i> | 1 | 8 |
| 榆科 Ulmaceae | 榉属 <i>Zelkova</i> | 1 | 10 |
| 伞形科 Umbelliferae | 当归属 <i>Angelica</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 芹属 <i>Apium</i> | 1 | 1 |
| 伞形科 Umbelliferae | 柴胡属 <i>Bupleurum</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 葛缕子属 <i>Carum</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 积雪草属 <i>Centella</i> | 1 | 1 |
| 伞形科 Umbelliferae | 蛇床属 <i>Cnidium</i> | 1 | 9 |
| 伞形科 Umbelliferae | 芫荽属 <i>Coriandrum</i> | 1 | 12 |
| 伞形科 Umbelliferae | 鸭儿芹属 <i>Cryptotaenia</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 胡萝卜属 <i>Daucus</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 茴香属 <i>Foeniculum</i> | 1 | 12 |
| 伞形科 Umbelliferae | 独活属 <i>Heracleum</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 天胡荽属 <i>Hydrocotyle</i> | 1 | 2 |
| 伞形科 Umbelliferae | 藁本属 <i>Ligusticum</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 水芹属 <i>Oenanthe</i> | 1 | 8 |
| 伞形科 Umbelliferae | 香根芹属 <i>Osmorhiza</i> | 1 | 9 |
| 伞形科 Umbelliferae | 欧芹属 <i>Petroselinum</i> | 1 | 12 |
| 伞形科 Umbelliferae | 前胡属 <i>Peucedanum</i> | 1 | 10 |
| 伞形科 Umbelliferae | 茴芹属 <i>Pimpinella</i> | 1 | 8 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 伞形科 Umbelliferae | 囊瓣芹属 <i>Pternopetalum</i> | 1 | 14 |
| 伞形科 Umbelliferae | 变豆菜属 <i>Sanicula</i> | 1 | 1 |
| 伞形科 Umbelliferae | 防风属 <i>Saposhnikovia</i> | 1 | 11 |
| 伞形科 Umbelliferae | 西风芹属 <i>Seseli</i> | 1 | 10 |
| 伞形科 Umbelliferae | 泽芹属 <i>Sium</i> | 1 | 1 |
| 伞形科 Umbelliferae | 窃衣属 <i>Torilis</i> | 1 | 10 |
| 伞形科 Umbelliferae | 糙果芹属 <i>Trachyspermum</i> | 1 | 6 |
| 荨麻科 Urticaceae | 苎麻属 <i>Boehmeria</i> | 2 | 2 |
| 荨麻科 Urticaceae | 微柱麻属 <i>Chamabainia</i> | 2 | 7 |
| 荨麻科 Urticaceae | 水麻属 <i>Debregeasia</i> | 2 | 6 |
| 荨麻科 Urticaceae | 火麻树属 <i>Dendrocnide</i> | 2 | 5 |
| 荨麻科 Urticaceae | 单蕊麻属 <i>Droguetia</i> | 2 | 6 |
| 荨麻科 Urticaceae | 楼梯草属 <i>Elatostema</i> | 2 | 4 |
| 荨麻科 Urticaceae | 蝎子草属 <i>Girardinia</i> | 2 | 6 |
| 荨麻科 Urticaceae | 糯米团属 <i>Gonostegia</i> | 2 | 5 |
| 荨麻科 Urticaceae | 艾麻属 <i>Laportea</i> | 2 | 2 |
| 荨麻科 Urticaceae | 水丝麻属 <i>Maoutia</i> | 2 | 7 |
| 荨麻科 Urticaceae | 紫麻属 <i>Oreocnide</i> | 2 | 7 |
| 荨麻科 Urticaceae | 冷水花属 <i>Pilea</i> | 2 | 2 |
| 荨麻科 Urticaceae | 雾水葛属 <i>Pouzolzia</i> | 2 | 2 |
| 荨麻科 Urticaceae | 荨麻属 <i>Urtica</i> | 2 | 1 |
| 败酱科 Valerianaceae | 败酱属 <i>Patrinia</i> | 1 | 10 |
| 败酱科 Valerianaceae | 缬草属 <i>Valeriana</i> | 1 | 8 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 紫珠属 <i>Callicarpa</i> | 3 | 2 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 莠属 <i>Caryopteris</i> | 3 | 14 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 大青属 <i>Clerodendrum</i> | 3 | 2 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 假连翘属 <i>Duranta</i> | 3 | 3 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 马缨丹属 <i>Lantana</i> | 3 | 2 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 过江藤属 <i>Phyla</i> | 3 | 3 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 豆腐柴属 <i>Premna</i> | 3 | 4 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 千解草属 <i>Pygmaeopremna</i> | 3 | 5 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 马鞭草属 <i>Verbena</i> | 3 | 2 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 牡荆属 <i>Vitex</i> | 3 | 2 |
| 堇菜科 Violaceae | 堇菜属 <i>Viola</i> | 1 | 1 |
| 槲寄生科 Viscaceae | 槲寄生属 <i>Viscum</i> | 1 | 4 |
| 葡萄科 Vitaceae | 蛇葡萄属 <i>Ampelopsis</i> | 2 | 9 |
| 葡萄科 Vitaceae | 乌菟莓属 <i>Cayratia</i> | 2 | 4 |
| 葡萄科 Vitaceae | 白粉藤属 <i>Cissus</i> | 2 | 2 |
| 葡萄科 Vitaceae | 地锦属 <i>Parthenocissus</i> | 2 | 9 |
| 葡萄科 Vitaceae | 崖爬藤属 <i>Tetrastigma</i> | 2 | 5 |
| 葡萄科 Vitaceae | 葡萄属 <i>Vitis</i> | 2 | 8 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 姜科 Zingiberaceae | 山姜属 <i>Alpinia</i> | 5 | 5 |
| 姜科 Zingiberaceae | 豆蔻属 <i>Amomum</i> | 5 | 5 |
| 姜科 Zingiberaceae | 大苞姜属 <i>Caulokaempferia</i> | 5 | 7 |
| 姜科 Zingiberaceae | 舞花姜属 <i>Globba</i> | 5 | 5 |
| 姜科 Zingiberaceae | 姜花属 <i>Hedychium</i> | 5 | 6 |
| 姜科 Zingiberaceae | 姜属 <i>Zingiber</i> | 5 | 5 |
| 蒺藜科 Zygophyllaceae | 蒺藜属 <i>Tribulus</i> | 2 | 2 |
| 铁线蕨科 Adiantaceae | 铁线蕨属 <i>Adiantum</i> | 1 | 1 |
| 书带蕨科 Antrophyaceae | 书带蕨属 <i>Vittaria</i> | 2 | 2 |
| 叉蕨科 Aspidiaceae | 叉蕨属 <i>Tectaria</i> | 2 | 14(SH) |
| 铁角蕨科 Aspleniaceae | 铁角蕨属 <i>Asplenium</i> | 1 | 1 |
| 铁角蕨科 Aspleniaceae | 水螫蕨属 <i>Sinephropteris</i> | 1 | 14(SH) |
| 蹄盖蕨科 Athyriaceae | 短肠蕨属 <i>Allantodia</i> | 1 | 2 |
| 蹄盖蕨科 Athyriaceae | 蹄盖蕨属 <i>Athyrium</i> | 1 | 1 |
| 蹄盖蕨科 Athyriaceae | 假冷蕨属 <i>Pseudocystopteris</i> | 1 | 11 |
| 乌毛蕨科 Blechnaceae | 狗脊属 <i>Woodwardia</i> | 2 | 1 |
| 杪椌科 Cyatheaceae | 杪椌属 <i>Alsophila</i> | 2 | 2 |
| 骨碎补科 Davalliaceae | 阴石蕨属 <i>Humata</i> | 7 | 4 |
| 姬蕨科 Dennstaedtiaceae | 碗蕨属 <i>Dennstaedtia</i> | 2 | 2 |
| 姬蕨科 Dennstaedtiaceae | 鳞盖蕨属 <i>Microlepidia</i> | 2 | 4 |
| 槲蕨科 Drynariaceae | 槲蕨属 <i>Drynaria</i> | 5 | 5 |
| 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae | 复叶耳蕨属 <i>Arachniodes</i> | 1 | 2 |
| 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae | 贯众属 <i>Cyrtomium</i> | 1 | 6 |
| 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae | 鳞毛蕨属 <i>Dryopteris</i> | 1 | 1 |
| 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae | 耳蕨属 <i>Polystichum</i> | 1 | 1 |
| 木贼科 Equisetaceae | 木贼属 <i>Equisetum</i> | 1 | 1 |
| 里白科 Gleicheniaceae | 芒萁属 <i>Dicranopteris</i> | 2 | 4 |
| 里白科 Gleicheniaceae | 里白属 <i>Hicriopteris</i> | 2 | 2 |
| 裸子蕨科 Hemionitidaceae | 凤丫蕨属 <i>Coniogramme</i> | 2 | 2 |
| 裸子蕨科 Hemionitidaceae | 金毛裸蕨属 <i>Gymnopteris</i> | 2 | 10 |
| 肿足蕨科 Hypodematiaceae | 肿足蕨属 <i>Hypodematium</i> | 6 | 6 |
| 陵齿蕨科 Lindsaeaceae | 陵齿蕨属 <i>Lindsaea</i> | 2 | 2 |
| 陵齿蕨科 Lindsaeaceae | 乌蕨属 <i>Stenoloma</i> | 2 | 2 |
| 海金沙科 Lygodiaceae | 海金沙属 <i>Lygodium</i> | 2 | 2 |
| 苹科 Marsileaceae | 苹属 <i>Marsilea</i> | 1 | 11 |
| 肾蕨科 Nephrolepidaceae | 肾蕨属 <i>Nephrolepis</i> | 2 | 2 |
| 紫萁科 Osmundaceae | 紫萁属 <i>Osmunda</i> | 1 | 8 |
| 瘤足蕨科 Plagiogyriaceae | 瘤足蕨属 <i>Plagiogyria</i> | 3 | 2 |
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 节肢蕨属 <i>Arthromeris</i> | 1 | 14(SH) |
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 瓦韦属 <i>Lepisorus</i> | 1 | 6 |
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 盾蕨属 <i>Neolepisorus</i> | 1 | 6 |

| 科 Family | 属 Genus | 科分布区类型 Family area types | 属分布区类型 Genus area types |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 瘤蕨属 <i>Phymatosorus</i> | 1 | 4 |
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 水龙骨属 <i>Polypodiodes</i> | 1 | 14 |
| 水龙骨科 Polypodiaceae | 石韦属 <i>Pyrrosia</i> | 1 | 1 |
| 凤尾蕨科 Pteridaceae | 凤尾蕨属 <i>Pteris</i> | 2 | 2 |
| 蕨科 Pteridiaceae | 蕨属 <i>Pteridium</i> | 1 | 1 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 粉背蕨属 <i>Aleuritopteris</i> | 1 | 1 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 碎米蕨属 <i>Cheilosoria</i> | 1 | 2 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 薄鳞蕨属 <i>Leptolepidium</i> | 1 | 11 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 金粉蕨属 <i>Onychium</i> | 1 | 2 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 旱蕨属 <i>Pellaea</i> | 1 | 1 |
| 中国蕨科 Sinopteridaceae | 中国蕨属 <i>Sinopteris</i> | 1 | 15 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 钩毛蕨属 <i>Cyclogramma</i> | 1 | 14 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 毛蕨属 <i>Cyclosorus</i> | 1 | 2 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 针毛蕨属 <i>Macrothelypteris</i> | 1 | 5 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 金星蕨属 <i>Parathelypteris</i> | 1 | 2 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 卵果蕨属 <i>Phegopteris</i> | 1 | 8 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 新月蕨属 <i>Pronephrium</i> | 1 | 7 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 假毛蕨属 <i>Pseudocyclosorus</i> | 1 | 2 |
| 金星蕨科 Thelypteridaceae | 溪边蕨属 <i>Stegnogramma</i> | 1 | 2 |
| 柏科 Cupressaceae | 柏木属 <i>Cupressus</i> | 8 | 8 |
| 柏科 Cupressaceae | 侧柏属 <i>Platycladus</i> | 8 | 14(SH) |
| 柏科 Cupressaceae | 圆柏属 <i>Sabina</i> | 8 | 8 |
| 苏铁科 Cycadaceae | 苏铁属 <i>Cycas</i> | 5 | 5 |
| 松科 Pinaceae | 冷杉属 <i>Abies</i> | 8 | 8 |
| 松科 Pinaceae | 雪松属 <i>Cedrus</i> | 8 | 10 |
| 松科 Pinaceae | 油杉属 <i>Keteleeria</i> | 8 | 14(SH) |
| 松科 Pinaceae | 落叶松属 <i>Larix</i> | 8 | 8 |
| 松科 Pinaceae | 云杉属 <i>Picea</i> | 8 | 8 |
| 松科 Pinaceae | 松属 <i>Pinus</i> | 8 | 8 |
| 杉科 Taxodiaceae | 柳杉属 <i>Cryptomeria</i> | 8 | 14(SJ) |
| 杉科 Taxodiaceae | 水松属 <i>Glyptostrobus</i> | 8 | 15 |
| 石杉科 Huperziaceae | 石杉属 <i>Huperzia</i> | 1 | 1 |
| 石松科 Lycopodiaceae | 石松属 <i>Lycopodium</i> | 1 | 1 |
| 卷柏科 Selaginellaceae | 卷柏属 <i>Selaginella</i> | 1 | 1 |

• 研究报告 •

中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析

刘 晔¹ 李 鹏² 许 玥² 石松林³ 应凌霄² 张婉君² 彭培好⁴ 沈泽昊^{2*}¹ (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055)² (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)³ (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)⁴ (成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610058)

摘要: 中国西南干旱河谷植被是我国西南横断山区特有的植被类型, 目前关于西南干旱河谷植被还没有整体性的群落类型划分研究。根据对甘肃、四川、云南三省九条主要河流的干旱河谷段野外调查和文献来源的1,339个植物群落样方数据, 采用自适应仿射传播聚类方法, 对我国西南干旱河谷的植物群落进行数量分类, 并采用典范对应分析方法进行排序分析。结果表明: (1)调查样方的植物群落分为7个植被型(稀树草原、肉质灌丛、常绿阔叶灌丛、暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、落叶阔叶林和暖性针叶林), 24个群系, 31个群丛类型。暖性落叶阔叶灌丛是本植被区的代表性植被类型; 分布最广的群系为鞍叶羊蹄甲灌丛(Form. *Bauhinia brachycarpa*, 样方比例50.9%)、黄茅灌丛(Form. *Heteropogon contortus*, 样方比例11.9%)、孔颖草灌丛(Form. *Bothriochloa pertusa*, 样方比例5.6%)、黄荆灌丛(Form. *Vitex negundo*, 样方比例4.2%)、知风草灌丛(Form. *Eragrostis ferruginea*, 样方比例3.8%)、车桑子灌丛(Form. *Dodonaea viscosa*, 样方比例3.4%)、云南松疏林(Form. *Pinus yunnanensis*, 样方比例3.3%)。(2)冬季低温和降水的季节性是限制干旱河谷植物群落分布的主要气候因子。稀树草原、肉质灌丛是典型的干热河谷植被类型; 暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、常绿阔叶灌丛是干暖河谷植被的优势类型; 暖性针叶林、落叶阔叶林则主要在干温河谷环境占优势。

关键词: 中国西南干旱河谷; 植被分类与排序; 自适应仿射传播聚类; 典范对应分析; 植被分区; 气候响应

Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China

Ye Liu¹, Peng Li², Yue Xu², Songlin Shi³, Lingxiao Ying², Wanjun Zhang², Peihao Peng⁴, Zehao Shen^{2*}¹ School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055² Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871³ State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085⁴ College of Tourism and Urban-rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610058

Abstract: The vegetation in dry valleys of Southwest China is characterized by unique vegetation type. Based on plant community sample data (1,339 plots) collected for 9 valleys in Gansu, Sichuan and Yunnan provinces, we used an adaptive affinity propagation method for quantitative classification, and performed an ordination using canonical correspondence analysis. Results showed that the plant communities can be divided into 7 vegetation types (savanna, succulent thicket, evergreen broadleaved thicket, warm deciduous broadleaved thicket, evergreen sclerophyllous forest, deciduous broadleaved forest, warm needle-leaved forest with 24 formations and 31 associations. The most representative vegetation type was the warm deciduous broadleaved thicket, while the most common formations were Form. *Bauhinia brachycarpa* (50.9%), Form. *Heteropogon contortus* (11.9%), Form. *Bothriochloa pertusa* (5.6%), Form. *Vitex negundo* (4.2%), Form. *Eragrostis ferruginea* (3.8%), Form. *Dodonaea viscosa* (3.4%) and Form. *Pinus yunnanensis* (3.3%). Mean

收稿日期: 2015-09-11; 接受日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

temperature of the coldest month and precipitation seasonality are two dominant climatic factors, which limit the distribution of plant community types in the dry valleys. Savanna and succulent thicket are the dominant vegetation types in typical dry-hot valleys. Dry-warm valley are dominated by warm deciduous broadleaved thicket, evergreen sclerophyllous forest and evergreen broadleaved thicket. Warm needle-leaved forest and deciduous broadleaved forest are more adaptive to lower temperatures.

Key words: dry valleys of Southwest China; vegetation classification and ordination; adaptive-affinity propagation; canonical correspondence analysis; vegetation division; climate response

在中国西南横断山区, 由于大致呈南北走向的平行山岭对来自东南和西南季风的阻隔, 以及地形落差产生的“焚风效应”, 在深陷的江河谷地中广泛形成彼此隔离的局部性半干旱-干旱气候(张荣祖, 1992)。根据热量差异, 分别被定义为干热、干暖和干温河谷气候, 为一类典型的非地带性气候, 其特征是干湿季分明, 雨季多雨高湿, 旱季温暖至炎热而干旱, 气温年较差小(金振洲, 2002; 刘方炎等, 2010)。这类气候下发育的植被类型主要包括耐旱的稀树灌木丛或灌(禾)草丛, 分别被定义为半萨王纳植被(semi-savanna)、河谷型马基植被(Maquis), 被认为是萨王纳植被、马基植被类型的干旱河谷残余(张荣祖, 1992; 金振洲, 2002), 在外貌和区系成分上与印度、非洲的热带稀树草原有许多的联系和亲缘关系(Bourliere, 1983; 金振洲, 2002; 朱华和蔡琳, 2004; 刘晔, 2015)。

自20世纪80年代以来, 中国西南干旱河谷植被研究得到关注。在大量野外研究的基础上, 金振洲和欧晓昆(2000)及金振洲(2002)对滇川境内元江、金沙江、怒江和澜沧江流域的干热河谷与干暖河谷植物区系和植被进行了分类、分布、多样性和成因等方面的总结性研究; 刘方炎和朱华(2005)对元江干热河谷进行了群落学分析; 刘文彬(1994)、关文彬等(2004)、冶民生等(2004)对川西岷江上段干暖河谷植被进行了群落分类、排序和多样性研究; 庄翠珍等(2011)对怒江中游干旱河谷进行了植物群落划分。但迄今, 对于以横断山区为中心的我国亚热带西南地区广泛发育的干旱河谷植被的整体分类研究还属空白。关于中国西南干旱河谷植被的整体属性, 彼此隔离的干旱河谷段分布的植物群落类型及其构成差异, 以及环境条件和地理隔离对植物群落构成和区域分异的影响等, 还缺少整体性的认识。

全球不同的植物生态学流派根据植物在区系、外貌、结构、物种构成等方面的属性, 发展了不同

的植物群落分类方法和技术(Whittaker, 2012)。数量分析方法在群落分类中起着非常重要的作用(terBraak, 1986; Mabry et al, 2000), 是研究植物群落生态关系的重要方法(张金屯, 2004)。比较常用的植物群落数量分类方法包括多种等级聚类法、双向指示种分析TWINSPAN (Roleček et al, 2009)、K-means (DeCáceres & Wiser, 2012)、多元回归树MRT (黄甫昭等, 2014), 并可采用SES、Silhouette指数来评价分类结果。自适应仿射传播聚类(adaptive-affinity propagation, adaptive-AP)是一种新的数量分类方法(Frey & Dueck, 2007), 在生物信息学和天体物理学领域中应用较早, 并已开始引入生态学研究(Cardille & Lambois, 2009; Rueda et al, 2013)。相较于更常用的K-means等聚类算法, 自适应仿射传播聚类将所有数据点都作为潜在的聚类中心, 无需人为指定聚类数目(Frey & Dueck, 2007, 2008)。

西南干旱河谷的植物在独具特色的干旱河谷气候条件(杨勤业和郑度, 1989)和相对封闭的河谷环境下经历了长期的适应和演化过程(吴征镒和王荷生, 1983), 河谷内保存了非常丰富的植物物种, 包括较多的古老孑遗成分(金振洲, 2002; 朱鑫鑫, 2014), 因此对西南干旱河谷生物多样性的保护尤为重要; 而通过群落分类, 可以揭示群落不连续分布的原因, 反映群落与环境的关系, 为人们制定物种多样性保护对策, 可持续管理和利用植物资源提供重要参考(Goodall, 1974; Vetaas & Grytnes, 2002; 张金屯, 2004)。

本文尝试对我国西南干旱河谷植物群落进行整体分析, 依据宋永昌(2001)的植被分类系统, 采用最新数量分类方法对本区植被进行群落分类, 并探讨群落分异的主要环境机制, 以期揭示我国西南亚热带干旱河谷植被的整体分异特征和空间分布规律, 为进一步探讨这类植被与其独特环境的关系

提供基本的认识框架。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

根据大量样地调查和众多文献记载,我国亚热带的干旱河谷大体分布在 22° – 34° N, 96° – 105.5° E 的范围内,涉及怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江以及嘉陵江上游的白龙江诸流域的干流和主要支流的谷底至海拔3,000 m以下的两侧岸坡,随河道走向不规则分布,但往往与季风的盛行风向及地形阻挡程度有关,形成彼此隔离而面积大小不一的片断(金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002),具有独特而类似的气候、地貌和植被组合特征(张荣祖, 1992; 何永彬等, 2000; 包维楷和王春明, 2000; 邱祖青等, 2007; 明庆忠和史正涛, 2007)。

干旱河谷地貌上属于青藏高原东缘的横断山区,这一区域整体地势北高南低、平行岭谷总体上呈南北或西北–东南延伸,岭谷之间海拔落差普遍在2,000–3,000 m之间。

半干旱偏湿的河谷出现在西南纵向岭谷区的南部边缘与东部,半干旱偏干的河谷出现在滇西北与川西南的三江上段。总体上,西南干旱河谷的年降雨量低(500–900 mm),温度高(年均温大于 10°C),蒸发量大(降雨量小于蒸发量),与水平地带及河谷上部各垂直带的气候特征(西南地区中部、南部为湿润气候带的湿润热带、亚热带–常绿阔叶林带,北部为高原气候带的温暖和亚热带半湿润–湿润带)不相协调(张荣祖, 1992),不同河谷的气候差异较大(张荣祖, 1992; 金振洲, 1998, 1999)。

根据中国西南干旱河谷的地理分区,可划分为干热河谷、干暖河谷和干温河谷植被(杨勤业和郑度, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000)。干热河谷植被的优势植被类型为“稀树灌木草丛”,以丛生、狭叶、硬叶、毛叶旱生的禾草草丛为主构成大片草地植被,散生稀疏的乔、灌木,并有少数的肉质多刺灌丛,植物普遍具有扭曲、矮小、革叶、小叶、毛叶、多刺的形态特征(金振洲和欧晓昆, 2000)。干暖河谷植被多为小叶、硬叶、多刺、疏生、矮生的灌丛,常呈半荒漠状外貌,有散生的耐旱乔木和硬叶栎类灌丛分布(金振洲和欧晓昆, 2000)。干温河谷的主要植被类型为干旱小叶灌丛,以成丛散生的灌木为主,

少数伴生有禾本科草本植物。多数为亚热带成分,同时掺杂较多的高山温带(喜马拉雅)成分(张荣祖, 1992)。

1.2 样方数据

本文的样方数据包括野外调查和文献来源两部分,总计包含322个样点,1,339个面积 100 m^2 的自然植被群落样方(图1)。

野外调查数据为本课题组调查采集,于2009年7月至2013年8月,在分布于云南、四川、甘肃境内干旱河谷的9个主要流域(包括怒江、澜沧江、元江、南盘江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江、白龙江流域)进行野外样方调查,共设置调查样点270个, $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的自然植被样方725个。清查样方中全部乔木、灌木、草本植物种类,测量每株乔木的胸径,计数并目测每种灌木、草本植物的多度、盖度,用GPS记录样点的经度、纬度和海拔。

文献数据主要根据《元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被》(金振洲和欧晓昆, 2000)一书中,在1995–1998年间对分布于云南、四川境内的金沙江、元江、怒江及澜沧江流域干热河谷、干暖河谷植被的野外调查,包括52个样点,614个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的自然植被样方数据。记录取样地点的位置和海拔,以及样地中全部乔木、灌木、草本植物的多优度。

将野外调查数据和文献数据汇总,参照Flora of China (Flora of China Editorial Committee, 2013)统一拉丁名。

1.3 数据处理

1.3.1 重要值

考虑到干旱河谷包含9个流域,干热、干暖、干温3种气候类型,各样点间既有环境差异,又有空间隔离,不同样点的群落物种组成随空间、环境距离的增加而变化(Condit et al, 2002; Soininen et al, 2007; Morlon et al, 2011),因此本文仅考虑某一物种在其所在样方中的相对重要性,对经典重要值计算公式(Curtis & McIntosh, 1951)做了调整,即不计算某一物种在全部样方中出现的频率,仅统计某一物种在样方中的多度和优势度(盖度),建立重要值(importance value)的样方–物种数据矩阵。计算公式如下:

乔木重要值(%) = (相对多度 + 相对优势度) / 2

灌木和草本重要值(%) = (相对多度 + 相对盖度) / 2

其中,物种*i*的相对多度 = (物种*i*的个体数/样方中

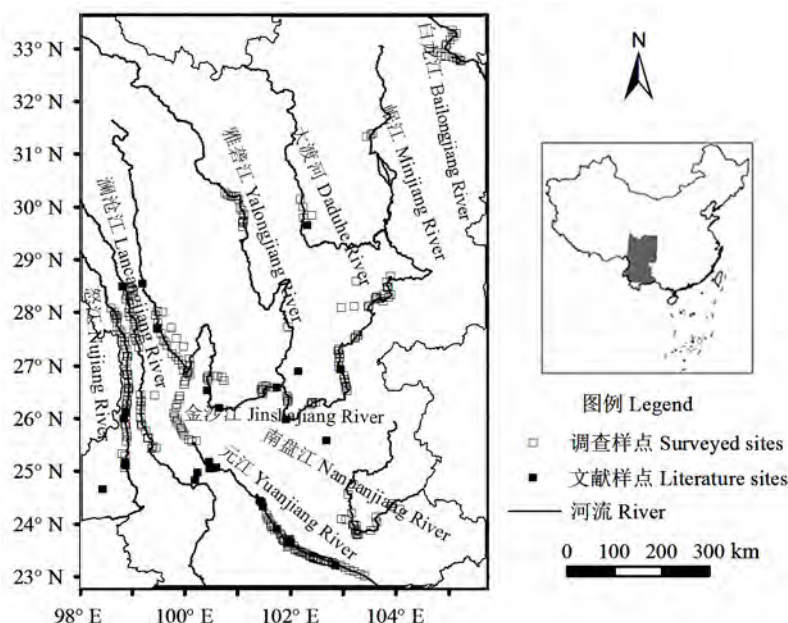


图1 中国西南干旱河谷的研究区域及样点分布(中国全图审图号GS(2008)1157号)

Fig. 1 Study area and distribution of sampling sites in dry valleys of Southwest China

全部物种的个体数) $\times 100\%$, 物种*i*的相对盖度 = (物种*i*的盖度/样方中全部物种的盖度) $\times 100\%$, 物种*i*的相对优势度 = (物种*i*的胸高断面积和/样方中全部物种的胸高断面积和) $\times 100\%$ (张金屯, 2004)。

1.3.2 气候数据

采用1 km分辨率的WorldClim的全球气候数据集的月均气温和降水数据(Hijmans et al, 2009), 以及中国国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)提供的分布于研究区域内206个气象台站54年(1960.10–2014.2)的观测数据, 结合100 m分辨率的数字高程模型(SRTM, <http://datamirror.csdb.cn/>)进行海拔校正和插值, 生成各个调查样点的多年平均气候数据(刘晔, 2015)。

(1)月降水数据。首先利用台站观测平均值减去相同地理位置的WorldClim栅格数据值, 然后用残差进行Kriging插值生成残差值的空间格局数据, 再叠加在WorldClim数据上得到修正后的栅格值。

(2)月均温数据。采取同样方法得到台站数据与WorldClim数据的残差值, 结合WorldClim数据1 km像元的平均海拔与气象台站记录的海拔之间的高程差, 并结合 $0.55^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 的平均气温垂直递减率, 采用co-kriging插值方法得到月均温的空间修正数据, 并叠加在WorldClim的月均温栅格数据上。

利用校正后的气候数据, 提取各样点相应经纬度坐标上的气温、降水数据, 参考已有研究植物多样性和气候关系的结果(方精云等, 2002; Hawkins et al, 2003), 从能量和水分2个方面计算相关的气候指标。能量指标包括: 年均温(mean annual temperature, MAT); 最冷月均温(mean temperature of the coldest month, MTCM), 采用1月的均温值; 气温季节性(temperature seasonality, TSN), 年内各月均温值的标准差。水分指标: 年降水量(mean annual precipitation, MAP), 年内各月降水量之和; 干燥指数(aridity index, *k*), 由日均温 10°C 以上时期的温度与降水量计算得到, 即: $k = 0.16 \times (\text{全年} \geq 10^\circ\text{C} \text{的积温} / \text{全年} \geq 10^\circ\text{C} \text{的降水量})$ (中国科学院自然区划工作委员会, 1959); 降水季节性(precipitation seasonality, PSN), 年内各月平均降水量的变异系数(coefficient of variation)。

1.4 群落数量分类与排序

1.4.1 基于群落内部差异的群落数量分类

自适应仿射传播聚类(adaptive-AP)的计算原理和过程如下: (1)建立数据对象*n*间的相似度 $n \times n$ 的相似度矩阵*S*, 依据矩阵*S*对角线上的第*k*个数据对象的数值*s*(*k*, *k*)的大小, 即参考度*p*(preference), 作为评判第*k*个数据是否可以成为聚类中心的依据

(Frey & Dueck, 2007)。(2)计算每一次迭代过程的吸引度(R)和归属度(A), 根据 $R(k, k) + A(k, k)$ 值是否大于0来判断是否为聚类中心; $R(i, k)$ 表示*i*点到聚类中心*k*点的相似度, 反映*k*点是否适合作为*i*点的聚类中心; $A(i, k)$ 表示从聚类中心*k*点到*i*点的相似度, 反映*i*点是否选择*k*点作为其聚类中心; $R(i, k)$ 越大, *k*点作为聚类中心的可能性越大, $A(i, k)$ 越大, *i*点属于*k*点这一组聚类的可能性也越大(Frey & Dueck, 2007)。(3)通过扫描偏向参数空间, 搜索聚类数目空间, 寻找最优的聚类结果(自适应扫描); 通过降低参考度*p*以减少迭代中的震荡(自适应逃离), 并调整*lam*(阻尼系数)来降低震荡(自适应阻尼), 以控制迭代次数(王开军等, 2007)。

依据adaptive-AP的聚类结果, 将1,339个自然植被样方划分为不同的植物群丛, 用指示值(indicator value)分析计算每个群落类型里的指示种(Dufrene & Legendre, 1997), 计算公式为:

$$Indval_{i,j} = (N_{individuals_{i,j}} / N_{individuals_i}) \times (N_{sites_{i,j}} / N_{sites_j}) \quad (1)$$

其中, $Indval_{i,j}$ 表示物种*i*在类群*j*内的指示值, $N_{individuals_{i,j}}$ 是指物种*i*在类群*j*内每个样方中的平均个体数, $N_{individuals_i}$ 是物种*i*在各类群内每个样方中的平均个体数之和, $N_{sites_{i,j}}$ 表示物种*i*在类群*j*内出现的样方数, N_{sites_j} 是*j*类群所包含的总样方数。

选择重要值最高的物种作为群丛优势种, 指示值最高的两个物种为指示种。采用优势种为主, 指示种为辅, 即“指示种 + 指示种 - 优势种”的方法进行群丛的分类和命名; 以优势种原则划分群系和命名; 植被型依据外貌生态原则, 并参照中国植被分类系统(宋永昌, 2001)划分和命名; 植被型亚纲、植被型纲依据中国植被分类系统划分并命名(宋永昌, 2001)。

采用植被型-群系-群丛的分类等级, 其分类结果的编号规则如下: I、II、III、.....为植被型纲; I-I、II-1、III-1、.....为植被型亚纲; 一、二、三、.....为植被型; 1、2、3、.....为群系; 1-1、2-1、3-1、.....为群丛。

1.4.2 群落排序

本研究依据群落数量分类结果, 采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)排序方法(张金屯, 2004), 用气候因子与排序轴夹角的余弦值表示各气候因子与排序轴的相关性, 用决定系

数(squared correlation coefficient, r^2)来表征各气候因子对群落物种分布的影响, 运用置换检验(permutation test), 置换次数999次, 检验各气候因子的显著性, 从能量和水分两方面选择显著影响群落物种分布的主要气候因子, 比较各植被类型之间在环境上的区别和联系。

Adaptive-AP采用matlab 10.0编程(王开军等, 2007), 指示值的计算采用R语言的labdsv程序包(Roberts, 2006), CCA排序分析采用R语言的vegan包(Oksanen et al, 2007)。

2 结果

2.1 植物群落分类

采用adaptive-AP聚类加指示种的方法, 将1,339个自然植被样方划分为3个植被型纲, 5个植被型亚纲, 7个植被型, 24个群系, 31个群丛(表1)。植被型及群系在中国西南干旱河谷的空间分布见图2。

本区植被以暖性落叶阔叶灌丛为最主要的植被型(样方比例60.8%)。鞍叶羊蹄甲灌丛(Form. *Bauhinia brachycarpa*, 样方比例50.9%)、黄茅灌丛(Form. *Heteropogon contortus*, 样方比例11.9%)、孔颖草灌丛(Form. *Bothriochloa pertusa*, 样方比例5.6%)、黄荆灌丛(Form. *Vitex negundo*, 样方比例4.2%)、知风草灌丛(Form. *Eragrostis ferruginea*, 样方比例3.8%)、车桑子灌丛(Form. *Dodonaea viscosa*, 样方比例3.4%)和云南松疏林(Form. *Pinus yunnanensis*, 样方比例3.3%)等是本区分布最广的植物群系(图2, 附录1)。不同植物群系的物种组成差别较大, 物种密度也有较大的差异(附录1)。

2.2 植物群落排序

依据植被型分类结果进行CCA排序, 分析环境梯度上植被类型的变化(图3)。以6个气候因子为环境变量的CCA分析表明, 第一轴主要受以最冷月均温为主的能量影响, 其中MTCM、MAT、MAP、PSN与第一轴正相关, TSN、*k*与第一轴负相关, 相关性由大到小依次为MTCM ($R = 0.99$)、MAT ($R = 0.96$)、*k* ($R = -0.94$)、TSN ($R = -0.83$)、MAP ($R = 0.80$)、PSN ($R = 0.78$); 第二轴主要受以降水季节性为主的水分影响, 除MAP与第二轴正相关外, 其余5个气候因子均与第二轴负相关, 相关性由大到小依次为PSN ($R = -0.63$)、MAP ($R = 0.60$)、TSN ($R = -0.55$)、*k* ($R = -0.34$)、MAT ($R = -0.28$)、MTCM

表1 中国西南干旱河谷植被分类表

Table 1 The classification system of plant communities in dry valleys of Southwest China

| 植被型纲 Vegetation type class | 植被型亚纲 Vegetation type subclass | 植被型 Vegetation type | 群系 Formation | 群丛 Association |
|----------------------------------|--|--|--|--|
| I 草本植被 Herbaceous | I-1 旱生草本植被 Xeropoium | 一 稀树草原 Savanna | 1 从毛羊胡子草灌草丛 Form. <i>Eriophorum comosum</i> 2 短梗苞茅灌草丛 Form. <i>Hyparrhenia diplandra</i> 3 黄茅灌草丛 Form. <i>Heteropogon contortus</i> 4 孔颖草灌草丛 Form. <i>Bothriochloa pertusa</i> 5 木棉灌草丛 Form. <i>Bombax ceiba</i> 6 牛角瓜灌草丛 Form. <i>Calotropis gigantea</i> 7 双花草灌草丛 Form. <i>Dichanthium annulatum</i> 8 芸香草灌草丛 Form. <i>Cymbopogon distans</i> 9 知风草灌草丛 Form. <i>Eragrostis ferruginea</i> | 1-1 叶下珠+牛角瓜-从毛羊胡子草群丛 Ass. <i>Phyllanthus urinaria</i> + <i>Calotropis gigantea</i> - <i>Eriophorum comosum</i> 2-1 黄花菜+矛叶荩草-短梗苞茅群丛 Ass. <i>Hemerocallis citrina</i> + <i>Arthraxon lanceolatus</i> - <i>Hyparrhenia diplandra</i> 3-1 密花树+清香木-戟叶酸模群丛 Ass. <i>Myrsine seguinii</i> + <i>Pistacia weinmanniifolia</i> - <i>Rumex hastatus</i> 3-2 胡枝子+狭叶海漆-类芦群丛 Ass. <i>Lespedeza bicolor</i> + <i>Excoecaria acerifolia</i> var. <i>cuspidata</i> - <i>Neyraudia reynaudiana</i> 3-3 洋紫荆+枣-黄茅群丛 Ass. <i>Bauhinia variegata</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> - <i>Heteropogon contortus</i> 3-4 芸香草+竹叶草-黄茅群丛 Ass. <i>Cymbopogon distans</i> + <i>Oplismenus compositus</i> var. <i>compositus</i> - <i>Heteropogon contortus</i> 4-1 土沉香+檀子栎-孔颖草群丛 Ass. <i>Aquilaria sinensis</i> + <i>Quercus baronii</i> - <i>Bothriochloa pertusa</i> 4-2 猪毛菜+戟叶酸模-孔颖草群丛 Ass. <i>Salsola collina</i> + <i>Rumex hastatus</i> - <i>Bothriochloa pertusa</i> 5-1 芦苇-木棉群丛 Ass. <i>Phragmites australis</i> - <i>Bombax ceiba</i> 6-1 九叶木蓝+孔颖草-牛角瓜群丛 Ass. <i>Indigofera linnaei</i> + <i>Bothriochloa pertusa</i> - <i>Calotropis gigantea</i> 7-1 牡蒿+龙珠果-双花草群丛 Ass. <i>Artemisia japonica</i> + <i>Passiflora foetida</i> - <i>Dichanthium annulatum</i> 8-1 地果+长节耳草-芸香草群丛 Ass. <i>Ficus tikoua</i> + <i>Hedyotis uncinella</i> - <i>Cymbopogon distans</i> |
| II 灌丛 Scrub | II-1 刺灌丛及肉质灌丛 Thorn thicket and succulent thicket | 二 肉质灌丛 Succulent thicket | 10 仙人掌灌丛 Form. <i>Opuntia dillenii</i> 11 霸王鞭灌丛 Form. <i>Euphorbia royleana</i> | 10-1 黑麦草+白饭树-仙人掌群丛 Ass. <i>Lolium perenne</i> + <i>Flueggea virosa</i> - <i>Opuntia dillenii</i> 11-1 孔颖草+白饭树-霸王鞭群丛 Ass. <i>Bothriochloa pertusa</i> + <i>Flueggea virosa</i> - <i>Euphorbia royleana</i> |
| | II-2 阔叶灌丛 Broadleaved thicket | 三 常绿阔叶灌丛 Evergreen broadleaved thicket | 12 清香木灌丛 Form. <i>Pistacia weinmanniifolia</i> 13 车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i> | 12-1 细花梗杭子梢+云南山蚂蝗-黄茅+虾子花+清香木群丛 Ass. <i>Campylotropis capillipes</i> + <i>Desmodium yunnanense</i> - <i>Heteropogon contortus</i> + <i>Woodfordia fruticosa</i> + <i>Pistacia weinmanniifolia</i> 13-1 木香花+光叶巴豆-黄茅+车桑子群丛 Ass. <i>Rosa banksiae</i> + <i>Croton laevigatus</i> - <i>Heteropogon contortus</i> + <i>Dodonaea viscosa</i> |
| | | 四 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved thicket | 14 光叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema cannabina</i> 15 狭叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema angustifolia</i> 16 鞍叶羊蹄甲灌丛 Form. <i>Bauhinia brachycarpa</i> 17 华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i> | 14-1 细柄野芥+黄花稔-光叶山黄麻群丛 Ass. <i>Fagopyrum gracilipes</i> + <i>Sida acuta</i> - <i>Trema cannabina</i> 15-1 羽芒菊+狭叶山黄麻-狭叶山黄麻群丛 Ass. <i>Tridax procumbens</i> + <i>Trema angustifolia</i> - <i>Trema angustifolia</i> 16-1 小叶荩草+北艾-鞍叶羊蹄甲群丛 Ass. <i>Arthraxon lancifolius</i> + <i>Artemisia vulgaris</i> - <i>Bauhinia brachycarpa</i> 17-1 香茶菜+裸叶粉背蕨-华西小石积群丛 Ass. <i>Isodon amethystoides</i> + <i>Aleuritopteris duclouxii</i> - <i>Osteomeles schwerinae</i> |

表1 (续) Table 1 (continued)

| 植被型纲 Vegetation type class | 植被型亚纲 Vegetation type subclass | 植被型 Vegetation type | 群系 Formation | 群丛 Association |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|
| II 灌丛 Scrub | II-2 阔叶灌丛 Broadleaved thicket | 四 暖性落叶 阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved thicket | 18 余甘子灌丛 Form. <i>Phyllanthus emblica</i> | 18-1 垫状卷柏+翻白草-余甘子群丛 Ass. <i>Selaginella pulvinata</i> + <i>Potentilla discolor</i> - <i>Phyllanthus emblica</i> |
| | | | 19 云南山蚂蝗灌丛 Form. <i>Desmodium yunnanense</i> | 19-1 扭鞘香茅+类芦-云南山蚂蝗群丛 Ass. <i>Cymbopogon tortilis</i> + <i>Neyraudia reynaudiana</i> - <i>Desmodium yunnanense</i> |
| | | | 20 黄荆灌丛 Form. <i>Vitex negundo</i> | 20-1 碱菟+川甘亚菊-黄荆群丛 Ass. <i>Tripolium pannonicum</i> + <i>Ajania potaninii</i> - <i>Vitex negundo</i> |
| | | | 21 细叶黄皮灌丛 Form. <i>Clausena anisum-olens</i> | 21-1 细叶黄皮群丛 Ass. <i>Clausena anisum-olens</i> |
| | | | 22 铁橡栎林 Form. <i>Quercus cocciferoides</i> | 22-1 香附子+短柄扁担杆-铁橡栎群丛 Ass. <i>Cyperus rotundus</i> + <i>Grewia brachypoda</i> - <i>Quercus cocciferoides</i> |
| III 森林 Forest | III-1 阔叶林 Broadleaved forest | 五 常绿硬 叶林 Evergreen sclerophyllous forest | 23 乌柏林 Form. <i>Triadica sebifera</i> | 23-1 乌柏+藿香蓟-乌柏群丛 Ass. <i>Triadica sebifera</i> + <i>Ageratum conyzoides</i> - <i>Triadica sebifera</i> |
| | | | | 23-2 有芒鸭嘴草+乌柏-乌柏群丛 Ass. <i>Ischaemum aristatum</i> var. <i>aristatum</i> + <i>Triadica sebifera</i> - <i>Triadica sebifera</i> |
| | | | | 24-1 马缨丹+刺叶栎-云南松群丛 Ass. <i>Lantana camara</i> + <i>Quercus spinosa</i> - <i>Pinus yunnanensis</i> |
| | III-2 针叶林 Coniferous forest | 七 暖性针 叶林 Warm needle- leaved forest | 24 云南松疏林 Form. <i>Pinus yunnanensis</i> | 24-2 栓皮栎+南烛-云南松群丛 Ass. <i>Quercus variabilis</i> + <i>Vaccinium bracteatum</i> - <i>Pinus yunnanensis</i> |
| | | | | 24-3 云南松+普通针毛蕨-云南松群丛 Ass. <i>Pinus yunnanensis</i> + <i>Macrothelypteris torresiana</i> - <i>Pinus yunnanensis</i> |

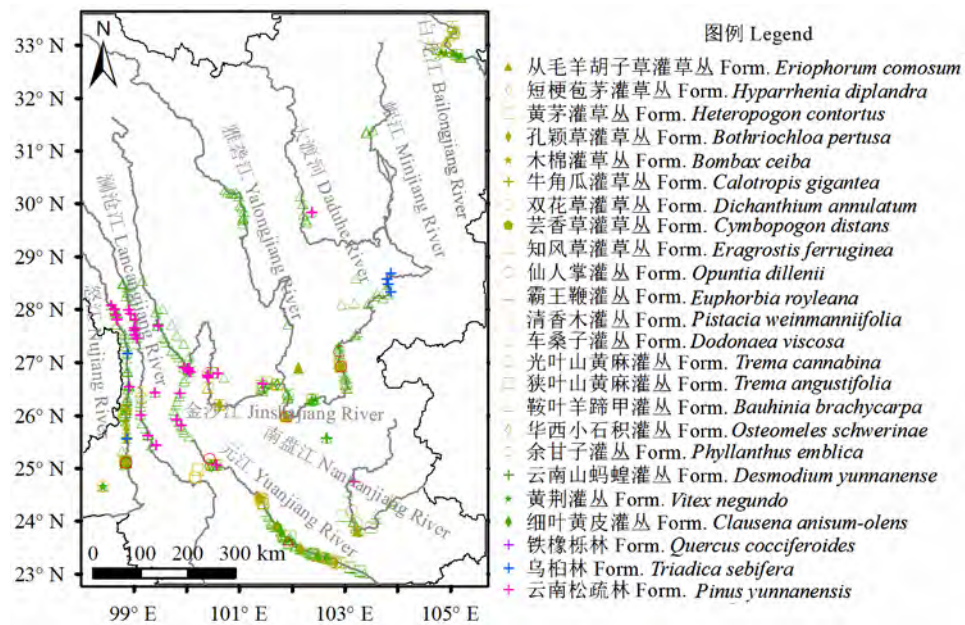


图2 中国西南干旱河谷的植被群系空间分布。不同颜色代表不同植被型。

Fig. 2 Spatial distribution of various vegetation formations in dry valleys of Southwest China. Different colors represent different vegetation types.

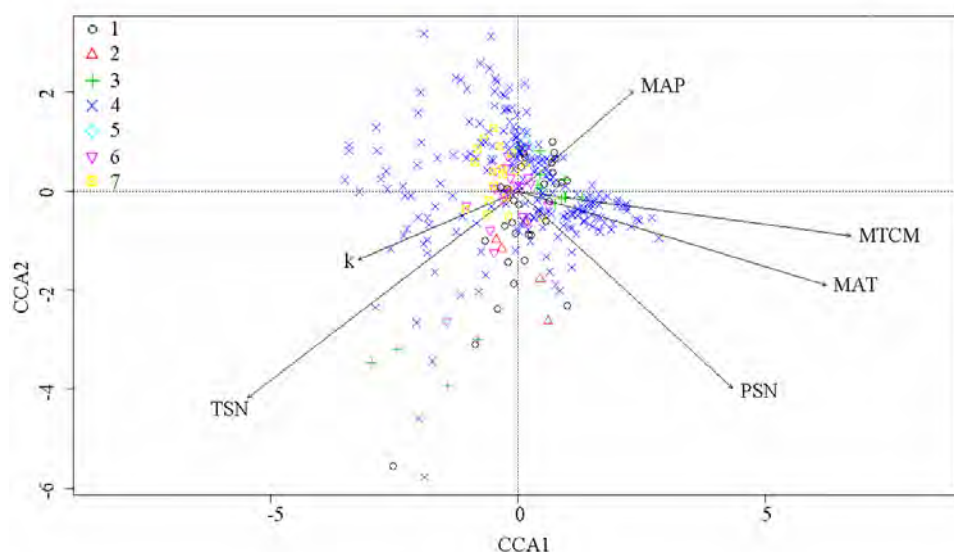


图3 7类植被型群落样方的CCA排序。1: 稀树草原; 2: 肉质灌丛; 3: 常绿阔叶灌丛; 4: 暖性落叶阔叶灌丛; 5: 常绿硬叶林; 6: 落叶阔叶林; 7: 暖性针叶林。MAT: 年均温; MTCM: 最冷月均温; TSN: 气温季节性; MAP: 年降水量; k : 干燥指数; PSN: 降水季节性。

Fig. 3 CCA analysis for the plots of 7 vegetation types. 1, Savanna; 2, Succulent thicket; 3, Evergreen broadleaved thicket; 4, Warm deciduous broadleaved thicket; 5, Evergreen sclerophyllous forest; 6, Deciduous broadleaved forest; 7, Warm needle-leaved forest. MAT, mean annual temperature; MTCM, mean temperature of the coldest month; TSN, temperature seasonality; MAP, mean annual precipitation; k , aridity index; PSN, precipitation seasonality.

($R = -0.14$)。6个气候变量均对群落物种分布有显著影响, 决定系数由大到小依次为MTCM ($r^2 = 0.70$)、TSN ($r^2 = 0.67$)、MAT ($r^2 = 0.64$)、PSN ($r^2 = 0.51$)、 k ($r^2 = 0.18$)、MAP ($r^2 = 0.13$)。从能量和水分两方面, 本区的群落物种分布主要受最冷月均温和降水季节性的共同影响。

不同植被型, 最冷月均温和降水季节性的分布情况见图4, 其中最冷月均温均值由高到低(12.89–7.90)依次为肉质灌丛>稀树草原>常绿阔叶灌丛>常绿硬叶林>暖性落叶阔叶灌丛>落叶阔叶林>暖性针叶林, 标准偏差由大到小(5.62–0.72)依次为常绿阔叶灌丛>暖性落叶阔叶灌丛>常绿硬叶林>稀树草原>落叶阔叶林>暖性针叶林>肉质灌丛; 降水季节性由大到小(93.82–74.12)依次为肉质灌丛>稀树草原>落叶阔叶林>暖性落叶阔叶灌丛>暖性针叶林>常绿硬叶林>常绿阔叶灌丛, 标准偏差由大到小(26.80–2.75)依次为暖性针叶林>落叶阔叶林>暖性落叶阔叶灌丛>常绿阔叶灌丛>稀树草原>常绿硬叶林>肉质灌丛。

依据图4的结果, 可将稀树草原、肉质灌丛划分为干热河谷植被类型, 暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬

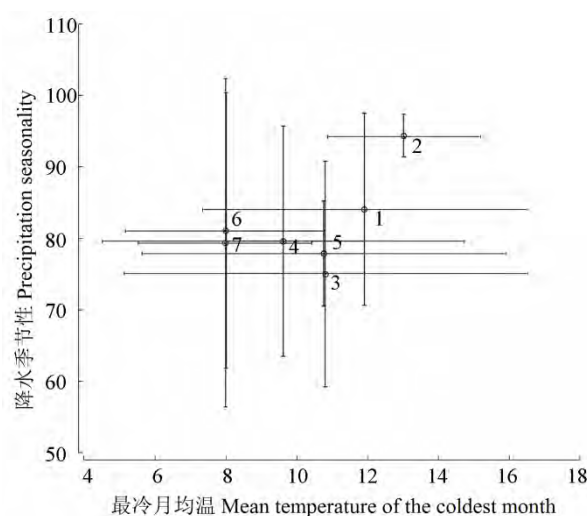


图4 不同植被型分布区的环境因子均值与标准偏差。1: 稀树草原; 2: 肉质灌丛; 3: 常绿阔叶灌丛; 4: 暖性落叶阔叶灌丛; 5: 常绿硬叶林; 6: 落叶阔叶林; 7: 暖性针叶林。

Fig. 4 The mean value and standard deviation of environmental factors in the distribution area of different vegetation types. 1, Savanna; 2, Succulent thicket; 3, Evergreen broadleaved thicket; 4, Warm deciduous broadleaved thicket; 5, Evergreen sclerophyllous forest; 6, Deciduous broadleaved forest; 7, Warm needle-leaved forest.

叶林、常绿阔叶灌丛划分为干暖河谷植被,而暖性针叶林、落叶阔叶林则属于干温河谷植被。

3 讨论

本文采用自适应仿射传播聚类的方法,从西南干旱河谷的整体角度,将本区的植被划分为7个植被型(稀树草原、肉质灌丛、常绿阔叶灌丛、暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林)。根据最冷月均温和降水季节性,将7种植被型划分为干热、干暖、干温3种类型,其中稀树草原、肉质灌丛属于干热河谷植被类型;暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林、常绿阔叶灌丛属于干暖河谷植被类型;暖性针叶林、落叶阔叶林属于干温河谷植被类型。这一划分结果与根据地理分区(杨勤业和郑度, 1989)划分的干热、干暖河谷植被(金振洲和欧晓昆, 2000)基本一致,其中干热河谷植被以旱生的稀树草原为主,并散生有肉质灌丛;干暖河谷植被以常绿、暖性落叶阔叶灌丛为主,并散生有常绿硬叶林;并在此基础上补充了以暖性针叶林、落叶阔叶林为主的干温河谷植被。

不同植被型的空间分布情况表明(图2, 附录1),我国西南干旱河谷植被以干暖河谷植被类型为主(样方比例66.5%),广泛分布于该区域的9条江段河谷;在河谷的偏低海拔和偏南河道,分布着干热河谷植被类型(样方比例29.8%);在河谷的偏高海拔和偏北河道,分布着干温河谷植被类型(样方比例3.7%)。

由于采样时间及交通情况的限制,本研究缺失了对怒江中游的干旱、半干旱荒漠植被这一植被类型(庄翠珍等, 2011)的调查研究,划分结果仍有一定的不完整性和不确定性,这一不足将在以后的研究中补充完善。

本文采用CCA排序的方法,分析了西南干旱河谷的植被分布与气候的关系,结果显示本区环境梯度上植被型的变化主要受最冷月均温和降水季节性的影响,这两个因子共同制约着西南干旱河谷的植被分布。

西南干旱河谷的植被被认为是稀树草原植被的干旱河谷残余(张荣祖, 1992),与美国加州、智利、南非、澳大利亚以及地中海盆地的稀树草原在外貌、区系上有诸多相似之处(Bourliere, 1983; Dallman, 1998; 金振洲, 2002)。在上述干旱半干旱

的地中海气候区,植被分布与温度和降水关系显著(Spano et al, 1999; Ludwig et al, 2004),其中地中海盆地的稀树草原分布受最冷月均温和年实际蒸散的显著影响(Barboni et al, 2004),非洲的稀树草原与年降水、降水的年际变化显著相关(Zeng & Neelin, 2000; Martiny et al, 2005),美国加州临海地区的稀树草原群落组成与降水的年际变化显著相关(Garcia & Ustin, 2001)。这与本文的分析结果基本一致,最冷月均温和降水变异共同制约着稀树草原的植被分布,说明了西南干旱河谷植被与稀树草原植被在气候因子响应上的相似性,这一结论从现代气候的角度证明了西南干旱河谷植被与稀树草原植被的关联。

致谢:衷心感谢北京大学生态系沈利峰、王韬、杨柳、秦思雨,成都理工大学的段士中、褚延梅、杨健等同学在野外调查中的付出!衷心感谢赵子思先生在标本鉴定方面给与的帮助。

参考文献

- Bao WK, Wang CM (2000) Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 18, 57–62. (in Chinese with English abstract) [包维楷, 王春明 (2000) 岷江上游山地生态系统的退化机制. *山地学报*, 18, 57–62.]
- Barboni D, Harrison SP, Bartlein PJ, Jalut G, New M, Prentice IC, Sanchez-Goni MF, Spessa A, Davis B, Stevenson AC (2004) Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: a pollen data analysis. *Journal of Vegetation Science*, 15, 635–646.
- Bourliere F (1983) *Ecosystems of the World, Tropical Savannas*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Cardille JA, Lambois M (2009) From the redwood forest to the gulf stream waters: human signature nearly ubiquitous in representative US landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 130–134.
- Condit R, Pitman N, Leigh EG, Chave J, Terborgh J, Foster RB, Núñez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau HC, Losos E, Hubbell SP (2002) Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666–669.
- Curtis JT, McIntosh RP (1951) An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32, 476–496.
- Dallman PR (1998) *Plant Life in the World's Mediterranean Climates: California, Chile, South Africa, Australia, and the Mediterranean Basin*. University of California Press, Berkeley.
- DeCáceres M, Wiser SK (2012) Towards consistency in vegetation classification. *Journal of Vegetation Science*, 23, 387–393.

- Dufrene M, Legendre P (1997) Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 345–366.
- Fang JY, Song YC, Liu HY, Piao SL (2002) Vegetation–climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122. (in Chinese with English abstract) [方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 朴世龙 (2002) 植被气候关系与我国的植被分区. *植物学报*, 44, 1105–1122.]
- Flora of China Editorial Committee (2013) *Flora of China*. <http://foc.eflora.cn/> (accessed 2013-12-29)
- Frey BJ, Dueck D (2007) Clustering by passing messages between data points. *Science*, 315, 972–976.
- Frey BJ, Dueck D (2008) Response to comment on “Clustering by passing messages between data points”. *Science*, 319, 726.
- Garcia M, Ustin SL (2001) Detection of interannual vegetation responses to climatic variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1480–1490.
- Goodall DW (1974) A new method for the analysis of spatial pattern by random pairing of quadrats. *Vegetatio*, 29, 135–146.
- Guan WB, Ye MS, Ma KM, Liu GH, Wang XL (2004) Vegetation classification and the main types of vegetation of the dry valley of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 22, 679–686. (in Chinese with English abstract) [关文彬, 冶民生, 马克明, 刘国华, 汪西林 (2004) 岷江干旱河谷植被分类及其主要类型. *山地学报*, 22, 679–686.]
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guegan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22(5), 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山–云南高原干旱河谷形成原因研究. *资源科学*, 22(5), 69–72.]
- Hijmans RJ, Cameron S, Parra J (2009) WorldClim—global climate data. <http://www.worldclim.org>. (accessed 2014-07-01)
- Huang FZ, Wang B, Ding T, Xiang WS, Li XK, Zhou AP (2014) Numerical classification of associations in a northern tropical karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factors. *Biodiversity Science*, 22, 157–166. (in Chinese with English abstract) [黄甫昭, 王斌, 丁涛, 向悟生, 李先琨, 周爱萍 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系. *生物多样性*, 22, 157–166.]
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1998) 滇川干暖河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (1999) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-hot valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 19, 1–14. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 19, 1–14.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Liu FY, Li K, Sun YY, Tang GY, Zhang CH (2010) Effects of climate on vegetation recovery in dry hot valleys of Hengduan Mountains Region in Southwest China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19, 1386–1391. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 李昆, 孙永玉, 唐国勇, 张春华 (2010) 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响. *长江流域资源与环境*, 19, 1386–1391.]
- Liu FY, Zhu H (2005) Numerical classification and diversity analysis for the vegetation in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province. *Guihaia*, 25, 22–25. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 朱华 (2005) 元江干热河谷植被数量分类及其多样性分析. *广西植物*, 25, 22–25.]
- Liu WB (1994) The main types in the semi-arid valley shrubs in the upper reaches of the Minjiang River. *Mountain Research*, 12, 27–31. (in Chinese with English abstract) [刘文彬 (1994) 岷江上游半干旱河谷灌丛的主要类型. *山地研究*, 12, 27–31.]
- Liu Y (2015) Plant Diversity and Phytogeography of Arid Valley in Major Rivers of the Southwestern China. PhD dissertation, Peking University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晔 (2015) 中国西南干旱河谷植被与植物多样性空间格局与生物地理机制. 博士学位论文, 北京大学, 北京.]
- Ludwig F, de Kroon H, Berendse F, Prins HHT (2004) The influence of savanna trees on nutrient, water and light availability and the understorey vegetation. *Plant Ecology*, 170, 93–105.
- Mabry C, Ackerly D, Gerhardt F (2000) Landscape and species level distribution of morphological and life history traits in a temperate woodland flora. *Journal of Vegetation Science*, 11, 213–224.
- Martiny N, Richard Y, Camberlin P (2005) Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophysical Research Letters*, 32, L24403.
- Ming QZ, Shi ZT (2007) New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region. *Journal of Desert Research*, 27, 99–104. (in Chinese with English abstract) [明

- 庆忠, 史正涛 (2007) 三江并流区干热河谷成因新探析. *中国沙漠*, 27, 99–104.]
- Morlon H, Schwikl DW, Bryant JA, Marquet PA, Rebelo AG, Tauss C, Bohannan BJM, Green JL (2011) Spatial patterns of phylogenetic diversity. *Ecology Letters*, 14, 141–149.
- Natural Divisions Working Committee of Chinese Academy of Sciences (1959) Comprehensive Physical Regionalization of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院自然区划工作委员会 (1959) 中国综合自然区划. 科学出版社, 北京.]
- Oksanen J, Kindt R, Legendre P, O'Hara B, Stevens MHH, Oksanen MJ, Suggests MASS (2007) The Vegan Package. <http://cran.r-project.org/> (accessed 2010-09-01)
- Qiu ZQ, Yang YH, Cao XW, Sun PJ, Sun XG (2007) Species diversity and floristic characteristics of woody plants in the dry valley of the Bailong River, China. *Journal of Gansu Agricultural University*, 42(5), 119–125. (in Chinese with English abstract) [邱祖青, 杨永宏, 曹秀文, 孙培坚, 孙学刚 (2007) 白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征. *甘肃农业大学学报*, 42(5), 119–125.]
- Roberts DW (2006) Labdsv: Laboratory for dynamic synthetic vegetation phenology. <http://www.ecology.msu.montana.edu/labdsv/R> (accessed 2010-09-01)
- Roleček J, Tichý L, Zelený D, Chytrý M (2009) Modified TWINSpan classification in which the hierarchy respects cluster heterogeneity. *Journal of Vegetation Science*, 20, 596–602.
- Rueda M, Rodríguez MÁ, Hawkins BA (2013) Identifying global zoogeographical regions: lessons from Wallace. *Journal of Biogeography*, 40, 2215–2225.
- Soininen J, McDonald R, Hillebrand H (2007) The distance decay of similarity in ecological communities. *Ecography*, 30, 3–12.
- Song YC (2001) Vegetation Ecology. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2001) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Spano D, Cesaraccio C, Duce P, Snyder RL (1999) Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42, 124–133.
- ter Braak CJF (1986) Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167–1179.
- Vetaas OR, Grytnes JA (2002) Distribution of vascular plant species richness and endemic richness along the Himalayan elevation gradient in Nepal. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 291–301.
- Wang KJ, Zhang JY, Li D, Zhang XN, Guo T (2007) Adaptive affinity propagation clustering. *Acta Automatica Sinica*, 33, 1242–1246. (in Chinese with English abstract) [王开军, 张军英, 李丹, 张新娜, 郭涛 (2007) 自适应仿射传播聚类. *自动化学报*, 33, 1242–1246.]
- Whittaker RH (2012) Classification of Plant Communities. Springer, Berlin.
- Wu ZY, Wang HS (1983) Chinese Physical Geography. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 王荷生 (1983) 中国自然地理. 科学出版社, 北京.]
- Yang QY, Zheng D (1989) An outline of physico-geographic regionalization of the Hengduan Mountainous Region. *Mountain Research*, 7, 56–64. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度 (1989) 横断山区综合自然区划纲要. *山地研究*, 7, 56–64.]
- Ye MS, Guan WB, Tan H, Ma KM, Liu G, Wang XL (2004) The α diversity of shrubs community in the arid valley of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1123–1130. (in Chinese with English abstract) [冶民生, 关文彬, 谭辉, 马克明, 刘国, 汪西林 (2004) 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. *生态学报*, 24, 1123–1130.]
- Zeng N, Neelin JD (2000) The role of vegetation–climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna. *Journal of Climate*, 13, 2665–2670.
- Zhang JT (2004) Quantitative Ecology. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang RZ (1992) The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhu H, Cai L (2004) Vegetation of Upper Mekong Valley. Yunnan Education Publishing House, Kunming. (in Chinese) [朱华, 蔡琳 (2004) 澜沧江流域植被. 云南教育出版社, 昆明.]
- Zhu XX (2014) The Flora of Seed Plants in Three Rivers Valley of SW China. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [朱鑫鑫 (2014) 华西南三江河谷种子植物区系研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Zhuang CZ, Du F, Liu N, Zhang H, Chen Y, Du XL (2011) Vegetative characteristics in the dry valley of the middle reaches of Nujiang River in Tibet, China. *Plant Diversity and Resources*, 34, 433–442. (in Chinese with English abstract) [庄翠珍, 杜凡, 刘宁, 张辉, 陈勇, 杜小浪 (2011) 怒江中游西藏境内干旱河谷荒漠植被特征. *植物分类与资源学报*, 34, 433–442.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 西南干旱河谷各群落的分布及主要物种组成

Appendix 1 Distribution and major species composition of plant communities in dry valleys of Southwest China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015241-1.pdf>

刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊. 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. 生物多样性, 2016, **24** (4): 378–388.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015241

附录1 西南干旱河谷各群落的分布及主要物种组成

Appendix 1 Distribution and major species composition of plant communities in dry valleys of Southwest China

| 群系 Formation | 流域 Watershed | 样方数 Number of plots | 海拔 Elevation (m) | 北纬 North lati- tude (°) | 经度 East longitude (°) | 种密度 Species density (/100 m ²) | 主要物种 Major species | | | 盖度 Cover(mean ± SD) (%) | 胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²) |
|--|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--|--|---|---------|-------------------------------|--|
| | | | | | | | 草本 Herb | 灌木 Shrub | 乔木 Tree | 草本 Herb | 灌木 Shrub 乔木 Tree |
| 1 从毛羊胡子草 灌草丛 Form. <i>Eriophorum comosum</i> | JSJ、NPJ | 13 | 700–1,439 | 23.80–26.92 | 101.80–103.24 | 12 | 从毛羊胡子草 <i>Eriophorum comosum</i> 、 细柄草 <i>Capillipedium par- viflorum</i> | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i> 、 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> | | 78.1±10.4 | 18.1±1.8 |
| 2 短梗苞茅灌丛 Form. <i>Hyparrhe- nia diplandra</i> | JSJ | 9 | 1,520–1,630 | 25.97 | 101.80–101.89 | 14 | 短梗苞茅 <i>Hyparrhenia diplandra</i> | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> | | 68.9±9.3 | 30.6±12 |
| 3 黄茅灌草丛 Form. <i>Heteropo- gon contortus</i> | BLJ、JSJ、LCJ、 NJ、NPJ、YJ | 160 | 247–1,590 | 23.20–33.34 | 98.82–105.12 | 16 | 黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> 、马桑 <i>Coriaria nepalensis</i> 、 类芦 <i>Neyraudia reynaudi- ana</i> 、 毛萼香茶菜 <i>Isodon eriocalyx</i> | 戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i> | | 58.3±17.6 | 33.8±20 |
| 4 孔颖草灌丛 Form. <i>Bothri- ochloa pertusa</i> | JSJ、NJ、YJ | 75 | 404–1,550 | 23.20–26.92 | 98.84–102.92 | 20 | 孔颖草 <i>Bothriochloa per- tusa</i> 、 西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i> | 浆果楝 <i>Cipadessa baccif- era</i> 、 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、 盐麸木 <i>Rhus chinensis</i> | | 59.1±22 | 24.8±12.9 |
| 5 木棉灌丛 Form. <i>Bombax ceiba</i> | JSJ、NJ | 6 | 750–1,336 | 25.55–26.79 | 98.83–100.41 | 25 | 荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i> | 木棉 <i>Bombax ceiba</i> 、 光叶山黄麻 <i>Trema can- nabina</i> | | 37.7±29.1 | 3.1±2.5 |
| 6 牛角瓜灌丛 Form. <i>Calotropis gigantea</i> | JSJ | 10 | 770–930 | 26.92 | 102.90–102.92 | 17 | 孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> | 牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> 、 假烟叶树 <i>Solanum erian- thum</i> | | 33.8±20.9 | 50.5±11.4 |
| 7 双花草灌丛 Form. <i>Dichan- thium annulatum</i> | JSJ、NPJ、YJ | 27 | 247–1,580 | 23.20–26.92 | 101.70–103.91 | 16 | 双花草 <i>Dichanthium annu- latum</i> 、 西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i> 、 牛筋草 <i>Eleusine indica</i> | 羽萼木 <i>Colebrookea op- positifolia</i> 、 单叶拿身草 <i>Desmodium zonatum</i> 、 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> | | 57.4±15.9 | 24.1±10.9 |
| 8 芸香草灌丛 Form. <i>Cymbopo- gon distans</i> | JSJ、YJ | 12 | 1,070–1,430 | 23.89–26.92 | 101.30–102.92 | 17 | 芸香草 <i>Cymbopogon dis- tans</i> 、 长齿蔗茅 <i>Saccharum longe- setosum</i> 、 山野豌豆 <i>Vicia amoena</i> | 灰毛莠 <i>Caryopteris forres- tii</i> 、 假杜鹃 <i>Barleria cristata</i> 、 堇花 <i>Wikstroemia canescens</i> | | 71.9±12.4 | 20.8±6.1 |
| 9 知风草灌丛 Form. <i>Eragrostis ferruginea</i> | BLJ | 51 | 826–1,016 | 32.81–33.34 | 104.60–105.12 | 15 | 虎尾草 <i>Chloris virgata</i> 、 野菊 <i>Chrysanthemum indi- cum</i> 、 知风草 <i>Eragrostis ferruginea</i> | 狭叶海漆 <i>Excoecaria acerifolia</i> var. <i>cuspidata</i> 、 甘肃野丁香 <i>Leptodermis purdomii</i> 、 黄荆 <i>Vitex negundo</i> | | 42.5±18.9 | 22.7±10.3 |

| 群系 Formation | 流域 Watershed | 样方数 Number of plots | 海拔 Elevation (m) | 北纬 North latitude (°) | 经度 East longitude (°) | 种密度 Species density (/100 m ²) | 主要物种 Major species | | | 盖度 Cover(mean ± SD) (%) | 胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²) | |
|---|----------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|---|--|--|---------|----------------------------|---|---------|
| | | | | | | | 草本 Herb | 灌木 Shrub | 乔木 Tree | 草本 Herb | 灌木 Shrub | 乔木 Tree |
| 10 仙人掌灌丛 Form. <i>Opuntia dillenii</i> | JSJ、NJ、YJ | 23 | 718–1,500 | 25.09–27.21 | 98.86–102.92 | 24 | 百日菊 <i>Zinnia elegans</i> 、黑果黄茅 <i>Heteropogon melanocarpus</i> 、蛛丝毛蓝耳草 <i>Cyanotis arachnoidea</i> | 仙人掌 <i>Opuntia dillenii</i> 、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> 、薄叶羊蹄甲 <i>Bauhinia glauca</i> subsp. <i>tenuiflora</i> | | 23.6±8.3 | 49.2±12.1 | |
| 11 霸王鞭灌丛 Form. <i>Euphorbia royleana</i> | NJ、YJ | 13 | 450–990 | 23.63–25.09 | 98.86–101.93 | 23 | 孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> 、野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> | 霸王鞭 <i>Euphorbia royleana</i> 、白饭树 <i>Flueggea virosa</i> 、华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i> | | 31.5±14.0 | 58.4±17.2 | |
| 12 清香木灌丛 Form. <i>Pistacia weinmanniifolia</i> | LCJ、NJ、YJ | 25 | 760–1,549 | 24.31–26.44 | 98.42–101.45 | 20 | 紫马唐 <i>Digitaria violascens</i> 、细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、硬秆子草 <i>Capillipedium assimile</i> | 清香木 <i>Pistacia weinmanniifolia</i> 、虾子花 <i>Woodfordia fruticosa</i> 、余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> | | 41.1±15.7 | 54.3±20.6 | |
| 13 车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i> | JSJ、YJ | 45 | 950–1,630 | 25.03–26.92 | 100.40–102.92 | 15 | 孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> 、土瓜狼毒 <i>Euphorbia prolifera</i> 、白灰毛豆 <i>Tephrosia candida</i> | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、滇榄仁 <i>Terminalia franchetii</i> | | 52.2±20.8 | 43.1±15.7 | |
| 14 光叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema cannabina</i> | JSJ | 3 | 752–1,470 | 26.28–26.79 | 100.5–102.38 | 21 | 白茅草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> 、西南莠草 <i>Themeda hookeri</i> 、硬秆子草 <i>Capillipedium assimile</i> | 光叶山黄麻 <i>Trema cannabina</i> 、黄荆 <i>Vitex negundo</i> 、假杜鹃 <i>Barleria cristata</i> | | 21.6±10 | 36.8±1.8 | |
| 15 狭叶山黄麻灌丛 Form. <i>Trema angustifolia</i> | NPJ、YJ | 6 | 229–1,038 | 23.05–23.87 | 102.4–103.49 | 14 | 双花草 <i>Dichanthium annulatum</i> 、龙爪茅 <i>Dactyloctenium aegyptium</i> | 狭叶山黄麻 <i>Trema angustifolia</i> | | 50.4±16.2 | 21.2±11.4 | |
| 16 鞍叶羊蹄甲灌丛 Form. <i>Bauhinia brachycarpa</i> | BLJ、DDH、JSJ、LCJ、MJ、NJ、NPJ、YJ、YLJ | 682 | 182–4,060 | 23.00–33.34 | 98.42–105.20 | 28 | 水莎草 <i>Cyperus serotinus</i> 、地海椒 <i>Physalisstrum sinense</i> | 鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i> 、茶条木 <i>Delavaya toxocarpa</i> 、牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i> | | 41.5±21.4 | 34.4±18.6 | |
| 17 华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i> | JSJ、YJ | 23 | 460–1,620 | 23.63–26.58 | 100.40–101.93 | 19 | 芸香草 <i>Cymbopogon distans</i> 、细柄草 <i>Capillipedium parviflorum</i> 、孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> | 华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i> 、荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> | | 43.6±20 | 55.4±16.7 | |
| 18 余甘子灌丛 Form. <i>Phyllanthus emblica</i> | JSJ、NJ、YJ | 30 | 720–1,440 | 25.03–26.46 | 98.82–101.92 | 18 | 西南莠草 <i>Themeda hookeri</i> 、孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> | 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> 、车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> 、清香木 <i>Pistacia weinmanni-</i> | | 31.8±15 | 17.9±5.5 | |

| 群系 Formation | 流域 Watershed | 样方数 Number of plots | 海拔 Elevation (m) | 北纬 North latitude (°) | 经度 East longitude (°) | 种密度 Species density (/100 m ²) | 主要物种 Major species | | | 盖度 Cover(mean ± SD) (%) | 胸高断面积 Basal area (mean ± SD) (m ²) | |
|---|-----------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|---|--|--|----------------------------------|----------------------------|---|------------------|
| | | | | | | | 草本 Herb | 灌木 Shrub | 乔木 Tree | | 草本 Herb | 灌木 Shrub 乔木 Tree |
| 19 云南山蚂蝗灌丛 Form. <i>Desmodium yunnanense</i> | JSJ | 10 | 1,500–1,600 | 25.57 | 102.60–102.65 | 53 | 香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i> 、 辽东蒿 <i>Artemisia verbenacea</i> 、 云南兔儿风 <i>Ainsliaea yunnanensis</i> | <i>ifolia</i> 云南山蚂蝗 <i>Desmodium yunnanense</i> 、 鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i> 、 毛叶黄杞 <i>Engelhardia spicata</i> var. <i>colebrookeana</i> | | 7.5±6.2 | 52.2±10.3 | |
| 20 黄荆灌丛 Form. <i>Vitex negundo</i> | BLJ、JSJ、NJ、YJ | 56 | 477–1,330 | 23.49–32.86 | 98.42–105.17 | 17 | 西藏须芒草 <i>Andropogon munroi</i> 、 牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、 香茶菜 <i>Isodon amethystoides</i> | 黄荆 <i>Vitex negundo</i> 、 滇榄仁 <i>Terminalia franchetii</i> | | 31.1±18.6 | 60±16.3 | |
| 21 细叶黄皮灌丛 Form. <i>Clausena anisum-olens</i> | YJ | 4 | 379–465 | 23.28–23.78 | 101.70–102.65 | 17 | 牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i> 、 双花草 <i>Dichanthium annulatum</i> 、 类黍尾稃草 <i>Urochloa panicoides</i> | 细叶黄皮 <i>Clausena anisum-olens</i> 、 黄荆 <i>Vitex negundo</i> | | 67.2±16.9 | 28.4±14.7 | |
| 22 铁橡栎林 Form. <i>Quercus cocciferoides</i> | JSJ、NJ | 6 | 1,386–1,890 | 25.57–26.54 | 98.91–102.65 | 38 | 五月艾 <i>Artemisia indica</i> 、 头花蓼 <i>Polygonum capitatum</i> | 铁仔 <i>Myrsine africana</i> 、 密花荚蒾 <i>Viburnum congestum</i> | 铁橡栎 <i>Quercus cocciferoides</i> | 4.1±1.1 | 22.8±2.7 | 0.5±0.1 |
| 23 乌柏林 Form. <i>Triadica sebifera</i> | JSJ、NJ | 6 | 358–1,356 | 25.55–28.68 | 98.86–103.87 | 45 | 野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> 、 有芒鸭嘴草 <i>Ischaemum aristatum</i> 、 芒 <i>Miscanthus sinensis</i> | 光叶山黄麻 <i>Trema cannabina</i> | 乌柏 <i>Triadica sebifera</i> | 36.6±18.6 | 59.7±5.9 | 0.2±0.1 |
| 24 云南松疏林 Form. <i>Pinus yunnanensis</i> | DDH、JSJ、LCJ、NJ、NPJ、YJ | 44 | 870–2,590 | 24.74–29.83 | 98.58–103.17 | 29 | 刺芒野古草 <i>Arundinella setosa</i> 、 柔毛阴山芥 <i>Yinshania henryi</i> | 芳香白珠 <i>Gaultheria fragrantissima</i> 、 清香木 <i>Pistacia weinmanniifolia</i> | 云南松 <i>Pinus yunnanensis</i> | 32.3±18.5 | 28.4±16.1 | 0.3±0.1 |

NJ: 怒江; LCJ: 澜沧江; YJ: 元江; NPJ: 南盘江; JSJ: 金沙江; YLJ: 雅砻江; DDH: 大渡河; MJ: 岷江; BLJ: 白龙江
 NJ, Nujiang River; LCJ, Lancangjiang River; YJ, Yuanjiang River; NPJ, Nanpanjiang River; JSJ, Jinshajiang River; YLJ, Yalongjiang River; DDH, Daduhe River; MJ, Minjiang River; BLJ, Bailongjiang River.

• 研究报告 •

怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子

许 玥¹ 李 鹏¹ 刘 晔² 张婉君³ 秦思雨⁴ 沈泽昊^{1*}¹ (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)² (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)³ (北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京 100053)⁴ (Conservation International, 2011 Crystal Drive, Arlington, VA 22202)

摘要: 外来物种入侵严重威胁着乡土植物多样性并削弱了生态系统服务功能。本文基于滇西北怒江河谷植被调查的样方数据, 从群落水平研究了乡土和入侵植物多样性的空间分布格局, 以及地形、气候、人类干扰等因子对两种格局的影响。本研究共记录到外来入侵植物26种, 隶属于13科21属; 乡土植物1,145种, 分属于158科628属。沿着怒江河谷, 入侵植物物种丰富度随纬度与海拔的增加而减少; 乡土物种丰富度则随纬度增加而增加, 并在海拔梯度上呈单峰格局。运用广义线性模型分析公路边缘效应(反映生境干扰)、气候、地形和土壤等环境因素对物种丰富度分布格局的影响。等级方差分离的结果显示, 公路两侧的生境干扰对入侵种和乡土种的丰富度格局均具有首要影响。在自然环境因子中, 降水量是入侵植物丰富度的主要限制因子, 而乡土物种丰富度则主要受到地形因子尤其是坡向的影响。结构方程模型的分析结果也表明, 乡土植物和入侵植物丰富度之间的负相关关系反映了二者对环境响应的差异。本文结果支持物种入侵的资源可利用性限制假说, 并强调了人类活动对生物多样性的负面影响; 乡土植物或已较好地适应了干旱河谷气候, 但并没有显示出对外来物种入侵的抵抗作用。

关键词: 入侵物种; 乡土物种; 空间格局; 气候; 人类活动

Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley

Yue Xu¹, Peng Li¹, Ye Liu², Wanjun Zhang³, Siyu Qin⁴, Zehao Shen^{1*}¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871² School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055³ Beijing Guodaotong Highway Design & Research Institute CO., LTD, Beijing 100053⁴ Conservation International, 2011 Crystal Drive, Arlington, VA 22202

Abstract: Biological invasion has attracted widespread attention because invasive species threaten native biodiversity and weaken ecosystem services. Based on field investigation of vegetation in Nujiang River valley, Northwest Yunnan, we analyzed the spatial patterns of native and invasive species richness, and the effects of topography, climate, and roadside habitat disturbance on the invasive versus native plant species richness. We recorded 26 exotic invasive plant species that belong to 13 families and 21 genera, and 1,145 native plant species, belonging to 158 families and 628 genera. Along the Nujiang River valley, species richness of invasive plants decreased with increasing latitude and altitude, while species richness of native plants increased with increasing latitude, and showed a hump-shaped pattern with elevation. A generalized linear model was used to estimate the roles of roadside disturbance, climate, topography and soil nutrients on the distribution of both native and invasive species richness. Results of hierarchical variation partitioning revealed that roadside habitat disturbance had primary impact on the distribution of two groups of species. Pre-

收稿日期: 2015-09-14 接受日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

cipitation was the climatic determinant of invasive species diversity, and small-scale topographic factors, especially aspect, mainly affected native species diversity. It is likely that native species became drought-resistant in the evolutionary process while invasive species failed to adapt themselves to the local arid environments due to the short colonization time. This research supports the hypothesis that resource availability is the main factor limiting plant invasion, and highlights the negative effects of human activity on biodiversity. In addition, results of structural equation modelling revealed that native communities aren't resistant to plant invasion. The negative relationship between invasive and native species richness reflects the different responses of the two group species to environmental factors.

Key words: invasive species; native species; spatial patterns; climate; human activity

生物入侵是全球变化的重要组成部分(Mooney & Hobbs, 2000), 已在从局域到全球各个尺度上造成严重的生态后果(Christian, 2001; Ehrenfeld, 2003)和经济损失(Pimentel et al, 2000)。生物入侵威胁入侵地的生物多样性, 削弱生态系统结构和功能。例如, 生物入侵通过改变可燃物组成和性状, 影响到生态系统的火烧频率和强度(Brooks et al, 2004), 改变生态系统的养分循环、水分动态以及土壤生化环境, 进而改变乡土物种丰富度和种群多度(Ehrenfeld, 2010; Hulme, 2013)。由于入侵种一般生长速度快(Grotkopp et al, 2002; van Kleunen et al, 2010), 光合速率(郑丽和冯玉龙, 2005)和种子产量高(鲁萍等, 2005; Kissling et al, 2006), 许多具有克隆繁殖能力(Baker, 1974; Liu et al, 2006), 因此入侵后易于成为群落优势种。

物种丰富度的空间格局一直是生态学和生物地理学的研究热点。物种丰富度变化和周转速率在纬度和海拔梯度上往往较为显著, 因此备受关注(Lomolino, 2001)。乡土物种丰富度一般随纬度和海拔单调递减或者呈单峰格局, 尤其是当低海拔人类干扰严重时(Stevens, 1992; Rahbek, 1995); 而入侵物种丰富度一般随海拔升高呈现单调递减的格局, 其纬度格局则与研究区域的位置和尺度有关。尽管对物种分布空间格局的研究已有很长的历史, 但对外来种随纬度和海拔梯度的入侵格局的研究仍有待深入。开展这方面研究显然有助于增加对物种丰富度决定机制的理解(Lembrechts et al, 2014)。

植物群落中生物入侵程度的影响因子一般可分为生物与非生物因素。生物因素主要包括扩散限制、物种间的竞争或互利关系、天敌是否存在等(Halpern & Underwood, 2006; Vilà et al, 2011); 非生物因素包括气温、降水、养分及光资源的可利用性

等, 以及干扰带来的生态位空缺(Funk & Zachary, 2010; Matzek, 2011; Toledo et al, 2011)。种间竞争较弱、环境压力较小而可利用资源丰富, 或干扰体系发生改变的群落容易被入侵。然而, 生物及非生物因子之间存在复杂的相互作用, 不同机制对生物入侵影响的相对重要性尚无定论(Kueffer et al, 2013)。

滇西北三江并流地区是具有全球重要性的生物多样性热点地区(云南省三江并流管理局, 2010)。包括紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)在内的外来植物已经入侵这一区域, 在一定程度上对当地生态环境和国民经济造成了严重影响(卢志军和马克平, 2004; Lu & Ma, 2005; 胡发广等, 2007)。目前, 关于这一区域生物入侵的研究或是基于单个物种(刘晔等, 2013), 或是以人工生态系统为本底进行调查(王大能, 2012), 缺少入侵物种和乡土物种丰富度的对比, 并且不能确定自然和人类干扰因素对生物入侵影响的贡献。本文基于对怒江河谷公路沿线植物入侵的详尽群落学调查, 试图研究以下3方面的问题: (1)怒江河谷地区入侵植物和乡土植物丰富度的空间格局; (2)入侵和乡土物种多样性之间的关系; (3)人为干扰、怒江河谷的自然环境以及植物群落结构等因子对入侵物种和乡土物种丰富度影响的相对大小。希望通过此研究, 能够定量评价在生物多样性丰富的区域, 决定入侵植物多样性的不同机制及其相互之间的关系, 为外来入侵植物的预防、控制和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

怒江是中国西南地区的大河之一, 发源于青藏高原的唐古拉山南麓, 在云南省内流经怒江州的贡山、福贡、泸水和保山地区的保山、施甸、龙陵、

昌宁等7县市, 出国境后称为萨尔温江。云南省内的怒江段位于98°07'–100°02' E, 24°07'–28°23' N, 长度650 km, 流域面积3.35万km², 占云南省面积的8.7%。云南怒江流域受西南季风影响强烈, 年均气温5.2–16.6℃, 年均降水量961.7–1,639.6 mm。研究区河谷海拔从南到北递增, 气温相应降低, 而降水量呈递增趋势, 具有亚热带半干旱至半湿润气候; 河谷低地植被稀疏, 以云南松(*Pinus yunnanensis*)为优势种的针叶林或混交林和灌草丛间断分布(李晖等, 2009)。

研究区内的公路主要是沿江呈南北分布的省道S228, 沿线有县、乡(镇)和村级居民点分布。公路两旁植被长期受到不同程度的人为干扰, 生物入侵现象十分普遍。

1.2 野外植物群落与生境调查

为了探究怒江地区外来植物的入侵现状及影响因素, 我们在公路沿线进行了系统的植物群落和生境调查及土壤采样。采取分层系统设计, 沿怒江河谷延伸的省道S228两侧布设调查样点, 参考各生境因子调整采样强度, 包括: (1)公路等级: 包括省道(138个样方)、县道(112个样方)和乡村道(24个样方); (2)道路上、下坡: 沿样线在公路两侧等距离布设样方各1–3个; (3)与道路距离: 样方到公路边距离依次为10 m、30 m、60 m, 以反映公路相关的生境干扰衰减的梯度; (4)土地覆盖类型: 避开建筑用地和生产用地。考虑到怒江河谷植被以灌草丛为主, 样方统一为10 m × 10 m, 以保证足够的取样面积。

群落调查线路上至滇藏交界的云南怒江州贡山县丙中洛, 下至保山市潞江县境内, 全长500余km, 共调查273个样方(图1)。用GPS测定每个样方的地理坐标和海拔。记录样方内所有维管束植物(包括外来物种); 测量所有胸径≥ 2 cm的乔木高度、胸径和个体数。利用罗盘仪测定样方的坡向、坡度, 记录坡位。生境干扰因子由3个变量表示, 即地表裸露比例、公路等级、样方到公路的距离。

1.3 样方气候数据

由于缺乏每个样方所在地气候状况的实际观测数据, 本研究采用Worldclim全球气候数据集(<http://www.worldclim.org/>)提供的月均气温和降水数据。该数据是全球气象台站50年(1950–2000年)观测数据平均值经空间插值得到的栅格数据, 空间分辨率为1 km。利用样方地点的地理坐标, 从美国

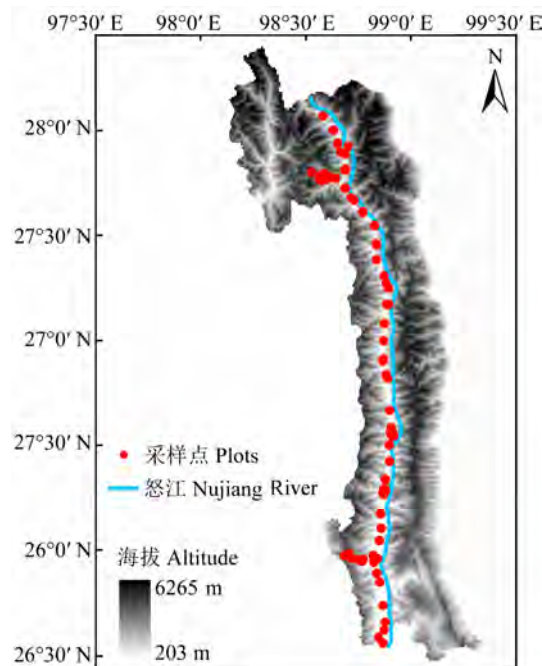


图1 怒江地区公路沿线植物调查样方分布图

Fig. 1 Distribution map of plant investigation plots alongside road in Nujiang River region

航空航天局(NASA)发布的全球数字高程模型(Global Digital Elevation Model, GDEM, 100 m分辨率)中提取研究区内的数字地形数据, 并采用刘晔(2015)提供的方法, 结合三江并流地区气象台站过去54年观测记录数据的平均值, 采用Co-Kriging插值修正, 得到每一样方点的12个月平均气温和降水数据。

进一步参考相关文献计算多个生物气候指标(Fang et al, 2002; Hawkins et al, 2003), 分为能量、水分和气候变异性3组。能量因子指标包括年均温(MAT)、最冷季均温(MTCQ)、最暖季均温(MTWQ)和年潜在蒸散量(PET) (Thorntwaite & Hare, 1955)。其中, 年潜在蒸散量表示在理想状态下, 一年内地表(植被、土壤和水体表面)向大气蒸腾水分的最大可能值, 反映了一个地区的环境能量, 其计算公式如下:

$$PET = \sum_{i=1}^{12} k_i \times e_i \quad (1)$$

其中 k_i 为第 i 个月的标准月换算因子, 可以通过换算因子表查得。 e_i 为第 i 个月的标准月份最大蒸散量, $e_i = 16 \times (10MMT_i/I)^a / (S/360)$, MMT_i 为月均温, I 为12个月总和的热量指标(°C), 计算公式为 $I = \sum(MMT_i$

/5)^{1.514}, $a = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.79 \times 10^{-2}I + 0.4923$, S 是月实际日照时数。上述公式仅适用于月均温在0–26.5°C之间。当 $MMT_i \leq 0^\circ\text{C}$ 时, PET设定为0, 当 $MMT_i \geq 26.5^\circ\text{C}$ 时, 由月均温直接查得 e 并计算PET。

水分因子包括年降水量(MAP)、最干季降水量(PDQ)、最湿季降水量(PWQ)、年实际蒸散量(AET)(Brutsaert, 1982)和水分亏缺(water deficit, WD)(Stephenson, 1990)。其中, 最干(或湿)季降水量是一年内降水最少(或最多)的3个月内的降水总量, 即一个地区冬季(或夏季)的降水量; 年实际蒸散量是一年内地表向大气蒸腾水分的实际值, 受水分和能量双重影响; 水分亏缺反映一个地方的干燥程度。其计算公式如下:

$$AET = MAP/[0.9 + (MAP/L)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$WD = AET - PET \quad (3)$$

其中, L 为平均蒸发量, $L = 300 + 25MAT + 0.05MAT^3$ 。

气候变异性因子包括温度季节性(temperature seasonality, TSN)和降水季节性(precipitation seasonality, PSN)(Fang & Lechowicz, 2006)。温度和降水季节性反映一个地区温度和降水的季节变化程度, 其计算公式如下:

$$TSN = \sum_{i=1}^{12} (MMT_i - MAT)^2 / 12)^{1/2} \quad (4)$$

$$PSN = \sum_{i=1}^{12} (MMP_i - MAP)^2 / 12) / MAP \quad (5)$$

其中, MMP_i 为一年内第 i 个月的月均降水。

1.4 数据分析

在分析乡土物种或入侵物种丰富度与纬度、海拔的关系时, 在模型中加入纬度和海拔的一次和二次项, 如果二次项结果显著($P < 0.05$), 则认为二者的关系非线性。

由于物种丰富度通常符合Poisson分布, 采用广义线性模型(generalized linear model, GLM)拟合入侵物种与乡土物种丰富度与环境因子的关系。当出现残差过度分散, 即残差/剩余自由度 > 1.2 时, 采用quasi-Poisson分布。由于部分气候因子之间存在严重的共线性, 因此先计算自变量之间的相关系数, 在气温、降水、气候变异性3组变量中各选1个组内相关性高而与组间变量相关性低的变量, 加入物种丰富度的多元广义线性模型, 根据赤池信息准则

(Akaike Information Criterion, AIC)选出最优模型。

基于GLM最优模型, 进一步采用等级方差分离(hierarchical variation partitioning, HVP)算法来定量评价不同自变量对丰富度变异性的独立贡献(Nally, 2002)。该方法通过穷尽比较包含1个到考虑的全部自变量的所有变量组合构建的模型, 分离出每个自变量的独立效应和联合效应, 并用Z-scores值检验自变量的独立效应是否统计显著。

为了获取环境因子约束下入侵物种和乡土物种丰富度的关系, 采用结构方程模型(structural equation model, SEM)进行分析, SEM能够同时分析影响入侵和乡土物种丰富度的因素之间的相互作用。数据采用Z-scores进行标准化处理, 使得不同变量间的过程系数可以比较。首先利用主成分分析(PCA)对所有地形、气候环境和人类干扰等因子做降维处理, 将这些存在高度相关性的变量转化为少数线性不相关的综合变量。我们根据PCA的特征值提取了贡献较大的前4个主成分。然后将获取的主成分与入侵物种和乡土物种丰富度一起纳入结构方程模型进行分析。

样方气候指标推算通过地理信息系统软件Arcgis 9.3完成。统计分析全部在统计软件R 3.2.0 (<http://www.r-project.org/>)中完成。

2 结果

2.1 入侵植物和乡土植物的组成和分布

本次调查的273个样方中共出现26种外来植物, 属于13科21属(附录1), 其中菊科植物最多, 占外来植物种的38.5%, 其次是茄科和大戟科。不同种的频度差异很大, 如番石榴(*Psidium guajava*)、曼陀罗(*Datura stramonium*)、婆婆纳(*Veronica didyma*)等均仅见于1个样方, 而紫茎泽兰出现在106个样方中。样方入侵物种丰富度介于0–7, 密度为 2.03 ± 1.45 种/100 m²。入侵植物原产地主要为美洲, 占76.9%, 其次来自欧洲、非洲热带和亚洲热带。26种外来入侵植物中草本17种, 占65.4%。入侵程度最严重的是鬼针草(*Bidens pilosa*), 出现的样方数和平均重要值分别为143和5.94, 其次是小白酒草(*Conyza canadensis*)、紫茎泽兰、苏门白酒草(*C. sumatrensis*)和藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)。紫茎泽兰的平均重要值最高(21.44), 构成比较普遍的优势群落。

样方中共记录1,145种乡土植物, 分属于158科

628属, 其中禾本科、豆科和菊科植物最为丰富。样方中乡土植物丰富度介于6–91种, 平均密度为 35.8 ± 16.3 种/100 m²。

在怒江流域, 入侵植物分布的纬度范围为25.068°–28.069° N, 最北出现的种类包括鬼针草、小白酒草、苏门白酒草和蓖麻(*Risinus communis*)。入侵种丰富度呈现随纬度增加而减少的趋势($P = 0.009$)。入侵植物的海拔分布范围为726–3,135 m, 分布海拔最高的物种为苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)。入侵物种丰富度随海拔升高而线性减少的趋势非常显著(海拔, $P < 0.001$; 海拔的二次项, $P = 0.189$)。乡土植物丰富度则表现出明显不同的格局, 丰富度随纬度增加显著上升($P < 0.001$), 随海拔上升表现出先增加后减少的单峰型格局(海拔, $P < 0.001$; 海拔的二次项, $P < 0.001$), 在中等海拔(2,000 m)处丰富度达到最高值(图2)。

2.2 入侵植物和乡土植物丰富度与环境因子的关系

关于入侵物种丰富度的GLM最优模型包括4个

因子: 公路等级、年均温、最湿季降水量和最干季降水量, 共解释了入侵物种丰富度变异的9.8%。其中公路等级、最干季降水量和年降水量分别贡献了全部解释量的54.1%、22.0%和16.71% (图3)。

乡土物种丰富度的GLM最优模型包括5个因子: 有无乔木(0/1)、坡向、坡度、裸地比例和最干季降水量, 共解释乡土物种丰富度的32.1%。其中, 裸地比例贡献最大(58.0%), 坡向(21.5%)和有无乔木(17.3%)是另外两个影响显著的因子。坡度和气候因子影响微弱(图3)。

2.3 入侵与乡土植物物种丰富度的关系

本研究表明, 在群落尺度上外来植物与乡土植物的多样性之间存在显著负相关关系($P < 0.001$) (图4), 即乡土物种的丰富度越高, 入侵物种的丰富度越低, 反映了群落复杂性对入侵植物的抵抗性。将样方分为有、无乔木层两类后, 在有乔木层的样方中, 入侵物种与乡土物种丰富度之间的负相关关系更为显著($P < 0.001$), 而无乔木层的样方中二者无明显关系($P = 0.832$), 表明在不同生境中驱动乡

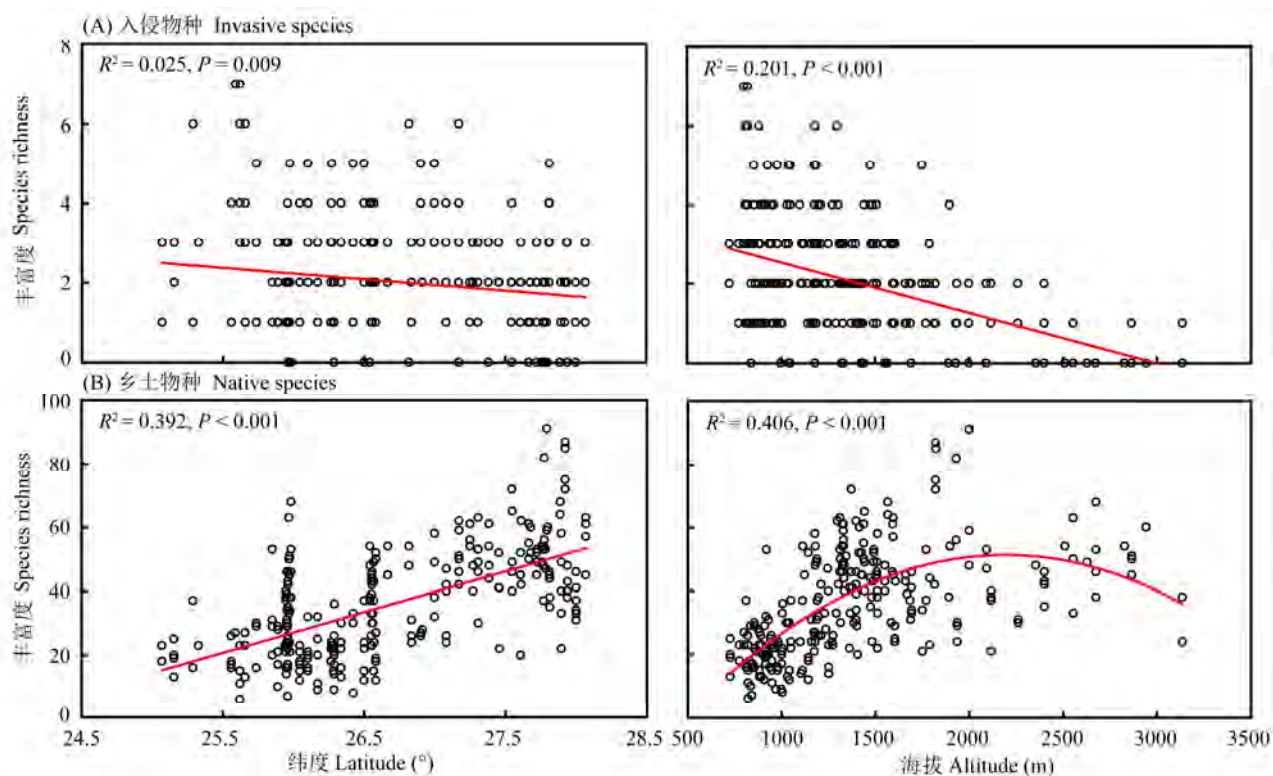


图2 怒江河谷入侵(A)与乡土植物(B)丰富度随纬度和海拔的分布

Fig. 2 Distribution of invasive (A) and native (B) species richness along latitude and altitude in Nujiang River valley

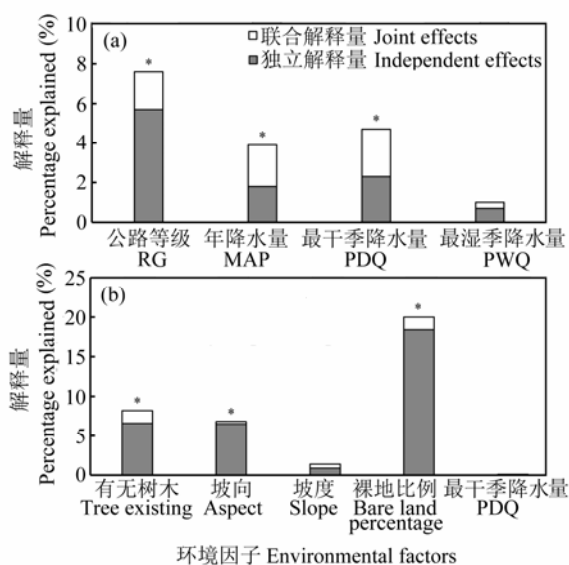


图3 基于等级方差分离的怒江河谷入侵(a)和乡土植物(b)物种丰富度格局的环境因子独立和联合解释能力。*表示在0.05水平显著。

Fig. 3 Independent and joint contributions of environmental variables accounting for the spatial pattern of invasive and native species richness in Nujiang River valley, based on hierarchical variation partitioning model. * indicates that influence is significant at the 0.05 level. RG, Road grade; MAP, Mean annual precipitation; PDQ, Precipitation of driest quarter; PWQ, Precipitation of wettest quarter.

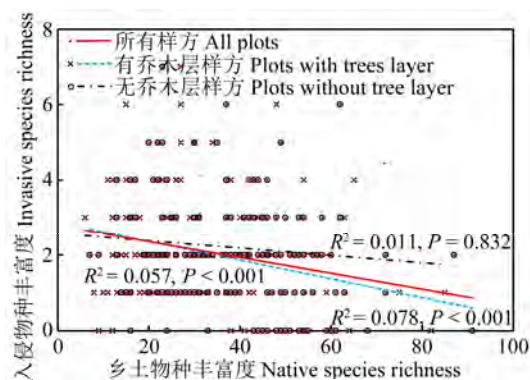


图4 入侵与乡土植物物种丰富度的关系

Fig. 4 Relationship between richness of invasive and native species

土物种和外来物种丰富度格局的机制可能不同。有乔木层存在的情况下,入侵物种丰富度显著低于只有灌草的样方($F = 4.581$, $P = 0.033$),而乡土物种丰富度显著高于只有灌草的样方($F = 20.736$, $P = 0.000$)。二者在干扰程度不同的生境中复杂的相互

作用可能是不同的生物和非生物因子共同作用的结果。无乔木层的样方中没有相关性,说明由于优势乡土竞争种的缺乏,导致可利用资源较多,在这些生境中可能没有强烈的种间相互作用。

根据各主成分的特征值,我们选取了前4个主成分代表人类干扰、地形和水热因子变量(表1)。前4个主成分累计代表了80.5%的因子信息量,第一主成分贡献率为48.6%,且大部分因子在这一主成分上的载荷为负值。第二主成分贡献率为15.6%,与成分载荷较大的因子呈正相关关系。其中,第一主成分主要表征热量因子,第二主成分则表征了水分因子,第三主成分主要代表降水季节性的信息,而第四主成分则代表了人为干扰和地形因子。

结构方程模型结果显示(图5),外来入侵物种丰富度只与第一主成分表现出极显著的负相关关系,与第二主成分负相关但并不显著,与第三和第四主成分正相关但并不显著。乡土物种丰富度与第一主成分为极显著正相关关系,与第二主成分之间为显著的正相关关系,与第三主成分正相关但并不显著,而与第四主成分为显著负相关关系。在控制了丰富度与环境因子的关系后,入侵种丰富度和乡土种丰富度之间没有表现出显著的相关性。

3 讨论

3.1 入侵和乡土物种丰富度的空间格局

研究区内入侵物种与乡土物种丰富度沿海拔梯度存在显著不同的空间分布格局,这个差异可能反映了入侵植物不同于乡土植物的生活史性状与环境需求(van Kleunen et al, 2010)。外来入侵物种丰富度随海拔上升而下降的格局与其他研究相似,但这种格局的成因目前还有很大争议,可能是由于逐渐严酷的非生物环境因子限制了外来种进一步扩散,或是人为影响减少导致繁殖体扩散能力降低,也可能仅仅是由于入侵时间较短,还没有随海拔上升完全占据可利用的生境(Daehler, 2005; Giorgis et al, 2011; Marini et al, 2012)。

3.2 环境因素对入侵和乡土物种丰富度格局的影响

探讨入侵和乡土植物的分布格局及形成机制是保护生物学研究的重要组成部分。关于环境因子对外来物种分布及其多样性格局的影响存在不同假说。Elton (1958)认为乡土物种丰富度高的地方对

表1 环境因子的主成分分析结果。表中的值为各因子在主成分中的载荷、各主成分的特征值及解释百分比。粗体为4个主成分中载荷较大的变量。

Table 1 Principal component analysis (PCA) of environmental factors. Entries are factor loadings, eigenvalues and percentage of variation explained for the four principal components. Large component loadings among four principal components were bolded.

| 环境因子 Environmental factors | 第一主成分 PCA1 | 第二主成分 PCA2 | 第三主成分 PCA3 | 第四主成分 PCA4 |
|--|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 公路等级 Road grade | 0.108 | -0.028 | -0.056 | 0.021 |
| 与公路距离 Distance to roads | -0.029 | 0.129 | -0.153 | -0.487 |
| 样方内是否存在乔木 Presence or absence of trees | 0.029 | -0.006 | -0.046 | -0.113 |
| 坡形 Shape | -0.019 | 0.011 | -0.007 | 0.024 |
| 坡位 Position | 0.099 | -0.151 | 0.086 | -0.461 |
| 坡度 Slope | 0.039 | -0.062 | 0.050 | -0.581 |
| 裸地比例 Bare land percentage | -0.148 | -0.087 | 0.077 | 0.420 |
| 年均温 Mean annual temperature | -0.351 | -0.082 | -0.033 | -0.048 |
| 最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter | -0.349 | -0.112 | -0.032 | -0.042 |
| 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter | -0.353 | -0.022 | -0.029 | -0.054 |
| 年潜在蒸散 Potential evapotranspiration | -0.351 | -0.082 | -0.032 | -0.048 |
| 年降水 Mean annual precipitation | -0.179 | 0.507 | -0.162 | 0.002 |
| 最干季降水 Precipitation of driest quarter | -0.185 | 0.415 | 0.376 | -0.008 |
| 最湿季降水 Precipitation of wettest quarter | -0.116 | 0.323 | -0.611 | 0.019 |
| 年实际蒸散 Actual evapotranspiration | -0.351 | 0.059 | -0.049 | -0.045 |
| 水分亏缺 Water deficit | 0.311 | 0.275 | 0.003 | 0.047 |
| 温度季节性 Temperature seasonality | 0.103 | 0.507 | 0.038 | -0.052 |
| 降水季节性 Precipitation seasonality | 0.164 | -0.211 | -0.637 | 0.055 |
| 特征值 Eigenvalue | 8.288 | 2.662 | 1.578 | 1.203 |
| 解释百分比 Percentage explained (%) | 48.600 | 15.600 | 9.300 | 7.100 |

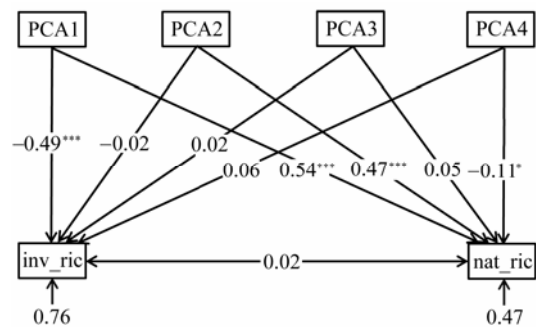


图5 环境因子主成分(PCA1, PCA2, PCA3, PCA4)和乡土种丰富度(nat_ric)对入侵种丰富度(inv_ric)影响的结构方程模型。箭头方向表示因果关系, 数字表示路径相关系数, 方框旁的数字表示模型对变量变异的解释系数, 星号表示相关的显著性水平: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

Fig. 5 A structural equation model showing the multivariate effects on invasive plant richness (inv_ric) by native plant richness (nat_ric) and four principal components (PCA1, PCA2, PCA3, PCA4) of environmental factors. The direction of arrows shows the causal relationships, numbers are standardized path coefficients, accompanied by positive (+) or negative (-) illustrations. The proportion of variation explained by the model is indicated by the number near each textbox. Asterisks imply the level of significance: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

入侵的抵抗性强, 但支持这一观点的证据模棱两可 (Kennedy et al, 2002; Fargione et al, 2003)。干扰被认为是入侵的先导, 但很多未被干扰的群落也存在外来物种入侵 (Lozon & MacIsaac, 1997; Davis et al, 2000)。乡土物种在长期历史过程中已经适应的环境压力可能限制了外来物种的存活和定殖, 但资源可利用性低的栖息地依然受到入侵物种的影响 (Harrison, 1999)。

怒江河谷地区以干热气候为主。能量对入侵和乡土物种丰富度的影响均不显著; 而水分条件, 尤其是最干季降水量的影响非常显著, 显示了干旱对植物分布的限制作用, 且入侵物种对干旱的耐性比乡土物种更低。Baruch和Fernandez (1993)发现一种乡土C₄草本植物对于干旱的耐受性高于另一种入侵C₄草本植物; Hamilton等(1999)也发现, 美国加州南部草地的干旱环境有利于多年生乡土草本物种的萌芽而不利于一年生入侵草本。怒江河谷的乡土植物在长期适应干旱环境的进化过程中变得更加耐旱, 而入侵种由于进化时间较短, 对干旱生境的

适应性较差。对于乡土物种,裸地比例即路侧生境干扰具有最强的胁迫;而样方到公路的距离与入侵物种丰富度显著负相关,这充分显示,在怒江河谷,公路沿线的生境干扰对乡土植物群落的退化和外来物种的迁移入侵具有关键作用。

3.3 群落物种多样性与可入侵性

物种多样性和群落可入侵性之间的关系对入侵植物群落的恢复与管理十分重要,而关于外来入侵物种与乡土物种丰富度之间的关系仍存在争议(Gerhardt & Collinge, 2007; Souza et al, 2011)。支持乡土物种与入侵物种多样性负相关的观点认为,群落生态位空间有限,竞争在群落构建中起主导作用,因此物种丰富的群落利用了大部分资源,为新物种留下的资源较少,从而减少了外来物种入侵的可能性(Palmer & Maurer, 1997; Zeiter & Stampfli, 2012)。且物种丰富的群落含有与外来种性状相似的乡土物种的可能性更高,因而可入侵性更低(Levine & D'Antonio, 1999; Pokorny et al, 2005)。相反的观点认为,群落中存在种间促进(facilitate)效应,如遮阴、菌根供养(Rudgers et al, 2005; Bulleri et al, 2008; Spence et al, 2011),导致物种越丰富的群落能够共存的物种也越多,因而促进外来种入侵。也有观点认为乡土和入侵物种丰富度的关系取决于空间尺度:即当外在干扰程度较轻或中等时,局域尺度的乡土物种丰富度通过种间相互作用,增加了群落对物种入侵的抵抗(Elton, 1958);而在更大的空间尺度上则呈现正相关关系(Levine, 2000; Deutschewitz et al, 2003),这可能与二者在不同尺度上对环境因子的响应有差异相关。

本研究表明,在群落尺度上外来入侵植物与乡土植物的多样性之间存在显著负相关关系($P < 0.001$),特别是乔木层存在的情况下,入侵物种丰富度显著低于只有灌草的样方。这表明局域尺度群落结构完整性可能对生物入侵具有抵抗作用。乔木层是否存在对入侵的影响可能与光资源有关。乔木层下的生境光照强度低,可能抑制了外来植物的竞争力(Watkins et al, 2003, Hansen & Clevenger, 2005);而光照较强的生境如草地、开放林地以及森林边缘等,常伴随高温、裸露土壤等条件,容易被外来植物入侵,并促使外来植物定居后向更远的距离扩散(Parendes & Jones, 2000; Hansen & Clevenger, 2005)。

但是,当我们进一步使用结构方程模型分析入侵和乡土植物对环境因子的响应发现,入侵和乡土植物的丰富度格局对温度、降水、人类干扰和地形等环境因子的响应完全相反,并且在控制了外部环境因子的影响后,二者的关系并不显著。这表明二者丰富度的负相关关系更多是各自对环境约束的响应差异,而非直接竞争排斥的结果。

本文从群落水平对怒江河谷乡土和入侵植物多样性进行研究,发现二者的空间格局显著不同,对环境因子的响应也基本相反。结果支持物种入侵的资源可利用性限制假说,同时强调了人为干扰对生物多样性的负面影响;乡土植物或已较好地适应了干旱河谷气候,但并没有显示出对外来物种入侵的抵抗作用。

参考文献

- Baker HG (1974) The evolution of weeds. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 1–24.
- Baruch Z, Fernandez DS (1993) Water relations of native and introduced C_4 grasses in a neotropical savanna. *Oecologia*, 96, 179–185.
- Brooks ML, D'Antonio CM, Richardson DM, Grace JB, Keeley JE, DiTomaso JM, Hobbs RJ, Pellant M, Pyke D (2004) Effects of invasive alien plants on fire regimes. *BioScience*, 54, 677–688.
- Brutsaert WH (1982) *Evaporation in the atmosphere: theory, history and application*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Bulleri F, Bruno JF, Benedetti-Cecchi L (2008) Beyond competition: incorporating positive interactions between species to predict ecosystem invasibility. *PLoS Biology*, 6, 1136–1140.
- Christian CE (2001) Consequences of a biological invasion reveal the importance of mutualism for plant communities. *Nature*, 413, 635–639.
- Daehler CC (2005) Upper-montane plant invasions in the Hawaiian Islands: patterns and opportunities. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 7, 203–216.
- Davis MA, Grime JP, Thompson K (2000) Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology*, 88, 528–534.
- Deutschewitz K, Lausch A, Kühn I, Klotz S (2003) Native and alien plant species in relation to spatial heterogeneity on a regional scale in Germany. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 299–311.
- Ehrenfeld JG (2003) Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 6, 503–523.
- Ehrenfeld JG (2010) Ecosystem consequences of biological invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41, 59–80.
- Elton CS (1958) *The Ecology of Invasions by Animals and*

- Plants. University of Chicago Press, Chicago.
- Fang JY, Lechowicz MJ (2006) Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus* L.) species in the world. *Journal of Biogeography*, 33, 1804–1819.
- Fang JY, Song YC, Liu HY, Piao SL (2002) Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122.
- Fargione J, Brown CS, Tilman D (2003) Community assembly and invasion: an experimental test of neutral versus niche processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 100, 8916–8920.
- Funk J, Zachary V (2010) Physiological responses to short-term water and light stress in native and invasive plant species in southern California. *Biological Invasions*, 12, 1685–1694.
- Gerhardt F, Collinge SK (2007) Abiotic constraints eclipse biotic resistance in determining invasibility along experimental vernal pool gradients. *Ecological Applications*, 17, 922–933.
- Giorgis MA, Tecco PA, Cingolani AM, Renison D, Marcora P, Paiao V (2011) Factors associated with woody alien species distribution in a newly invaded mountain system of central Argentina. *Biological Invasions*, 13, 1423–1434.
- Grotkopp E, Rejmánek M, Rost TL (2002) Toward a causal explanation of plant invasiveness: seedling growth and life-history strategies of 29 pine (*Pinus*) species. *The American Naturalist*, 159, 396–419.
- Halpern SL, Underwood N (2006) Approaches for testing herbivore effects on plant population dynamics. *Journal of Applied Ecology*, 43, 922–929.
- Hamilton JG, Holzapfel C, Mahall BE (1999) Coexistence and interference between a native perennial grass and non-native annual grasses in California. *Oecologia*, 121, 518–526.
- Hansen MJ, Clevenger AP (2005) The influence of disturbance and habitat on the presence of non-native plant species along transport corridors. *Biological Conservation*, 125, 249–259.
- Harrison S (1999) Native and alien species diversity at the local and regional scales in a grazed California grassland. *Oecologia*, 121, 99–106.
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guégan JF, Kaufman DM, Kerr MJ, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter RE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- Hu FG, Duan CF, Liu GH (2007) Exotic invasive weeds in farmland of dry-hot valley in Yunnan Nujiang region. *Weed Sciences*, (4), 20–23. (in Chinese) [胡发广, 段春芳, 刘光华 (2007) 云南怒江干热河谷农田外来入侵杂草的调查. *杂草科学*, (4), 20–23.]
- Hulme PE, Pyšek P, Jarošík V, Pergl J, Schaffner U, Vila M (2013) Bias and error in understanding plant invasion impacts. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 212–218.
- Kennedy TA, Naeem S, Howe KM, Knops JMH, Tilman D, Reich P (2002) Biodiversity as a barrier to ecological invasion. *Nature*, 417, 636–638.
- Kissling WD, Lord JM, Schnittler M (2006) Agamosperous seed production of the invasive tussock grass *Nardus stricta* L. (Poaceae) in New Zealand: evidence from pollination experiments. *Flora*, 201, 144–151.
- Kueffer C, Pyšek P, Richardson DM (2013) Integrative invasion science: model systems, multi-site studies, focused meta-analysis and invasion syndromes. *New Phytologist*, 200, 615–633.
- Lembrechts JJ, Milbau A, Nijs I (2014) Alien roadside species more easily invade alpine than lowland plant communities in a subarctic mountain ecosystem. *PloS ONE*, 9, e89664.
- Levine JM (2000) Species diversity and biological invasions: relating local process to community pattern. *Science*, 288, 852–854.
- Levine JM, D'Antonio CM (1999) Elton revisited: a review of evidence linking diversity and invasibility. *Oikos*, 1999, 15–26.
- Li H, Bai Y, Yang SH, Zhu X, Zhao K (2009) Prediction of vegetations dynamic changes in central Nujiang watershed based on Markov process mode. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 371–376. (in Chinese with English abstract) [李晖, 白杨, 杨树华, 朱雪, 赵凯 (2009) 基于马尔柯夫模型的怒江流域中段植被动态变化预测. *生态学杂志*, 28, 371–376.]
- Liu J, Dong M, Miao SL, Li ZY, Song MH, Wang RQ (2006) Invasive alien plants in China: role of clonality and geographical origin. *Biological Invasions*, 8, 1461–1470.
- Liu Y (2015) Plant diversity and biogeography of the arid valleys in Southwest China. PhD dissertation, Peking University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晔 (2015) 中国西南干旱河谷的植物多样性地理格局. 博士学位论文, 北京大学, 北京.]
- Liu Y, Shen LF, Wang T, Fang R, Jiang R, Shen ZH (2013) Invasive pattern and influential factors of *Eupatorium adenophorum* along the highway in three parallel rivers region in northwestern Yunnan. *Highway Traffic Science and Technology*, 5, 284–288. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 沈利峰, 王韬, 房锐, 姜睿, 沈泽昊 (2013) 滇西北三江并流地区公路沿线紫茎泽兰的入侵格局及影响因素. *公路交通科技*, 5, 284–288.]
- Lomolino MV (2001) Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecological Biogeography*, 10, 3–13.
- Lozon JD, MacIssac HJ (1997) Biological invasions: are they dependent on disturbance? *Environmental Reviews*, 5, 131–144.
- Lu P, Sang WG, Ma KP (2005) Progress and prospects in research of exotic invasive species, *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 1029–1037. (in Chinese with English abstract) [鲁萍, 桑卫国, 马克平 (2005) 外来入侵种紫茎泽兰研究进展与展望. *植物生态学报*, 29, 1029–1037.]
- Lu ZJ, Ma KP (2004) The influence of topographical factors on

- the invasion of the alien species, *Eupatorium adenophorum*. Acta Phytocologica Sinica, 28, 761–767. (in Chinese with English abstract) [卢志军, 马克平 (2004) 地形因素对外来入侵种紫茎泽兰的影响. 植物生态学报, 28, 761–767.]
- Lu ZJ, Ma KP (2005) Scale dependent relationships between native plant diversity and the invasion of croftonweed (*Eupatorium adenophorum*) in Southwest China. Weed Science, 53, 600–604.
- Nally RM (2002) Multiple regression and inference in ecology and conservation biology: further comments on identifying important predictor variables. Biodiversity and Conservation, 11, 1397–1401.
- Marini L, Battisti A, Bona E, Federici G, Martini F, Pautasso M, Hulme PE (2012) Alien and native plant life-forms respond differently to human and climate pressures. Global Ecology and Biogeography, 21, 534–544.
- Matzek V (2011) Superior performance and nutrient-use efficiency of invasive plants over non-invasive congeners in a resource-limited environment. Biological Invasions, 13, 3005–3014.
- Mooney HA, Hobbs RJ (2000) Invasive Species in a Changing World. Island Press, Washington, DC.
- Palmer MW, Maurer TA (1997) Does diversity beget diversity? A case study of crops and weeds. Journal of Vegetation Science, 8, 235–240.
- Parendes LA, Jones JA (2000) Role of light availability and dispersal in exotic plant invasion along roads and streams in the H. J. Andrews experimental forest, Oregon. Conservation Biology, 14, 64–75.
- Pimentel D, Lach L, Zuniga R, Morrison D (2000) Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. BioScience, 50, 53–65.
- Pokorny ML, Sheley RL, Zabinski CA, Engel RE, Svejcar TJ, Borkowski JJ (2005) Plant functional group diversity as a mechanism for invasion resistance. Restoration Ecology, 13, 448–459.
- Rahbek C (1995) The elevational gradient of species richness: a uniform pattern? Ecography, 18, 200–205.
- Rudgers JA, Mattingly WB, Koslow JM (2005) Mutualistic fungus promotes plant invasion into diverse communities. Oecologia, 144, 463–471.
- Souza L, Bunn WA, Simberloff D, Lawton RM, Sanders NJ (2011) Biotic and abiotic influences on native and exotic richness relationship across spatial scales: favourable environments for native species are highly invasible. Functional Ecology, 25, 1106–1112.
- Spence LA, Dickie IA, Coomes DA (2011) Arbuscular mycorrhizal inoculum potential: a mechanism promoting positive diversity–invasibility relationships in mountain beech forests in New Zealand? Mycorrhiza, 21, 309–314.
- Stephenson NJ (1990) Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. The American Naturalist, 135, 649–670.
- Stevens GC (1992) The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. The American Naturalist, 140, 893–911.
- Thorntwaite CW, Hare FK (1955) Climatic classification in forestry. Unasylva, 9, 51–59.
- Toledo M, Poorter L, Pena-Claros M, Alarcon A, Balcazar J, Leano C, Licona JC, Llanque O, Vroomans V, Zuidema P, Bongers F (2011) Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. Journal of Ecology, 99, 254–264.
- van Kleunen MV, Weber E, Fischer M (2010) A meta-analysis of trait differences between invasive and non-invasive plant species. Ecology Letters, 13, 235–245.
- Vilà M, Espinar JL, Hejda M, Hulme PE, Jarošík V, Maron JL, Pergl J, Schaffner U, Sun Y, Pyšek P (2011) Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. Ecology Letters, 14, 702–708.
- Wang DN (2012) Prevention and control situation and the countermeasures of exotic invasive species *Mikania micrantha*. Yunnan Agricultural Science and Technology, Suppl.1, 235–236. (in Chinese) [王大能 (2012) 西盟县外来入侵有害生物薇甘菊防控现状及对策. 云南农业科技, 增刊1, 235–236.]
- Watkins RZ, Chen JQ, Pickens J, Brosfoske KD (2003) Effects of forest roads on understory plants in a managed hardwood landscape. Conservation Biology, 17, 411–419.
- Yunnan Province Three Parallel Rivers Administration Bureau (2010) An overview of the world natural heritage “Three Parallel Rivers” and the protection progress. Chinese Landscape Architecture, 26(5), 52–55. (in Chinese with English abstract) [云南省三江并流管理局 (2010) 世界自然遗产地——“三江并流”的概况及其保护工作的进展. 中国园林, 26(5), 52–55.]
- Zeiter M, Stampfli A (2012) Positive diversity-invasibility relationship in species-rich semi-natural grassland at the neighbourhood scale. Annals of Botany, 110, 1385–1393.
- Zheng L, Feng YL (2005) The effects of ecophysiological traits on carbon gain in invasive plants. Acta Ecologica Sinica, 25, 2782–2787. (in Chinese with English abstract) [郑丽, 冯玉龙 (2005) 入侵植物的生理生态特性对碳积累的影响. 生态学报, 25, 2782–2787.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠)

• 研究报告 •

地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落beta多样性的影响

李新辉^{1,2} 刘延虹^{1,2} 刘 晔³ 许 玥⁴ 杨 阳⁴ 沈泽昊^{4*}

1 (西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224)

2 (云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南玉溪 653400)

3 (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)

4 (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: beta多样性反映了群落间物种组成的差异, 是生物多样性研究的热点之一。本研究通过对云南元江干热河谷41个植物群落样方进行调查, 用Jaccard相异系数表征物种beta多样性, 用样方之间的最近谱系距离(mean nearest taxon distance, MNTD)及平均谱系距离(mean pairwise distance, MPD)表征谱系beta多样性, 采用基于距离矩阵的多元回归和方差分解方法, 探讨了该区域干热河谷典型植物群落的物种beta多样性和谱系beta多样性与样方间环境差异(主要是气候)及地理距离之间的关系。结果表明: (1)群落间的地理距离和年平均温度差异对干热河谷植物群落的物种beta多样性和谱系beta多样性有显著影响; (2)地理距离对物种beta多样性和MNTD的影响最大; 地理距离和年平均温度差异对MPD的影响均较大; (3)样方间年平均温度与年平均降水量的差异和地理距离能够解释群落间beta多样性及谱系beta多样性11–13%的变异。以上结果表明, 生态位分化和扩散限制对该地区植物群落的beta多样性均有显著影响, 其中扩散限制的影响可能更大。此外, 人类活动等其他因素也很可能对元江干热河谷的群落组成具有非常重要的影响。

关键词: 群落构建; 谱系beta多样性; 生态位; 扩散限制; 人类干扰

Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River

Xinhui Li^{1,2}, Yanhong Liu^{1,2}, Ye Liu³, Yue Xu⁴, Yang Yang⁴, Zehao Shen^{4*}

1 College of Environmental Science and Technology, Southwest China Forestry University, Kunming 650224

2 National Station for Forest Ecosystem in Yuxi, Yuxi, Yunnan 653400

3 School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055

4 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Beta diversity is the difference in species composition between locations. Recently, much of the published biodiversity research has focused on the assessment of beta diversity because it can be used to investigate community assembly and maintenance of species diversity. In this study, we investigated the impacts of dispersal limitation and habitat on the beta diversity of communities by sampling 41 plots throughout the dry-hot valley of Yuanjiang River. Taxonomic beta diversity and phylogenetic beta diversity were quantified using Jaccard dissimilarity, mean nearest taxon distance (MNTD), and mean pairwise distance (MPD). These indices were then related to the differences in environmental characteristics between sample plots and the geographical distances separating sample plots using multiple regression on distance matrices (MRM) and variance partitioning. The results showed that taxonomic and phylogenetic beta diversity indices significantly increased with the spatial distance and difference in mean annual temperature between communities;

收稿日期: 2015-09-14; 接受日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)、交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)和云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

that taxonomic beta diversity and MNTD were most strongly influenced by spatial distance, whereas MPD was equally influenced by spatial distance and mean annual temperature difference between communities; and that only 11–13% of the variance in beta diversity was explained by the spatial distance and mean annual temperature difference between communities. These results highlight the effects of niche and dispersal limitations on beta diversity, and suggest that dispersal limitation may play a greater role than habitat differences between plant community locations. Additionally, human disturbances may greatly impact species composition along the dry-hot valley of the Yuanjiang River.

Key words: community assembly; phylogenetic beta diversity; niche; dispersal limitation; human disturbances

beta多样性主要用来量度群落物种组成的变化(Whittaker, 1960); 同时, 它还可以反映群落的构建过程, 是生物多样性研究的焦点之一。beta多样性的形成和维持机制是生态学家关心的问题之一(陈圣宾等, 2010; Qian et al, 2013)。

对beta多样性形成和维持机制认识的分歧主要集中在生态位理论和中性理论。生态位理论认为物种都有各自适应的环境, 即生态位, 在不同的环境里分别存在适应的物种, 环境差异越大, 物种组成的差异就越大, 也就是说环境因子能较好地解释beta多样性格局, 这一理论得到很多研究支持(Tuomisto et al, 1995; Valencia et al, 2004; Fernandez-Going et al, 2013)。中性理论认为群落内的物种具有相同的竞争能力、出生率和死亡率, 由扩散限制能产生相似度随地理距离增加而减小的格局, 即地理距离能很好地解释beta多样性, 这一理论同样也得到了许多研究的支持(Qian, 2009; de Cáceres et al, 2012)。也有研究认为, beta多样性的形成和维持可能不是单一过程的作用, 而是生态位和扩散限制共同作用的结果, 只是在不同类群或者尺度上其相对重要性可能有所不同(Harrison et al, 1992; Tuomisto et al, 2003; Bin et al, 2010; Bellier et al, 2014)。

经典的群落beta多样性指标并不考虑物种间的亲缘关系。随着分子生物学的发展, 使用DNA序列构建进化关系来研究群落结构变化成为可能, 而且这种方法可以更准确地反映物种间的亲缘关系及群落之间物种组成亲缘关系的变化(Graham & Fine, 2008; Swenson, 2011)。从亲缘关系上讲, 两个物种组成完全不同的区域, 却可能会在谱系beta多样性上相近。比如东亚和北美温带树木区系中共有种很少, 物种beta多样性非常高, 但很多树种都是近缘种(Qian, 2001), 故谱系beta多样性可更确切地反映这两个地区温带树木区系之间实际较近的区系联

系。不同对象(如区域种库、植物群落)之间的谱系beta多样性研究有助于揭示群落构建的主导因素和物种多样性的形成与维持机制(Graham & Fine, 2008)。

元江干热河谷地区的植被被称为“稀树草原植被”(吴征镒, 1980), 也可称之为“半萨王纳植被”(金振洲, 1999)。“半萨王纳植被”是萨王纳植被在干热河谷中的残存, 是我国一类珍稀濒危植被类型(金振洲, 2002)。目前该区域的研究主要集中在植被调查和区系分析等方面, 对河谷植物群落尤其是群落结构形成和维持机制方面的研究还比较缺乏, 而利用谱系多样性研究干热河谷群落结构也未见报道。

本研究通过分析元江干热河谷地区植物群落beta多样性和谱系beta多样性的格局及其影响因素, 定量评价样方之间年平均降水量及年平均温度的差异和地理距离与植物群落beta多样性的关系, 探讨该区域典型植物群落构建的主导因素, 以期深入理解这一特殊生境下植物对环境的适应及生物多样性的维持机制。

1 方法

1.1 研究区概况

元江河谷位于横断山区东南缘、云南高原中南部, 属高山峡谷地貌。元江干热河谷起点曼耗镇的海拔为200 m左右, 在上游可达到1,000 m以上(金振洲, 2002)。本区西南侧有与元江平行的哀牢山脉和无量山脉, 山脉屏障峰线在海拔3,000 m左右, 有效地阻挡了来自印度洋的西南暖湿气流; 东北侧有云贵高原, 对来自太平洋的东南暖湿气流也有较大阻挡。河谷内盛行下沉气流, 气流在坡后下沉过程中升温快, 导致同一海拔的坡后温度较高, 而降水较少, 形成干热或者干暖河谷。据统计, 本区域的蒸

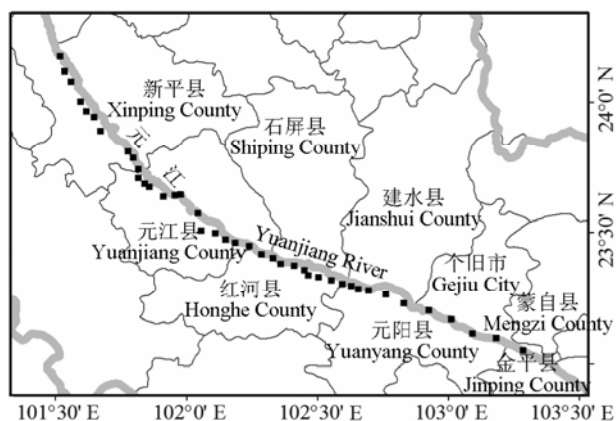


图1 云南元江干热河谷41个样方的地理分布

Fig. 1 Distribution of 41 sample sites along the dry-hot valley of the Yuanjiang River in Yunnan Province

发量往往是降水量的3倍以上, 年平均温度接近24℃(金振洲, 2002)。

本区近代植物区系以及植被的形成与河谷地史变迁过程中古植物和古植被的演变有关, 而且该地开发早, 人为干扰也有较大影响(金振洲, 2002)。本区植被在外貌和结构上为“稀树灌木草丛”状3层或“灌木草丛”状2层; 种类组成上多为热带性质耐干旱的种类, 比如草本以黄茅(*Heteropogon contortus*)、双花草(*Dichanthium annulatum*)等为主, 乔灌木如豆腐果(*Buchanania latifolia*)、三叶漆(*Terminthia paniculata*)等常见(金振洲, 2002)。

1.2 样地设置与取样

根据环境和植被状况等特征, 从曼耗镇开始, 沿元江流域干热河谷设置41个10 m × 10 m的样方(图1), 样方涵盖了元江流域干热河谷的典型地段(元阳县、红河县和元江县等)。为了尽量减少公路和人为因素的影响, 设置样方时尽量远离公路50 m以外。在每个样方内详细记录观察到的所有维管植物物种, 同时测定每个样方的海拔、经纬度和植被盖度等。据统计, 41个样方中共出现维管植物171种, 属于50科137属。

1.3 数据分析

基于Zanne等(2014)的进化树, 利用Phyloomatic软件(Webb & Donoghue, 2005)直接生成有支长的进化树(图2)。利用picante程序包(Kembel et al, 2010)计算样地之间的谱系beta多样性指数, 即最近谱系距离(mean nearest taxon distance, MNTD)及平均谱

系距离(mean pairwise distance, MPD) (Webb et al, 2008)。物种beta多样性(Jaccard相异性指数)用vegan程序包(Oksanen et al, 2013)计算。计算公式如下:

$$\text{MNTD} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{n_a} f_i \text{mind}_{ib} + \sum_{j=1}^{n_b} f_j \text{mind}_{ja} \right) \quad (1)$$

$$\text{MPD} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{n_a} f_i \overline{d}_{ib} + \sum_{j=1}^{n_b} f_j \overline{d}_{ja} \right) \quad (2)$$

$$\text{Jaccard相异性指数} = (A + B - 2 \times C) / (A + B - C) \quad (3)$$

式中, A为样方a的物种数; B为样方b的物种数; C为样方a和b的共有种数目; 物种*i* ≠ 物种*j*, 其中 \overline{d}_{ib} 表示样方a中物种*i*与样方b中所有物种的平均成对系统发育距离; n_a 表示样方a中的物种数目; f_i 表示在样方a中物种*i*的相对多度; mind_{ib} 表示样方a中的物种*i*与样方b中所有物种的最近系统发育距离; 其他符号意义类推。MPD反映不同类群在系统发育树上靠近根结点的聚集程度, MNTD则表示不同类群在靠近末端分支上的汇聚程度(Webb, 2000)。

为了探讨植物群落与环境因子(以年平均温度和降水量为代表)之间的关系, 从WorldClim v1.4 (Hijmans et al, 2005)数据库中获得各个点的年平均温度和年平均降水量。环境因子之间的差异基于各样方年平均温度、年平均降水量数据分别获得, 并运用R软件的fossil软件包(Vavrek, 2011)通过GPS坐标点计算各样方之间的地理距离。将各样方之间的地理距离、年平均温度差异和年平均降水量差异作为解释变量对beta多样性进行多元回归分析。

在分析beta多样性与地理距离和环境因子差异的关系时, 首先进行空间自相关检验, 发现本研究数据没有显著的空间自相关关系(Moran's $I = 0.013$, $P = 0.326$), 故直接采用基于距离矩阵的多元回归分析方法(multiple regression on distance matrices, MRM, Lichstein, 2007)。该方法实际上是Mantel检验的一种延伸, 可用来研究独立因子间的解释能力, 而且已被广泛应用于beta多样性研究(Kubota et al, 2011; Burrascano et al, 2013; Olivier & van Aarde, 2014)。MRM分析用R软件中的ecodist软件包(Goslee & Urban, 2007)实现。

为了探讨地理距离、年平均降水量和年平均温度差异对beta多样性的解释程度, 采用vegan软件包

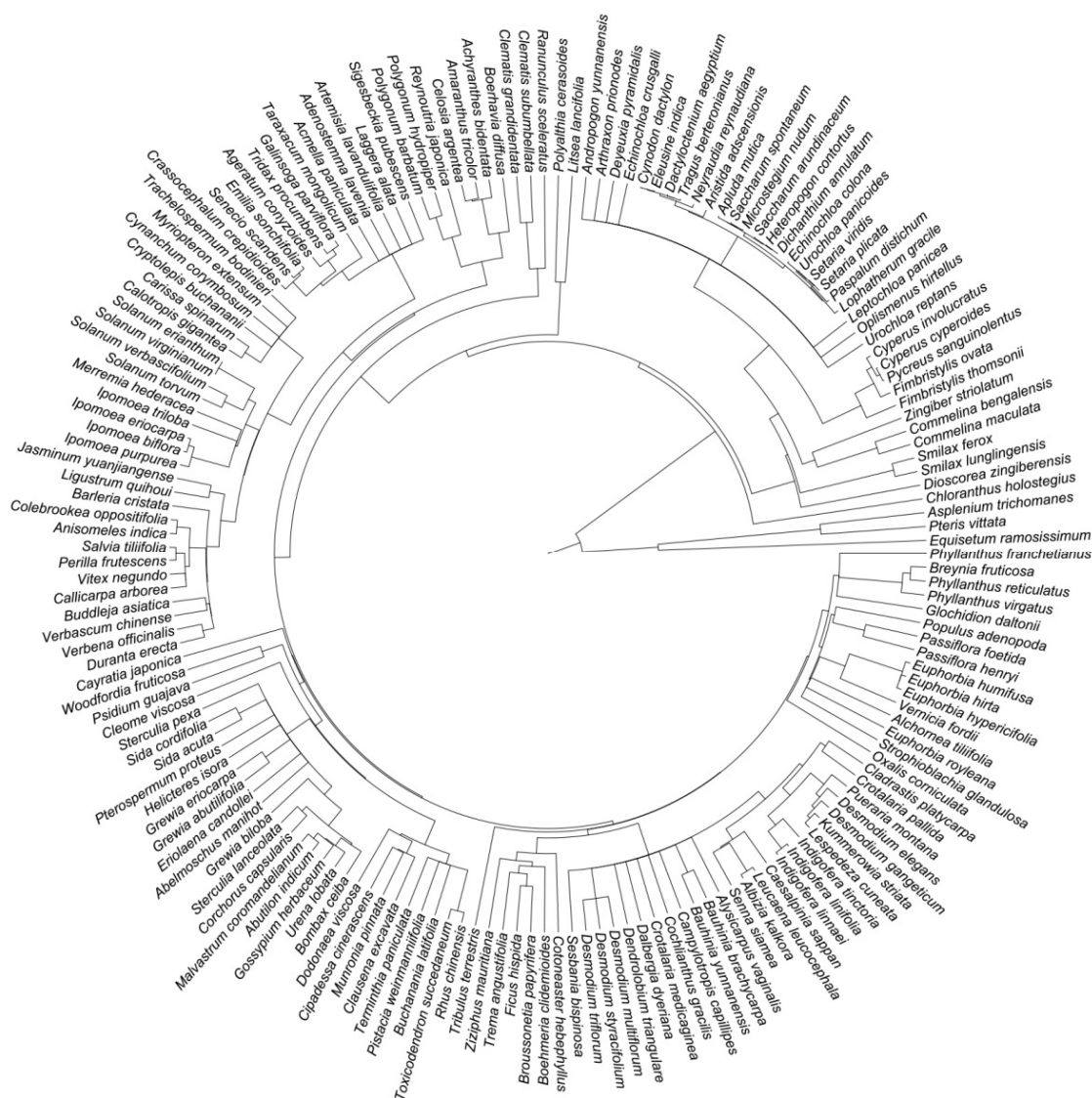


图2 元江干热河谷样方内有支长的植物系统进化树。基于Zanne等(2014)系统树作图。

Fig. 2 Phylogenetic tree with branch lengths for the sample plants in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. Based on the phylogenetic tree of Zanne et al (2014).

中的varpart函数分析这些因素对beta多样性的相对解释量。各因素的相对解释量用RDA分析的校正 R^2 衡量(Peres-Neto et al, 2006; Oksanen et al, 2013)。

2 结果

元江干热河谷维管植物的物种beta多样性与年平均温度差异、年平均降水量差异以及样方之间的地理距离均呈显著线性关系, 这3个因子差异越大, 样方之间的物种差异也越大(图3)。其中, 物种差异与样方之间地理距离的线性关系最强(图3C), 而与

年平均降水量差异的线性关系最弱(图3B)。谱系beta多样性(MNTD、MPD)与年平均温度差异和样方之间地理距离呈显著的线性关系, 随着年平均温度差异和样方之间地理距离的增加, 样方之间植物的谱系距离也增加, 即亲缘关系越来越远(图3D, F, G, I); 而与年平均降水量差异没有显著的线性关系(图3E, H)。

年平均温度差异、年平均降水量差异以及样方之间的地理距离这3个因子对各个beta多样性指数的解释能力不同。对物种beta多样性和MNTD来讲,

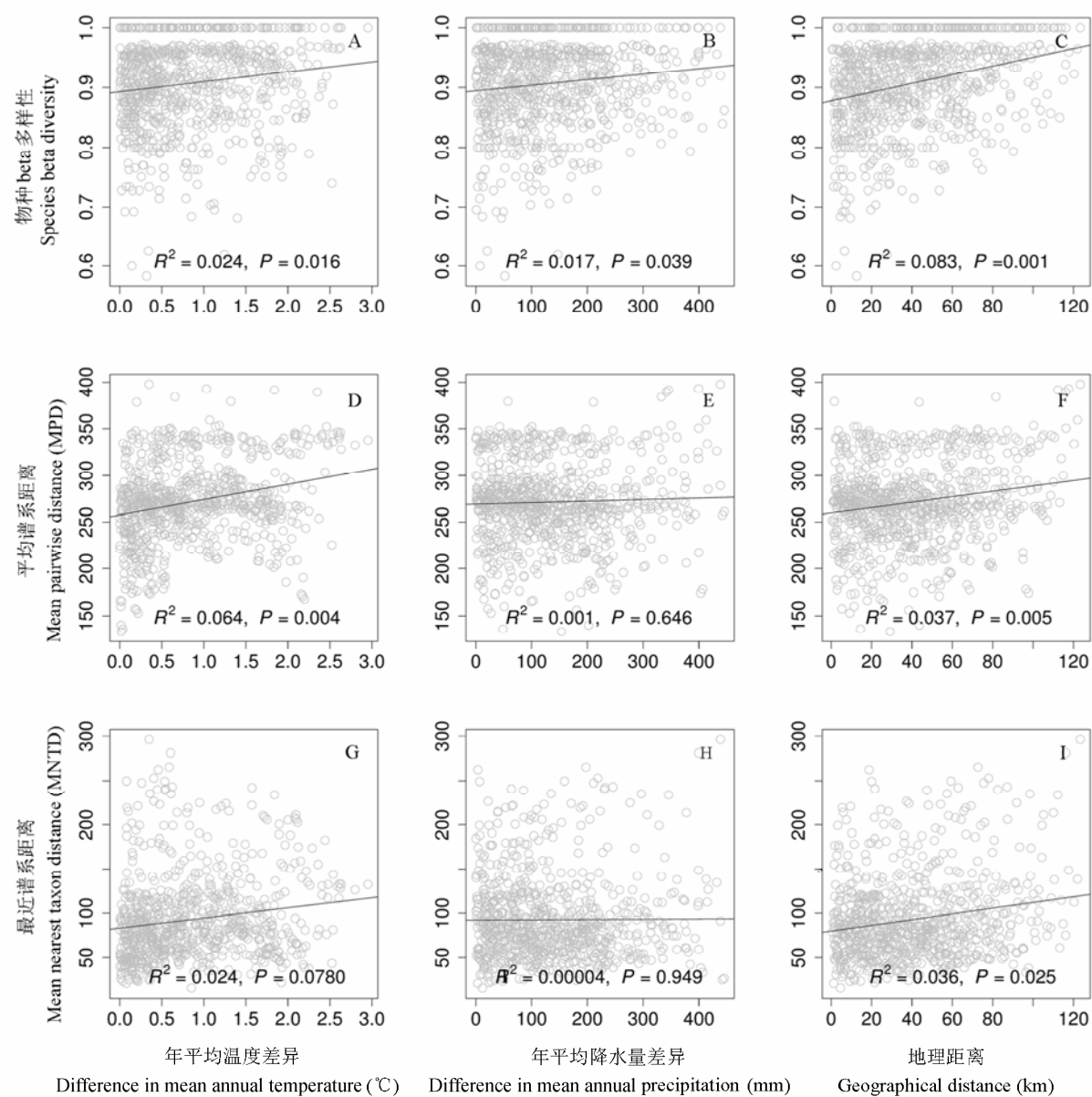


图3 β 多样性与年平均温度差异、年平均降水量差异及样方之间地理距离的关系
Fig. 3 Relationships between beta diversity and the differences in mean annual temperature, mean annual precipitation and geographical distance in sample sites

最重要的因子是样方之间的地理距离, 其他因子的重要性较小; 而对于MPD来说, 年平均温度差异和样方之间地理距离的作用都比较重要(图4)。

年平均温度差异、年平均降水量差异和样方之间地理距离对各 β 多样性指数总的解释量均较小, 在11–13%之间(图4)。

3 讨论

物种 β 多样性可度量不同时间或地理区域之

间物种组成的变化, 是研究群落结构以及影响物种组成变化因子的重要指标(Condit et al, 2002; Swenson et al, 2006; Kraft et al, 2008; Svenning et al, 2011)。本文运用元江干热河谷的41个植被样方调查数据, 从物种和谱系 β 多样性的角度, 结合影响因子的方差分解分析研究了温度差异、降水差异及地理距离对元江干热河谷群落构建的影响。因为谱系结构会受到物种库大小的影响(Swenson et al, 2006), 为此在研究群落的谱系关系时, 至少要包括

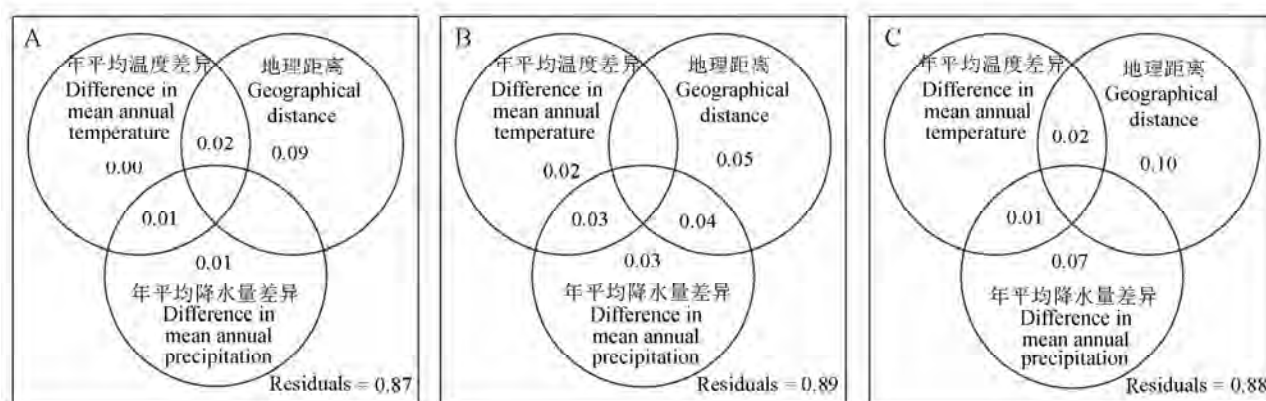


图4 年平均温度差异、年平均降水量差异和样方之间地理距离对beta多样性的解释比例(< 0的值未显示)。A: 物种beta多样性; B: 平均谱系距离; C: 最近谱系距离。

Fig. 4 Percentage of variance of beta diversity across 41 plots explained by the differences in mean annual temperature, mean annual precipitation, and geographical distance in sample sites (Values < 0 not shown). A, Jaccard dissimilarity; B, Mean pairwise distance; C, Mean nearest taxon distance.

群落内所有物种作为小空间尺度物种库(牛红玉等, 2011), 故本文将出现在样方内的所有维管植物作为该研究的物种库。

研究发现, 对物种beta多样性和MNTD来说, 样方之间地理距离的解释能力最强; 而对MPD来说, 样方之间地理距离和年平均温度差异都比较大。物种beta多样性与距离因素往往具有显著的关系, 这在其他研究中已得到验证(Qian, 2009; de Cáceres et al, 2012)。在本研究中, 植物的聚集分布是造成物种beta多样性和谱系beta多样性与地理距离呈现显著线性关系的重要原因(几种典型植物分布见附录1)。

此外, 距离因素对MNTD的影响比对MPD的影响更强, 这一点已得到一些研究的验证和支持(Zhang et al, 2013)。这是因为MPD主要表现的是物种间在靠近根结点分支的差异, 反映了群落对生境利用的不同, 而MNTD主要表现了物种间最近谱系距离即物种间在谱系树末端分支的差异, 反映了群落物种资源利用方面的微小分异。尽管本文的研究区均在干热河谷中, 生境较为一致, 但各个样方之间可能还存在资源等方面的较大不同, 这导致了距离差异对MNTD的影响较大。

另外, 人为干扰、地形、土壤等未知因素也会对beta多样性产生影响。当同时考虑这些因素时, 不论是对物种beta多样性还是谱系beta多样性来说, 地理距离、年平均温度以及年平均降水量差异这3

个指标都只能解释不超过13%的方差(图4)。说明除了这3种因素之外, 其他因素的影响比较大。比如研究区域具有高度相似的植被, 平均温度和降水量差异本身就很小, 都会导致其解释力比较有限; 另一方面, 元江干热河谷段开发时间较早, 受人为干扰较强(吴征镒, 1980; 金振洲, 1999; 何永彬等, 2000), 物种的引进和交流较为频繁, 造成这一河谷段物种相互传播较快, 削弱了距离因素、年平均温度和年平均降水量对群落组成的影响。由于在人为干扰强烈的区域, 人们可以通过水利设施来改变原本的降水时空分布, 进而使原来的自然降水格局产生变化, 尽管大尺度上的自然植被不会有明显的改变, 但具体到小样方, 其物种组成会发生一定的变化, 导致天然降水格局的影响减弱, 这很可能也是导致降水的影响不如其他因子显著的原因。有研究表明, 人类活动会导致群落的均质化(陈国奇和强胜, 2011; Dornelas et al, 2014)和降低自然气候因子对群落格局的影响程度, 这与我们的研究结果较一致。我们的样方主要分布在沿河公路旁边, 尽管已尽量地远离公路, 但公路和其他人为因素的影响很可能还是比较大。

本研究采用的是基于Zanne等(2014)的进化树, 利用PhyloMatic软件(Webb & Donoghue, 2005)直接生成的具有支长的系统进化树。Zanne等(2014)的进化树整合了该文章发表之前GeneBank上的DNA标记序列, 比Wikström等(2001)基于APG III结合分化

时间生成的进化树更准确。同时元江干热河谷样方中出现的科下或属下单位较少, 所以基于我们所采用的系统树在科下单位不会有太多的多分支结构, 对结果的影响不会太大。

我们的研究表明, 以距离表征的扩散因素和以环境因子表征的生态位因素共同对群落物种组成起作用, 并且距离因素的作用更强; 但由于距离也可能代表了没有测量的生境因子(Smith & Lundholm, 2010), 故仅能推测扩散因素对群落的物种组成和维持可能更重要。研究尺度以及类群等也会对研究结果有一定影响(Cavender-Bares et al, 2006; 陈圣宾等, 2010; Qian & Kissling, 2010; Zhang et al, 2013), 我们的调查样方仅限于元江干热河谷, 是否其他干热河谷也表现出如此的 β 多样性格局? 还需要更进一步的研究。

参考文献

- Bellier E, Grotan V, Engen S, Schartau AK, Herfindal I, Finstad AG (2014) Distance decay of similarity, effects of environmental noise and ecological heterogeneity among species in the spatio-temporal dynamics of a dispersal-limited community. *Ecography*, 37, 172–182.
- Bin Y, Wang ZG, Wang ZM, Ye WH, Cao HL, Lian JY (2010) The effects of dispersal limitation and topographic heterogeneity on β diversity and phylobetadiversity in a subtropical forest. *Plant Ecology*, 209, 237–256.
- Burrascano S, Anzellotti I, Carli E, del Vico E, Facioni L, Pretto F, Sabatini FM, Tilia A, Blasi C (2013) Drivers of β -diversity variation in *Bromus erectus* semi-natural dry grasslands. *Applied Vegetation Science*, 16, 404–416.
- Cavender-Bares J, Keen A, Miles B (2006) Phylogenetic structure of Floridian plant communities depends on taxonomic and spatial scale. *Ecology*, 87, S109–S122.
- Chen GQ, Qiang S (2011) Human activities are the principle cause of biotic homogenization. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 4107–4116. (in Chinese with English abstract) [陈国奇, 强胜 (2011) 人类活动是导致生物均质化的主要因素. 生态学报, 31, 4107–4116.]
- Chen SB, Ouyang ZY, Xu WH, Xiao Y (2010) A review of β diversity studies. *Biodiversity Science*, 18, 323–335. (in Chinese with English abstract) [陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 肖隸 (2010) β 多样性研究进展. 生物多样性, 18, 323–335.]
- Condit R, Pitman N, Leigh EG, Chave J, Terborgh J, Foster RB, Nunez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau HC, Losos E, Hubbell SP (2002) β -diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666–669.
- de Cáceres M, Legendre P, Valencia R, Cao M, Chang LW, Chuyong G, Condit R, Hao ZQ, Hsieh CF, Hubbell S, Kenfack D, Ma KP, Mi XC, Noor MNS, Kassim AR, Ren HB, Su SH, Sun IF, Thomas DC, Ye WH, He FL (2012) The variation of tree β diversity across a global network of forest plots. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1191–1202.
- Dornelas M, Gotelli NJ, McGill B, Shimadzu H, Moyes F, Sievers C, Magurran AE (2014) Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss. *Science*, 344, 296–299.
- Fernandez-Goñi BM, Harrison SP, Anacker BL, Safford HD (2013) Climate interacts with soil to produce β diversity in Californian plant communities. *Ecology*, 94, 2007–2018.
- Goslee SC, Urban DL (2007) The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software*, 22, 1–19.
- Graham CH, Fine PVA (2008) Phylogenetic β diversity: linking ecological and evolutionary processes across space in time. *Ecology Letters*, 11, 1265–1277.
- Harrison S, Ross SJ, Lawton JH (1992) β diversity on geographic gradients in Britain. *Journal of Animal Ecology*, 61, 151–158.
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22(5), 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山-云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科学, 22(5), 69–72.]
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Jin ZZ (1999) A phytosociological study on the semi-savanna vegetation in the dry-hot valleys of Yuanjiang River, Yunnan. *Guihaia*, 19, 289–302. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究. 广西植物, 19, 289–302.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Kembel SW, Cowan PD, Helmus MR, Cornwell WK, Morlon H, Ackerly DD, Blomberg SP, Webb CO (2010) Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology. *Bioinformatics*, 26, 1463–1464.
- Kraft NJB, Valencia R, Ackerly DD (2008) Functional traits and niche-based tree community assembly in an Amazonian forest. *Science*, 322, 580–582.
- Kubota Y, Hirao T, Fujii SJ, Murakami M (2011) Phylogenetic β diversity reveals historical effects in the assemblage of the tree floras of the Ryukyu Archipelago. *Journal of Biogeography*, 38, 1006–1008.
- Lichstein JW (2007) Multiple regression on distance matrices: a multivariate spatial analysis tool. *Plant Ecology*, 188, 117–131.
- Niu HY, Wang ZF, Lian JY, Ye WH, Shen H (2011) New progress in community assembly: community phylogenetic

- structure combining evolution and ecology. *Biodiversity Science*, 19, 275–283. (in Chinese with English abstract) [牛红玉, 王峥峰, 练琚愉, 叶万辉, 沈浩 (2011) 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. 生物多样性, 19, 275–283.]
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Henry M, Stevens H, Wagner H (2013) *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.0-10. <http://cran.r-project.org/web/packages/vegan> (accessed 2015-08-15)
- Olivier PI, van Aarde RJ (2014) Multi-scale sampling boosts inferences from beta diversity patterns in coastal forests of South Africa. *Journal of Biogeography*, 41, 1428–1439.
- Peres-Neto PR, Legendre P, Dray S, Borcard D (2006) Variation partitioning of species data matrices, estimation and comparison of fractions. *Ecology*, 87, 2614–2625.
- Qian H (2001) A comparison of generic endemism of vascular plants between East Asia and North America. *International Journal of Plant Sciences*, 162, 191–199.
- Qian H (2009) Beta diversity in relation to dispersal ability for vascular plants in North America. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 327–332.
- Qian H, Kissling WD (2010) Spatial scale and cross-taxon congruence of terrestrial vertebrate and vascular plant species richness in China. *Ecology*, 91, 1172–1183.
- Qian H, Swenson NG, Zhang J (2013) Phylogenetic beta diversity of angiosperms in North America. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 1152–1161.
- Smith TW, Lundholm JT (2010) Variation partitioning as a tool to distinguish between niche and neutral processes. *Ecography*, 33, 648–655.
- Svenning JC, Flojgaard C, Baselga A (2011) Climate, history and neutrality as drivers of mammal beta diversity in Europe: insights from multiscale deconstruction. *Journal of Animal Ecology*, 80, 393–402.
- Swenson NG (2011) Phylogenetic beta diversity metrics, trait evolution and inferring the functional beta diversity of communities. *PLoS ONE*, 6, e21264.
- Swenson NG, Enquist BJ, Pither J, Thompson J, Zimmerman JK (2006) The problem and promise of scale dependency in community phylogenetics. *Ecology*, 87, 2418–2424.
- Tuomisto H, Ruokolainen K, Kalliola R, Linna A, Danjoy W, Rodriguez Z (1995) Dissecting Amazonian biodiversity. *Science*, 269, 63–66.
- Tuomisto H, Ruokolainen K, Yli-Halla M (2003) Dispersal, environment, and floristic variation of western Amazonian forests. *Science*, 299, 241–244.
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC, Hernandez C, Romoleroux K, Losos E, Magard E, Balslev H (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.
- Vavrek MJ (2011) Fossil: palaeoecological and palaeogeographical analysis tools. *Palaeontologia Electronica*, 14, http://palaeo-electronica.org/2011_1/238/index.html.
- Webb CO (2000) Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: an example for rain forest trees. *The American Naturalist*, 156, 145–155.
- Webb CO, Ackerly DD, Kembel SW (2008) Phylocom: software for the analysis of phylogenetic community structure and trait evolution. *Bioinformatics*, 24, 2098–2100.
- Webb CO, Donoghue MJ (2005) *Phylocom: tree assembly for applied phylogenetics*. *Molecular Ecology Notes*, 5, 181–183.
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338.
- Wikström N, Savolainen V, Chase MW (2001) Evolution of the angiosperms: calibrating the family tree. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268, 2211–2220.
- WuZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Zanne AE, Tank DC, Cornwell WK, Eastman JM, Smith SA, FitzJohn RG, McGlinn DJ, O'Meara BC, Moles AT, Reich PB, Royer DL, Soltis DE, Stevens PF, Westoby M, Wright IJ, Aarssen L, Bertin RI, Calaminus A, Govaerts R, Hemmings F, Leishman MR, Oleksyn J, Soltis PS, Swenson NG, Warman L, Beaulieu JM (2014) Three keys to the radiation of angiosperms into freezing environments. *Nature*, 506, 89–92.
- Zhang JL, Swenson NG, Chen SB, Liu XJ, Li ZS, Huang JH, Mi XC, Ma KP (2013) Phylogenetic beta diversity in tropical forests: implications for the roles of geographical and environmental distance. *Journal of Systematics and Evolution*, 51, 71–85.

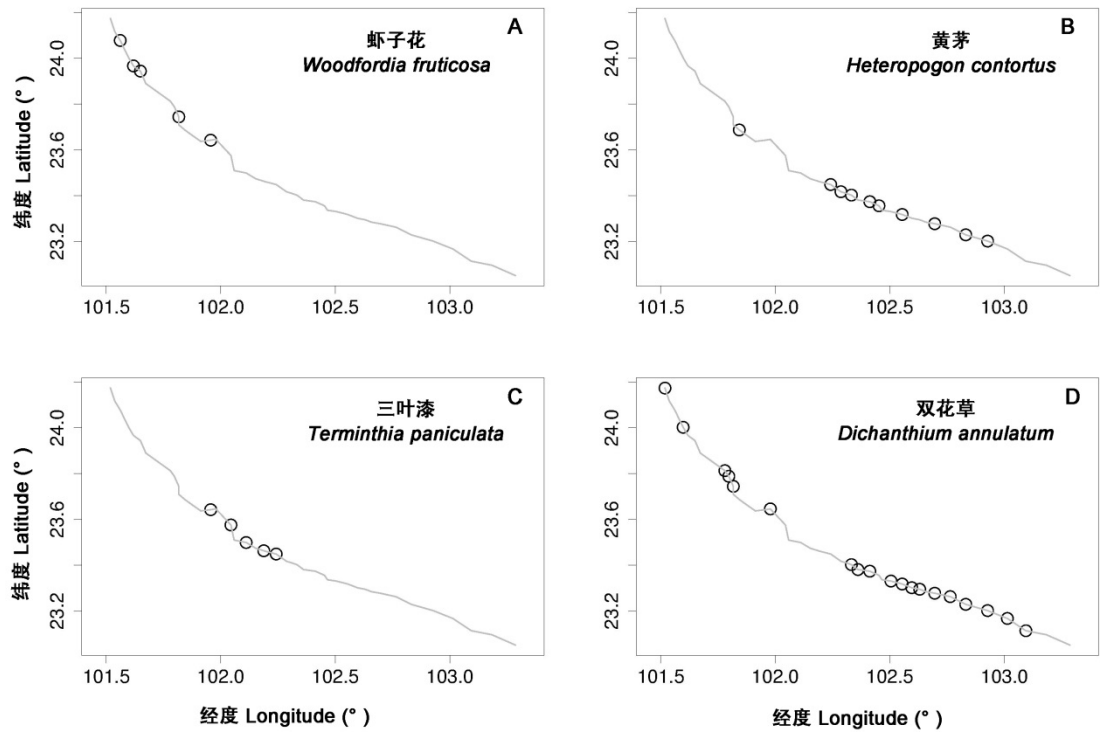
(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 样方内4种典型植物的分布

Appendix 1 Distribution of four typical plant in the sample sites

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015245-1.pdf>



附录1 样方内4种典型植物的分布
Appendix 1 Distribution of four typical plant species in the sample sites

• 研究报告 •

金沙江干旱河谷植物群落的数量分类及其结构分异的环境解释

刘 晔¹ 许 玥² 石松林³ 彭培好⁴ 沈泽昊^{2*}¹ (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055)² (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)³ (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)⁴ (成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610058)

摘要: 植物群落的空间分异格局是异质生境条件下物种性状、种间相互作用等生态学过程共同作用的结果, 对其分析有助于深入理解群落构建进程。本文基于金沙江流域干旱河谷116个样点562个样方的植物群落调查数据, 采用自适应仿射传播聚类的方法进行群落数量分类, 运用莫兰特征向量地图, 和方差分解的方法对影响群落结构的空间和环境因子进行分析。结果表明: (1) 自适应仿射传播聚类将金沙江干旱河谷的植物群落分为30组, 可归为7个植被型, 23个群系, 以稀树草原(30.0%)、暖性落叶阔叶灌丛(55.7%)为最主要的植被类型。(2) 年均温和干燥指数是限制金沙江干旱河谷植物群落分布的主要环境因子。稀树草原、肉质灌丛、常绿阔叶灌丛是典型的干热河谷植被类型; 暖性落叶阔叶灌丛、常绿硬叶林是干暖河谷植被的优势类型; 暖性针叶林、落叶阔叶林则主要在干温河谷环境占优势。(3) 纯环境因子可以解释群落物种组成变化的5.5%, 纯空间因子可以解释的物种组成变化为22.5%, 有空间结构的环境因子部分为6.6%, 未解释的部分为65.4%。在诸多环境因子中, 年均温及干燥指数的不同显示了不同群落生境的重要差异, 并显著影响到群落的分布格局。大尺度的空间因子则主要通过地理隔离对群落结构的差异产生影响。

关键词: 群落结构; 数量分类; 空间分异; 环境因子; 自适应仿射传播聚类; 莫兰特征向量地图; 方差分解

Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River

Ye Liu¹, Yue Xu², Songlin Shi³, Peihao Peng⁴, Zehao Shen^{2*}¹ School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055² Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, the Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871³ State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085⁴ College of Tourism and Urban-rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610058

Abstract: The structural differentiation of plant communities are associated with species traits, and inter-specific interactions in heterogeneous environment. The comprehensive analysis of spatial variation in species assemblages may help infer processes shaping ecological communities. Based on field investigation of 116 sites and 562 sampling points in the dry valley of Jinshajiang River, combined with vegetation classification by adaptive-affinity propagation, we used Moran's Eigenvector Maps and variation partitioning to quantify the effects of spatial and environmental factors on the community structure. The results showed that: (1) the plant communities were divided into 30 groups by Adaptive-AP, and classified into 7 vegetation types, 23 formations. Savanna (30.0%) and warm deciduous broadleaved thicket (55.7%) were the main vegetation

收稿日期: 2015-12-14; 接受日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

types. (2) Mean annual temperature (MAT) and aridity index (k) are two dominant climate factors limiting the distribution of plant community types in the dry valley of Jinshajiang River. Savanna, succulent thicket and evergreen broadleaved thicket are dominant vegetation types in typical dry-hot valley. Warm deciduous broadleaved thicket and evergreen sclerophyllous forest are dominant in dry-warm valley. Warm needle-leaved forest and deciduous broadleaved forest are more adaptive to lower temperature. (3) The pure environmental fraction can explain 5.5% of the species composition variation, the pure broad-scale spatial fraction can explain 22.5% of the species composition variation, 6.6% can be explained by the fraction corresponding to broad-scale structured environment and the unexplainable part was 65.4%. Among all the factors, MAT and k indicated the critical difference among the community habitats, which has prominent impact on the change of community composition. The broad-scale spatial factors played an important role in shaping the community structure by geographic isolation.

Key words: community structure; vegetation classification; structural differentiation; environmental factor; adaptive-affinity propagation; Moran's eigenvector maps; variation partitioning

金沙江发源于青海通天河, 经滇西北南下到丽江石鼓折向东北, 切穿虎跳峡后进入四川, 到宜宾与岷江合并为止, 沿途汇入雅砻江等大小支流, 全长2,291 km。在我国云南、四川境内的金沙江流域, 河谷低地主要受隐域性的干热-干暖局地气候控制, 即为金沙江干旱河谷, 河谷中广泛发育着以灌丛草地为主的非地带植被类型(金振洲和欧晓昆, 2000)。

对于金沙江干旱河谷植被的研究, 以往关注最多的是植物物种组成和区系成分等问题(朱华, 1990; 曹永恒和金振洲, 1993; 欧晓昆和金振洲, 1996; 金振洲和欧晓昆, 2000)。金振洲和欧晓昆(2000)、刘方炎和朱华(2005)利用群落中的优势种、建群种对金沙江流域的滇、川干热河谷与干暖河谷植物群落进行了结构、组成描述和分类研究。张建利等(2010)研究了金沙江流域干热河谷植物群落的多样性分布特征, 发现植物物种丰富度从上段到下段逐渐减小。而关于金沙江干旱河谷植物群落的空间分异格局及其与环境因子的关系却很少研究, 尤其未见基于物种组成变化的群落构建及其环境影响的探讨。

数量分析方法是研究植物群落生态关系的重要方法(张金屯, 2004), 在群落分类中起着非常重要的作用(terBraak, 1986; Mabry et al, 2000)。自适应仿射传播聚类(adaptive-affinity propagation, adaptive-AP)是一种新的数量分类方法(Frey & Dueck, 2007, 2008; 王开军等, 2007), 它广泛应用于生物信息学和天体物理学研究(Zhang et al, 2008), 在生态学研究中的应用刚刚起步(Cardille & Lambois, 2009; Rueda et al, 2013)。

群落物种构成的空间变化是生态学研究的核心问题(Legendre, 1993), 也是研究群落构建过程的重要途径(Dray et al, 2012)。群落空间格局的成因主要从两种生态过程的角度理解(Legendre et al, 2009), 积累了大量的经验研究(Pyron & Burbrink, 2009; Knörr et al, 2012)。一方面, 基于生态位理论可以推断有空间结构的环境条件, 即诱导性空间依赖(induced spatial dependence), 影响群落的构建过程和物种分布格局(Fortin & Dale, 2005; Fraser et al, 2008); 另一方面, 中性理论认为群落的空间自相关格局主要是扩散限制对群落组成结构的影响(Karst et al, 2005)。但不同生物类群的生活史特征、环境因子的组合以及群落概念的空间尺度等因素交互作用, 使得验证结果呈现出高度的复杂性(Ernest et al, 2008; Liu et al, 2012; Shipley, 2014)。采用空间变量模型和变异分解的方法, 可以区分空间自相关和扩散限制的存在及其对群落构成变化的影响大小(Borcard & Legendre, 2002)。

本文研究区域属于金沙江中、下游的河谷段, 其隐域性亚热带干旱-半干旱气候和廊道型的地貌格局为河谷植物群落构建提供了独特的条件, 也为检验群落构建理论提供了一个不同于地带性植被的环境背景。在对这一区段植物群落的大量野外样方调查基础上, 本文采用自适应仿射传播聚类和莫兰特征向量地图(Moran's eigenvector maps, MEM)等方法分析了以下3个问题: (1)金沙江干旱河谷植物群落的分类; (2)不同植物群落物种构成的空间分异格局及环境解释; (3)金沙江干旱河谷植物群落组成分化与环境及空间因子的关系及主导因素。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

金沙江干旱河谷包括干热河谷和干暖河谷两类(张荣祖, 1992; 金振洲, 2002; 张建利等, 2010)。其中干热河谷主要分布在海拔650–1,600 m处, 从西到东经云南巧家、普渡河、元谋龙江、永仁、华坪至永胜; 干暖河谷主要分布在干热河谷段上游海拔1,600–2,500 m处, 经云南德钦、中甸、丽江、永胜、永仁至巧家, 在四川境内经攀枝花、米易、会东、会理、金阳、雷波和宁南等地(金振洲, 1998)。干热河谷和干暖河谷气候条件分别以元谋和奔子栏最为典型(金振洲, 2002)(表1)。

由于地形封闭和焚风效应等的作用, 干旱河谷气候条件与同纬度水平地带性气候或河谷上部各垂直带的气候特征不同, 突出表现在河谷有显著的季节性干旱。年均温20–23℃, 年降水量600–800 mm (张荣祖, 1992), 年蒸发量为年降水量的3–6倍(张建利和毕玉芬, 2009), 干湿季分明, 每年11月至次年5月为干季(张金盈等, 2005)。土壤类型以燥红土为主, 还有褐红壤、赤红壤和紫色土等(罗辉和王克勤, 2006)。

1.2 样地设置与调查

2010年7月至2011年8月, 从云南德钦县奔子栏开始至四川宜宾为止, 对金沙江干流的河谷低地进行植物群落的样方调查, 主要顺沿江公路设置调查采样点, 样点间距10 km左右, 系统选择植被人为干扰不明显的生境, 也对不同的人工林群落和外来入侵植物占优势的群落进行代表性采样。共设置采样点98个, 并根据生境条件, 在每个调查样点垂直道路方向设置2–6个10 m × 10 m的植物群落调查样方, 共275个。

清查样方中全部乔木、灌木、草本植物种类, 测

量每株乔木的胸径、株高, 计数并目估每种灌木、草本植物的多度、盖度。用GPS记录样点经度、纬度和海拔, 并用经纬仪和罗盘测量坡度、坡向等地形因子。

除此之外, 本研究还搜集整理了金振洲和欧晓昆(2000)在该流域的调查数据。合计得到116个样点的562个植物群落样方(图1)。

1.3 数据处理

1.3.1 重要值

考虑到金沙江干旱河谷范围较大, 且包含干热、干暖两种气候类型, 各样点间既有环境差异, 又有空间隔离, 因此本文仅考虑某一物种在其所在样方中的相对重要性, 对经典重要值(importance value)计算公式(Curtis & McIntosh, 1951)做了调整, 仅统计某一物种在样方中的多度和优势度(盖度), 分别计算乔木、灌木和草本的重要值, 建立重要值的样方–物种数据矩阵。计算公式同刘晔等(2016)。

1.3.2 气候数据

数据来源及计算方法同刘晔等(2016)。

利用校正后的气候数据, 提取金沙江流域各样点相应经纬度坐标上的气温、降水数据, 参考已有植物多样性和气候关系的研究结果(方精云等, 2002; Hawkins et al, 2003), 从能量和水分2个方面计算相关的气候指标。能量指标包括: 年均温(mean annual temperature, MAT); 最冷月均温(mean temperature of the coldest month, MTCM), 采用1月的均温值; 气温季节性(temperature seasonality, TSN), 年内各月均温值的标准差。水分指标: 年降水量(mean annual precipitation, MAP), 年内各月降水量之和; 干燥指数(aridity index, k), 由日均温10℃以上时期的温度与降水量计算得到, 即: $k = 0.16 \times (\text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C} \text{的积温} / \text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C} \text{的降水量})$ (中国科

表1 元谋干热河谷与奔子栏干暖河谷气候指标的比较(据金振洲, 2002)
Table 1 Comparison of climatic features between dry-hot valley at Yuanmou and dry-warm valley at Benzilan in Yunnan. Following Jin (2002)

| | 年均温 Mean annual tem- perature (℃) | 最热月均温 Mean temperature of the warmest month (℃) | 最冷月均温 Mean temperature of the coldest month (℃) | 年降水量 Mean annual precipita- tion (mm) | 干燥指数 Aridity index |
|--------------|--|--|--|--|-----------------------|
| 元谋 Yuanmou | 21.8 | 27.0 | 15.0 | 614 | 3.30 |
| 奔子栏 Benzilan | 16.7 | 24.3 | 7.7 | 286 | 4.75 |

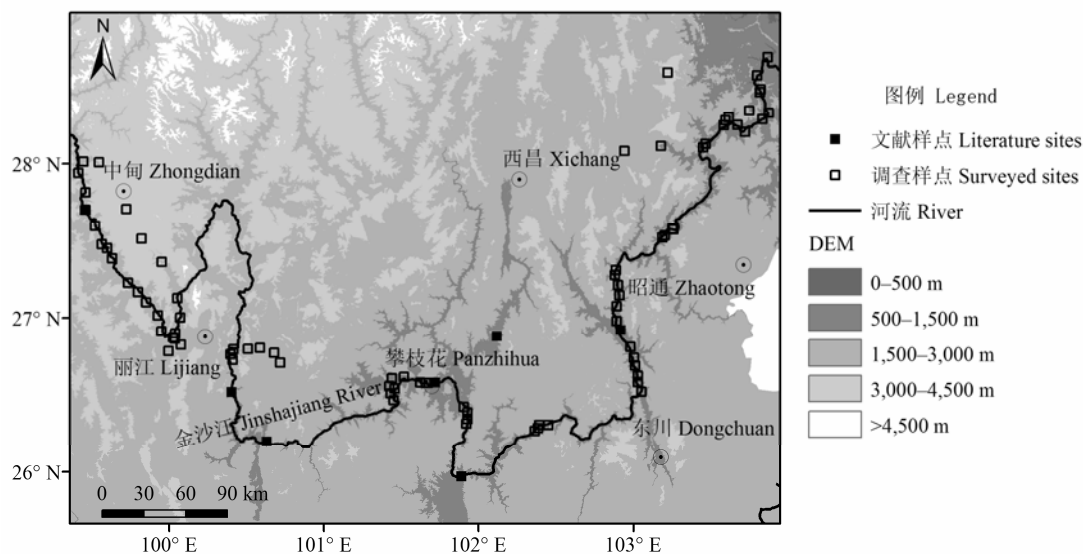


图1 研究区域及采样点分布

Fig. 1 Study area and distribution of sampling sites

学院自然区划工作委员会, 1959); 降水季节性 (precipitation seasonality, PSN), 年内各月平均降水量的变异系数(coefficient of variation)。

1.3.3 地形数据

海拔: 手持GPS测量, 单位米(m);

坡度: 经纬仪实测, 单位度(°), 范围0°–90°;

坡向: 由手持式罗盘测量, 由北向南顺时针方向旋转, 范围从0°–360°, 取正弦值(sin)计算(Mardia & Jupp, 2009)。分为N (0–22.5°, 337.5°–360°)、NE (22.5°–67.5°)、E (67.5°–112.5°)、SE (112.5°–157.5°)、S (157.5°–202.5°)、SW (202.5°–247.5°)、W (247.5°–292.5°)、NW (292.5°–337.5°)。

1.4 数据分析

1.4.1 群落分类和排序

自适应仿射传播聚类的计算原理和过程同刘晔等(2016)。

依据adaptive-AP的聚类结果, 选择重要值最高的物种作为优势种, 归类并命名群系, 依据中国植被分类系统(宋永昌, 2001)划分植被型。

采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)和偏分析法(partial methods)(张金屯, 2004), 分析气候因子(年均温、最冷月均温、气温季节性、年降水量、干燥指数、降水季节性)和地形因子(海拔、坡度、坡向)对金沙江干旱河谷植被差异

的解释, 用环境因子与排序轴夹角的余弦值表示各环境因子与排序轴的相关性, 用决定系数(squared correlation coefficient, r^2)来表征各环境因子对群落物种分布的影响, 运用置换检验(permutation test) (置换次数999次)检验各环境因子的显著性, 选择显著影响群落物种分布的主要因子作为环境因子, 分析其对植物群落物种组成及分布的影响。

1.4.2 环境和空间因素对群落物种组成及分布的影响

考虑到同一样点内的各样方空间距离接近 (一般<100 m), 气候因子基本一致, 且各样方的海拔信息以样点为单位来记录, 因此本研究选择样点尺度分析群落物种组成、分布与环境因子的关系。

群落的物种组成可以很好地反映人类活动对生态系统的影响, 物种组成在空间上的变化并不是随机的, 由于诱导性空间自相关和群落动态的作用, 群落存在一定的空间结构。空间特征函数分析 (spatial eigenfunction analysis) 可以估计空间变异, 分析不同空间尺度下空间结构与环境的关系, 结合方差分解的方法, 有助于了解群落构建的机制 (Blanchet et al, 2008; Mahecha & Schmidtlein, 2008)。莫兰特征向量图之前称为PCNM (principal coordinates of neighbour matrices) (Borcard & Legendre, 2002), 通过定义样点间的联接矩阵

(connectivity matrix), 控制空间自相关来实现上述目的, 它基于每个样点的空间坐标, 模拟一系列空间尺度的变异, 产生 $n-1$ 个带特征根(正或负)的空间向量, 作为解释群落变异的空间因子(Borcard et al, 2011; Legendre & Legendre, 2012)。

(1) 对样方群落的物种组成数据进行Hellinger标准化, 以强调常见种的作用(Legendre & Gallagher, 2001), 采用主成分分析(principal component analysis, PCA)确定群落物种组成的主要分异格局; 然后进行冗余度分析(redundancy analysis, RDA), 确定环境变量所解释的群落物种组成格局的主要变异性; 基于偏残差分析(partial residual analysis, PRA), 确定去除环境变量影响后的群落物种组成格局的变异性。环境因子包括海拔(altitude)、年均温(MAT)、最冷月均温(MTCM)、年降水量(MAP)、干燥指数(k)、气温季节性(TSN)、降水季节性(PSN)等7个环境变量。

(2) 采用莫兰特征向量地图(MEM)方法计算和选择空间因子。首先利用经纬度信息, 计算任意两点间的平面距离(d_{ij}), 得到基于各样点的GG平面图(Gabriel graph), 构建距离矩阵, 运用公式 $S_{ij} = 1 - (d_{ij}/\max(d_{ij}))^3$ 计算空间权重, 其中 $\max(d_{ij})$ 为所有距离间的最大值, 对距离矩阵进行权重赋值, 得到空间权重矩阵, 即MEMs空间向量(Gabriel & Sokal, 1969; Bivand, 2008), 并将其划分成8组空间尺度(1-7组15个向量, 第8组11个向量), 采用平滑曲线分析以避免取样效应的影响(Munoz, 2009), 并使用Monte-Carlo置换过程(999次重复)检验是否最大观测 R^2 (R^2_{\max})明显大于在空间结构缺失的情况下得到的值(Ollier et al, 2006)。再对116个MEMs向量进行正向选择(forward selection), 选择显著的向量作为空间因子, 依据Moran统计值划分尺度(Blanchet et al, 2008)。

(3) 将空间因子计算结果, 结合环境因子组成多元回归模型, 进行方差分解, 区分空间因子、环境因子以及空间尺度对植物群落物种组成差异的解释(Borcard & Legendre, 2002)。

自适应仿射传播聚类采用matlab 10.0编程(王开军等, 2007); 其余统计分析均在R软件中完成, 其中莫兰特征向量地图采用spdep (Bivand, 2008)、spacemakeR (Dray, 2010)包, 典范对应分析、主成分分析、冗余度分析、偏残差分析、方差分解采用vegan

(Oksanen et al, 2007)、ade4 (Dray & Dufour, 2007)包, 正向选择采用packfor包(Dray, 2009)。

2 结果

2.1 群落分类与分布

562个样方中有38个为人工林或入侵植物占优势的灌草丛, 其中人工林包含20个样方, 包括桉(*Eucalyptus robusta*)、柳叶桉(*E. saligna*)、合欢(*Albizia julibrissin*)、胡桃(*Juglans regia*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)和油桐(*Vernicia fordii*)等人工种植树种。入侵植物灌草丛包含18个样方, 主要入侵植物为紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)。

用adaptive-AP加指示种的方法将其余的524个样方划分为30组, 最终归类为7个植被型, 23个群系(图2)。其中, 稀树草原和暖性落叶阔叶灌丛为金沙江干旱河谷两种主要的植被类型, 分别占总样方数的30.0%和55.7%。7个植被型的结构和主要种类组成如下:

(1) 稀树草原。本植被类型分为9个群系, 含157个样方, 占样本总量的30.0%。

黄茅灌草丛(Form. *Heteropogon contortus*), 分布在金沙江下游丽江-昭通段, 海拔709-1,590 m, 坡度 0° - 60° , 坡向 0° - 350° , 占总样方的12.8%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为戟叶酸模(*Rumex hastatus*), 重要值为10.5%; 草本层优势种为黄茅, 重要值为47.9%。

孔颖草灌草丛(Form. *Bothriochloa pertusa*), 分布在金沙江下游丽江-昭通段, 海拔1,000-1,550 m, 坡度 10° - 40° , 坡向 30° - 330° , 占总样方的6.3%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为车桑子(*Dodonaea viscosa*), 重要值为4.8%; 草本层优势种为孔颖草、黄茅, 重要值分别为67.1%、10.1%。

从毛羊胡子草灌草丛(Form. *Eriophorum comosum*), 分布在金沙江下游攀枝花-昭通段, 海拔1,100-1,300 m, 坡度 5° - 30° , 坡向 195° - 330° , 占总样方的2.3%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为车桑子, 重要值为6.2%; 草本层优势种为从毛羊胡子草、拟金茅(*Eulaliopsis binata*), 重要值分别为38.3%、36.5%。

金合欢灌草丛(Form. *Acacia farnesiana*), 分布在金沙江下游东川-昭通段, 海拔536-792 m, 坡度 0° - 50° , 坡向 70° - 275° , 占总样方的2.3%, 包含灌木

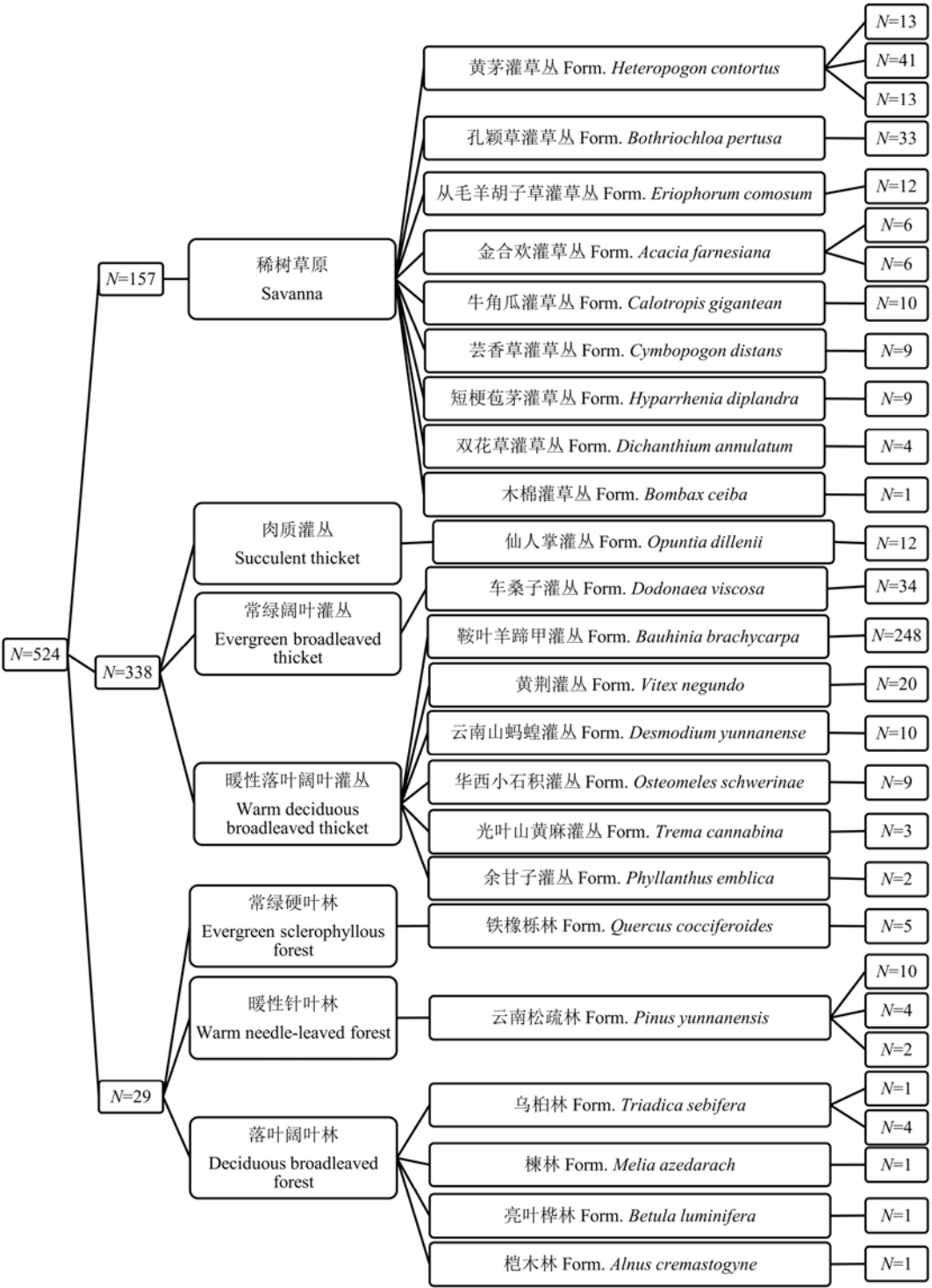


图2 金沙江干旱河谷524个样方的植物群落分类树状图(N表示样方数)
Fig. 2 Dendrogram of the plant community classification for 524 plots in the dry valley of Jinshajiang River. N indicates the number of plots.

层和草本层。灌木层优势种为金合欢、麻风树 (*Jatropha curcas*), 重要值分别为46.6%、12.0%; 草本层优势种为西南菅草(*Themeda hookeri*), 重要值

为10.8%。
牛角瓜灌丛(Form. *Calotropis gigantea*), 分布在金沙江下游东川-昭通段, 海拔770-930 m, 坡

度 17° – 40° , 坡向 99° – 313° , 占总样方的1.9%, 包含灌木层和草本层, 灌木层优势种为牛角瓜, 重要值为59.8%; 草本层优势种为孔颖草, 重要值为17.0%。

芸香草灌草丛(Form. *Cymbopogon distans*), 分布在金沙江下游东川–昭通段, 海拔1,070–1,140 m, 坡度 20° – 40° , 坡向 25° – 260° , 占总样方的1.7%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为假杜鹃(*Barleria cristata*)和茺花(*Laplacea canescens*), 重要值分别为7.8%、6.3%; 草本层优势种为芸香草、黄茅, 重要值分别为50.6%、14.8%。

短梗苞茅灌草丛(Form. *Hyparrhenia diplandra*), 分布在金沙江下游攀枝花附近, 海拔1,520–1,630 m, 坡度 0° – 20° , 坡向 145° – 260° , 占总样方的1.7%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为车桑子, 重要值为17.7%; 草本层优势种为短梗苞茅, 重要值为64.7%。

双花草灌草丛(Form. *Dichanthium annulatum*), 分布在金沙江下游昭通–宜宾段, 海拔800–830 m, 坡度 18° – 35° , 坡向 62° – 330° , 占总样方的0.8%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为车桑子, 重要值为11.7%; 草本层优势种为双花草、叶下珠(*Phyllanthus urinaria*), 重要值分别为43.0%、18.2%。

木棉灌草丛(Form. *Bombax ceiba*), 分布在金沙江下游, 丽江附近, 海拔1,336 m, 坡度 40° , 坡向 10° , 仅含1个样方, 包含乔木、灌木和草本3层。乔木层优势种为木棉, 重要值为54.6%; 灌木层优势种为光叶山黄麻(*Trema cannabina*), 重要值为45.5%; 草本层优势种为荞麦(*Fagopyrum esculentum*), 重要值为34.4%。

(2)肉质灌丛。本植被类型在结构上分为灌木层和草本层, 仅包括仙人掌灌丛(Form. *Opuntia dillenii*) 1个群落类型, 分布在金沙江下游丽江–昭通段, 海拔718–1,050 m, 坡度 25° – 80° , 坡向 10° – 352° , 占总样方的2.3%, 仙人掌为绝对优势种, 重要值为50.8%, 伴生有百日菊(*Zinnia elegans*)、黑果黄茅(*Heteropogon melanocarpus*)、蛛丝毛蓝耳草(*Cyanotis arachnoidea*)等, 重要值分别为1.5%、2.2%、0.9%。

(3)常绿阔叶灌丛。本植被类型在结构上分为灌木层和草本层, 仅包括车桑子灌丛(Form. *Do-*

donaea viscosa) 1个群落类型, 分布在金沙江下游攀枝花–昭通段, 海拔1,030–1,630 m, 坡度 15° – 60° , 坡向 10° – 345° , 占总样方的6.5%, 灌木层优势种为车桑子, 重要值为37.8%; 草本层优势种为黄茅, 重要值为32.0%。

(4)暖性落叶阔叶灌丛。本植被类型包括6个群系, 含326个样方, 占总样本量的55.7%。

鞍叶羊蹄甲灌丛(Form. *Bauhinia brachycarpa*), 广泛分布在金沙江流域, 海拔398–3,298 m, 坡度 0° – 80° , 坡向 0° – 355° , 占总样方的47.3%, 包含灌木和草本层, 优势种为鞍叶羊蹄甲, 重要值为3.3–46.5%, 常见的伴生种有西南莴草、黄茅、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等, 平均重要值分别为3.3%、2.6%、1.8%、1.4%。

黄荆灌丛(Form. *Vitex negundo*), 分布在金沙江下游攀枝花–宜宾段, 海拔672–1,160 m, 坡度 0° – 70° , 坡向 5° – 355° , 占总样方的3.8%, 包含灌木层和草本层, 灌木层优势种为黄荆和滇榄仁(*Terminalia franchetii*), 重要值分别为42.3%和15.2%; 草本层优势种为孔颖草, 重要值为4.3%。

云南山蚂蝗灌丛(Form. *Desmodium yunnanense*), 分布在金沙江下游攀枝花–东川段, 海拔1,500–1,600 m, 坡度 22° – 40° , 坡向 15° – 335° , 占总样方的1.9%, 包含灌木层和草本层。云南山蚂蝗为绝对优势种, 重要值为55.2%; 伴生有毛叶黄杞(*Engelhardia spicata* var. *colebrookeana*)、香茶菜(*Isodon amethystoides*)、辽东蒿(*Artemisia verbenacea*)和云南兔儿风(*Ainsliaea yunnanensis*)等, 重要值分别为1.7%、0.5%、3.1%和0.7%。

华西小石积灌丛(Form. *Osteomeles schwerinae*), 分布在金沙江下游丽江–攀枝花段, 海拔1,550–1,620 m, 坡度 25° – 45° , 坡向 195° – 250° , 占总样方的1.7%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为华西小石积, 重要值为38.5%; 草本层优势种为黄茅、橘草(*Cymbopogon goeringii*), 重要值分别为22.5%、10.5%。

光叶山黄麻灌丛(Form. *Trema cannabina*), 分布在金沙江下游攀枝花附近, 海拔752–1,470 m, 坡度 30° – 85° , 坡向 15° – 60° , 占总样方的0.6%, 包含灌木层和草本层。灌木层优势种为光叶山黄麻、假杜鹃(*Barleria cristata*), 重要值分别为28.5%、11.6%;

草本层优势种为风龙(*Sinomenium acutum*)、野艾蒿,重要值分别为6.2%、3.2%。

余甘子灌丛(Form. *Phyllanthus emblica*), 分布在金沙江下游攀枝花附近, 海拔1,051–1,065 m, 坡度35°–50°, 坡向120°–245°, 仅有2个样方, 包含乔木、灌木和草本层, 乔木层优势种为余甘子, 重要值为100%; 灌木层优势种为黄荆, 重要值为9.4%; 草本层优势种为西南菅草、黄茅, 重要值分别为14.2%、13.1%。

(5)常绿硬叶林。本植被类型仅包括**铁橡栎林(Form. *Quercus cocciferoides*)** 1个群落类型, 分布在金沙江下游攀枝花–东川段, 海拔1,690–1,890 m, 坡度26°–32°, 坡向225°–310°, 占总样方的1%, 结构分乔木、灌木和草本层。乔木层优势种为铁橡栎, 重要值为66.2%; 伴生有铁仔(*Myrsine africana*)、密花莢蒾(*Viburnum congestum*)、辽东蒿等, 重要值分别为4.6%、4.2%和1.3%。

(6)暖性针叶林。本植被类型仅包括**云南松疏林(Form. *Pinus yunnanensis*)** 1个群落类型, 自金沙江上游的中甸到下游的攀枝花都有分布, 海拔1,250–2,590 m, 坡度10°–45°, 坡向20°–345°, 占总样方的3.0%, 结构分乔木、灌木和草本3层。乔木层优势种为云南松, 重要值为83.0%; 伴生有地蕊(*Melastoma dodecandrum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、野艾蒿等, 重要值分别为3.3%、3.3%、6.3%和4.6%。

(7)落叶阔叶林。本植被类型包括4个群落类型, 总共出现在8个样方, 占总样本量的1.5%。

乌柏林(Form. *Triadica sebifera*), 分布在金沙江下游昭通–宜宾段, 海拔358–507 m, 坡度5°–25°, 坡向68°–192°, 占总样方的1%, 结构上分乔木层、灌木层和草本层。乔木层优势种为乌柏, 重要值为55.2%; 灌木层优势种为光叶山黄麻, 重要值为14.3%; 草本层优势种为有芒鸭嘴草(*Ischaemum aristatum*), 重要值为14.6%。

楝林(Form. *Melia azedarach*), 分布在金沙江下游昭通–宜宾段, 海拔599 m, 坡度20°, 坡向230°, 含1个样方, 结构上分乔木、灌木、草本三层。乔木层优势种为楝, 重要值为100%; 灌木层优势种为细枝叶下珠(*Phyllanthus leptoclados*), 重要值为4.5%; 草本层优势种为爵床(*Justicia procumbens*)和黄茅, 重要值分别为37.8%和15.8%。

亮叶桦林(Form. *Betula luminifera*), 分布在金沙江下游昭通–宜宾段, 海拔1,423 m, 坡度30°, 坡向175°, 含1个样方, 包含乔木、灌木和草本3层。乔木层优势种为亮叶桦, 重要值为76.5%; 伴生有黄毛櫟木(*Aralia chinensis*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等, 重要值分别为7.6%、4.1%和8.8%。

桤木林(Form. *Alnus cremastogyne*), 分布在金沙江下游昭通–宜宾段, 海拔1,329 m, 坡度30°, 坡向300°, 含1个样方, 包含乔木、灌木和草本三层。乔木层优势种为桤木, 重要值为58.1%; 灌木层优势种为地蕊, 重要值为4.0%; 草本层优势种为芒(*Miscanthus sinensis*)、糯米团(*Hyrtanandra hirta*)和蛛丝毛蓝耳草, 重要值均为11.0%。

2.2 群落分布与环境因子的关系

2.2.1 群落类型与环境的关系

依据植被型分类结果进行CCA排序, 分析环境梯度上植被类型的变化(图3)。以9个环境因子为预测变量的CCA分析结果表明, 环境因子对植物群落的物种组成存在显著影响。其中海拔、坡向、气温季节性、年降水量与第一轴负相关, 坡度、最冷月均温、年均温、干燥指数、降水季节性与第一轴正相关, 相关性由大到小依次为降水季节性($R = 0.99$)、干燥指数($R = 0.98$)、年均温($R = 0.86$)、年降水量和海拔($R = -0.79$)、坡向($R = -0.72$)、坡度($R = 0.35$)、最冷月均温($R = 0.12$)、气温季节性($R = -0.07$); 海拔、坡向与第二轴负相关, 其余7个环境因子均与第二轴正相关, 相关性由大到小依次为气温季节性和最冷月均温($R = 0.99$)、坡度($R = 0.93$)、坡向($R = -0.69$)、年降水量($R = 0.61$)和海拔($R = -0.61$)、年均温($R = 0.52$)、干燥指数($R = 0.17$)、降水季节性($R = 0.13$)。

地形因子单独的解释量为0.78%, 占总解释量的25.0%; 气候因子单独的解释量为2.20%, 占总解释量的70.5%; 气候和地形因子的共同解释量为0.14%, 占总解释量的4.5%。9个环境因子中, 海拔、最冷月均温、年均温、气温季节性、年降水量、降水季节性、干燥指数等7个因子对群落物种分布有显著影响, 决定系数由大到小依次为年均温($r^2 = 0.63$)、干燥指数($r^2 = 0.58$)、海拔($r^2 = 0.35$)、年降水量($r^2 = 0.22$)、最冷月均温($r^2 = 0.13$)、降水季节性($r^2 = 0.08$)、气温季节性($r^2 = 0.03$)。结果表明年均温

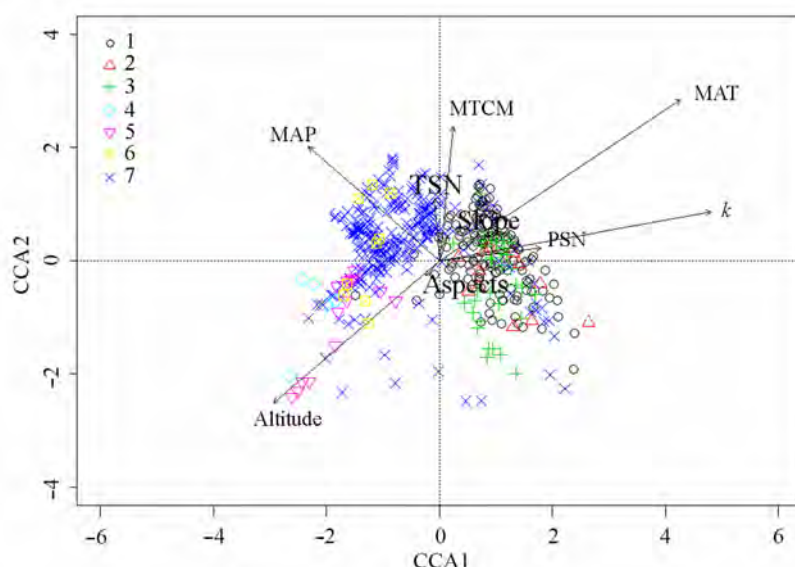


图3 不同植被类型的典范对应分析排序结果。1, 稀树草原; 2, 肉质灌丛; 3, 常绿阔叶灌丛; 4, 暖性落叶阔叶灌丛; 5, 常绿硬叶林; 6, 暖性针叶林; 7, 落叶阔叶林。Altitude: 海拔; slope: 坡度; aspect: 坡向; MAT: 年均温; MTCM: 最冷月均温; TSN: 气温季节性; MAP: 年降水量; k : 干燥指数; PSN: 降水季节性。

Fig. 3 Result of canonical correspondence analysis of different vegetation types. 1, Savanna; 2, Succulent thicket; 3, Evergreen broadleaved thicket; 4, Warm deciduous broadleaved thicket; 5, Evergreen sclerophyllous forest; 6, Warm needle-leaved forest; 7, Deciduous broadleaved forest. MAT, mean annual temperature; MTCM, mean temperature of the coldest month; TSN, temperature seasonality; MAP, mean annual precipitation; k , aridity index; PSN, precipitation seasonality.

和干燥指数是影响植被分布的主要环境因子。

不同植被类型中, 年均温均值由高到低($19.98\text{--}14.56^{\circ}\text{C}$)依次为肉质灌丛>稀树草原>常绿阔叶灌丛>常绿硬叶林>暖性落叶阔叶灌丛>落叶阔叶林>暖性针叶林, 标准偏差由高到低($3.63\text{--}1.34^{\circ}\text{C}$)依次为暖性落叶阔叶灌丛>暖性针叶林>落叶阔叶林>稀树草原>常绿阔叶灌丛>肉质灌丛>常绿硬叶林; 干燥指数均值由高到低($1.57\text{--}0.91$)依次为肉质灌丛>常绿阔叶灌丛>稀树草原>暖性落叶阔叶灌丛>常绿硬叶林>暖性针叶林>落叶阔叶林, 标准偏差由高到低($0.32\text{--}0.09$)依次为暖性落叶阔叶灌丛>肉质灌丛>稀树草原>常绿阔叶灌丛>暖性针叶林>落叶阔叶林>常绿硬叶林。其中, 稀树草原、暖性落叶阔叶灌丛这两个主要植被类型, 年均温范围分别为 $19.58 \pm 1.44^{\circ}\text{C}$ 、 $16.92 \pm 3.58^{\circ}\text{C}$, 干燥指数(k)范围分别为 1.49 ± 0.28 、 1.19 ± 0.32 。

依据这一结果, 可将肉质灌丛、稀树草原、常绿阔叶灌丛划分为干热河谷植被类型, 常绿硬叶林、暖性落叶阔叶灌丛划分为干暖河谷植被类型, 落叶阔叶林、暖性针叶林划分为干温河谷植被类

型。

2.2.2 环境和空间因素对群落物种组成的影响

空间因子影响的分析结果显示, 群落物种组成在大尺度的方差累积远多于小尺度的值(图4a, b)。群落物种组成主成分的前两轴有显著的非随机大尺度空间格局(轴1、轴2分别为 $R^2_{\text{Max}} = 0.59$, $P = 0.001$; $R^2_{\text{Max}} = 0.17$, $P = 0.011$), 表明群落物种构成的空间格局主要反映在大尺度上。

环境因子对群落分布的影响也有显著的大尺度格局(轴1、轴2分别为 $R^2_{\text{Max}} = 0.71$, $P = 0.001$; $R^2_{\text{Max}} = 0.42$, $P = 0.001$) (图4c, d), 表明环境变量解释的部分有大尺度空间结构。

以环境变量为协变量的偏残差分析, 前两轴也有显著的非随机大尺度空间格局(轴1、轴2分别为 $R^2_{\text{Max}} = 0.14$, $P = 0.045$; $R^2_{\text{Max}} = 0.23$, $P = 0.001$), 这意味着排除环境因子的作用后, 群落中仍存在大尺度的空间格局(图4e, f)。

代表空间因子的20个统计显著的MEMs向量的莫兰统计值均大于0, 即代表正的空间自相关关系, 均划分为大尺度。

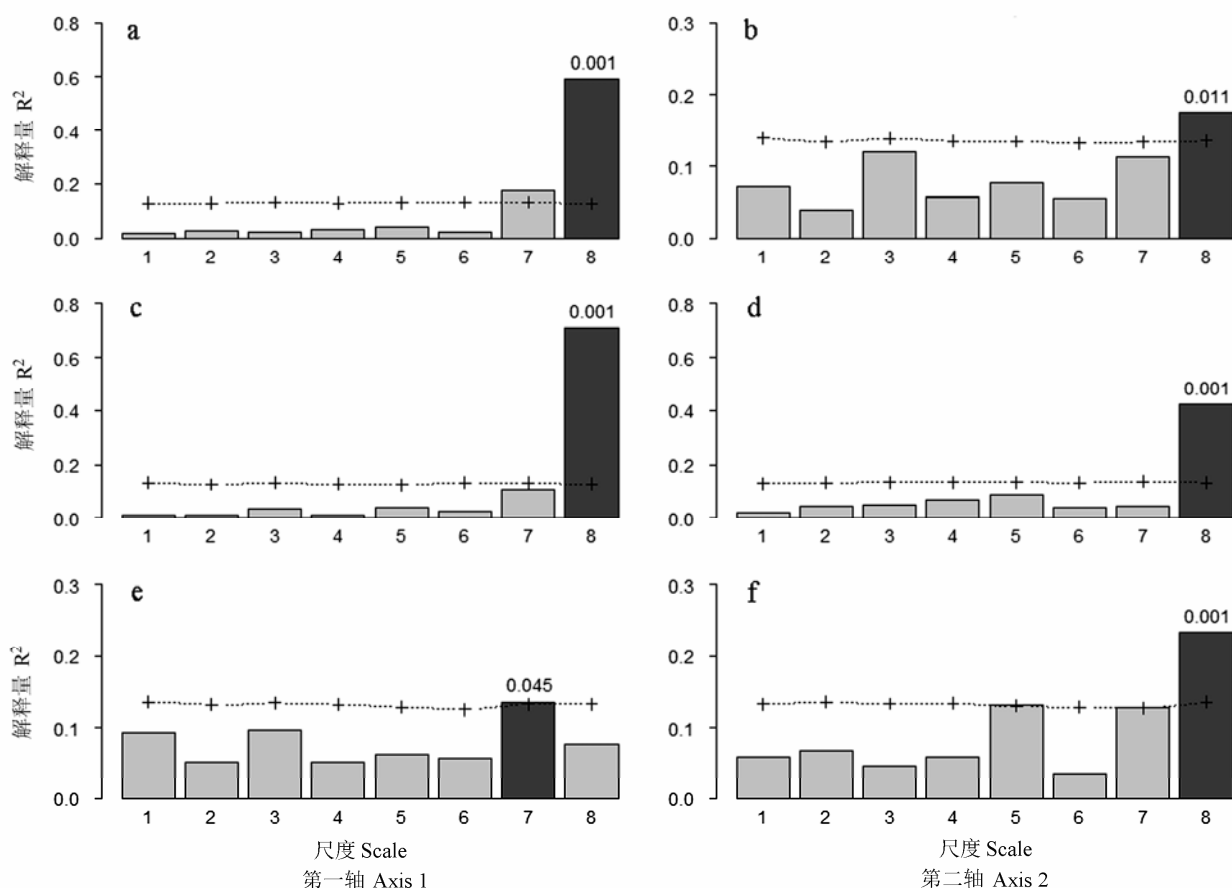


图4 金沙江群落样方的排序分析。a, b: 原始数据的主成分分析; c, d: 以环境变量为预测变量的冗余分析; e, f: 以环境变量为协变量的偏残差分析。柱状图表示每一个空间尺度的解释量 R^2 , 深灰色表示 R^2 最大值, 标记 P 值, “+”代表95%的置信区间。
Fig. 4 Vegetation ordination for the plots in Jinshajiang River. a, b, principal component analysis of original table; c, d, redundancy analysis with E as predictors; e, f, partial residual with E as covariables. The smoothed scalogram indicates the portion of variance R^2 explained by each spatial scale. The dark gray is the highest R^2 . P values are given. The 95% confidence limit is also represented by the line of “+”.

对环境因子和空间因子进行方差分解, 确定了一个显著的纯大尺度空间部分($R^2 = 0.225$), 一个显著的纯环境部分($R^2 = 0.055$), 一个不显著的环境+空间部分($R^2 = 0.066$), 和不显著的残差部分($R^2 = 0.654$)。结果表明大尺度空间因子在群落构建中有重要作用。

3 结论与讨论

本文尝试采用自适应仿射传播聚类方法对金沙江干旱河谷的样方数据进行分析, 最终将该流域的植物群落划分为7个植被型(稀树草原、肉质灌木、常绿阔叶灌木、暖性落叶阔叶灌木、常绿硬叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林), 以暖性落叶阔叶灌木(55.7%)和稀树草原(30.0%)为最主要的植被类型,

其中鞍叶羊蹄甲灌木(47.3%)、黄茅灌木(12.8%)为最常见的群系。根据干燥指数和年均温, 将7种植被型划分为干热、干暖、干温3种类型, 其中肉质灌木、稀树草原、常绿阔叶灌木属于干热河谷植被类型; 常绿硬叶林、暖性落叶阔叶灌木属于干暖河谷植被类型; 落叶阔叶林、暖性针叶林属于干温河谷植被类型。这与根据地理分区划分的干热、干暖河谷植被(杨勤业和郑度, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000)的特征基本一致, 其中干热河谷植被以旱生的稀树草原为主, 并散生有肉质灌木和常绿阔叶灌木; 干暖河谷植被以暖性落叶阔叶灌木为主, 并散生有常绿硬叶林; 干温河谷植被以暖性针叶林和落叶阔叶林为主。

基于本文的研究结果, 我们认为自适应仿射传

播聚类方法既很好地避免了以群落自身特征(物种组成)为分类基础进行数量分类时,对于群落边界界定的人为性;分类结果又与植被地理分区基本吻合,结果可靠。

自适应仿射传播聚类方法进行植被分类的结果可靠性在其他研究中也有证明。如,Cardill和Lambois(2009)使用该方法分析了北美的土地利用和覆盖变化分类,清晰地划分了真实世界的景观;Rueda等(2013)采用该方法分析了世界哺乳动物的分布格局,并与Wallace划分的动物地理区做了比较,得到了非常一致的结果。

自适应仿射传播聚类方法不仅划分结果可靠,且相较于K-means聚类(MacQueen, 1967)、谱聚类(Spectral clustering) (Donath & Hoffman, 1973)等传统的聚类方法有3大优点:(1)适于处理大数据(Cardille & Lambois, 2009),运算速度快(Kelly, 2007),很好地解决了传统聚类算法在处理大数据时的时间复杂度(time complexity)问题;(2)无需预先指定分类数目(Frey & Dueck, 2007),且将所有的数据点都作为潜在的聚类中心(exemplar)(Sun et al, 2009),计算吸引度(responsibility)和归属度(availability)两种相似度信息,扫描偏向参数空间,搜索聚类数目空间(王开军等, 2007),自动生成最优的聚类结果(Jing et al, 2010);(3)具有灵活性,可基于度量(metric)或非度量(non metric)距离进行聚类(Yang et al, 2010)。

本文采用CCA排序的方法,分析了金沙江流域干旱河谷的植被分布与气候、地形因子的关系,结果显示,本区环境梯度上植被型的变化主要受干燥指数和年均温的影响,气候因子是影响金沙江流域干旱河谷植被分布的主要因子,地形因子中仅海拔与植被分布显著相关。这与已有对地中海气候区稀树草原植被与环境因子关系的研究结果基本一致,温度和降水与植被分布显著相关(Spano et al, 1999; Ludwig et al, 2004)。说明了金沙江流域干旱河谷植被与稀树草原植被在环境因子响应上的相似性。

本文采用莫兰特征向量地图方法,分析影响植物群落物种组成的空间和环境因子,结果显示,大尺度空间结构解释群落物种构成空间变异性的0.225(统计显著),反映了地理隔离对群落间物种更替的影响(Hubbell, 2001);纯环境因子解释了0.055(统计显著);“空间+环境”部分解释了0.066,反映了

环境效应的空间异质属性(主要在大尺度上) (Smith & Lundholm, 2010)。未能解释的数据残差部分有65.4%,但这并不能说明金沙江干旱河谷的群落结构不存在强的环境或空间控制。实际上,对于植物群落物种组成较低的环境解释度在植物群落分析中比较常见(Okland, 1999; 沈泽昊和张新时, 2001),这主要受制于研究所采用的样方气候指标空间精度较低,与未能测定的环境因子(包括土壤理化属性、群落所受干扰) (Griffith, 1992; Fortin & Dale, 2005; Wagner & Fortin, 2005; McIntire & Fajardo, 2009; Leibold et al, 2010)、数据样本的随机噪音(Svenning et al, 2004; Slik et al, 2009)、群落和环境的随机过程等因素(terBraak & Smilauer, 2002),或其群落构成与环境因子的空间尺度不匹配等未知的空间因素(Bell et al, 2006)有关。而干燥指数和年均温从大量的数据随机误差中突显出来,也正反映了其对植物群落空间分异的主导作用。

另外,尽管在野外植物群落调查取样时尽量回避受人为活动干扰比较明显的地点,但由于金沙江流域人为活动比较强烈(金振洲, 1999),本地原生植被破坏和外来物种入侵的历史久远(徐成东和陆树刚, 2006),这些因素仍在不同程度上影响气候因子和空间因子对植物群落分异格局的解释力。

致谢: 感谢北京大学生态学系沈利峰、王韬、杨健、褚延梅等同学参与野外植物群落调查。感谢赵子恩先生帮助鉴定样方植物标本!

参考文献

- Bell G, Lechowicz MJ, Waterway MJ (2006) The comparative evidence relating to functional and neutral interpretations of biological communities. *Ecology*, 87, 1378–1386.
- Bivand R (2008) Spdep: Spatial Dependence: Weighting Schemes. Statistics and Models. R package version 0.4-17.
- Blanchet FG, Legendre P, Borcard D (2008) Forward selection of explanatory variables. *Ecology*, 89, 2623–2632.
- Borcard D, Gillet F, Legendre P (2011) *Numerical Ecology with R*. Springer, Berlin.
- Borcard D, Legendre P (2002) All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices. *Ecological Modelling*, 153, 51–68.
- Cardille JA, Lambois M (2009) From the redwood forest to the gulf stream waters: human signature nearly ubiquitous in representative US landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 130–134.
- Cao YH, Jin ZZ (1993) A research on the vegetation of Nuji-

- ang dry-hot river valley in Lujiangba of Yunnan. *Guihaia*, 15, 132–138. (in Chinese with English abstract) [曹永恒, 金振洲 (1993) 云南潞江坝怒江干热河谷植被研究. *广西植物*, 15, 132–138.]
- Curtis JT, McIntosh RP (1951) An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 476–496.
- Donath WE, Hoffman AJ (1973) Lower bounds for the partitioning of graphs. *IBM Journal of Research & Development*, 17, 420–425.
- Dray S (2009) Packfor: Forward Selection with Permutation (Canoco p. 46). R package version 0.0-7/r58.
- Dray S (2010) Spacemaker: Spatial Modelling. R package version 0.0-5/r101.
- Dray S, Dufour AB (2007) The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22(4), 1–20.
- Dray S, Pélessier R, Couteron P, Fortin MJ, Legendre P, Peres-Neto PR, Bellier E, Bivand R, Blanchet FG, de Cáceres M, Dufour A, Heegard E, Jombart T, Munoz F, Oksanen J, Thioulouse J, Wagner HH (2012) Community ecology in the age of multivariate multiscale spatial analysis. *Ecological Monographs*, 82, 257–275.
- Ernest SKM, Brown JH, Thibault KM, White EP, Goheen JR (2008) Zero sum, the niche, and metacommunities: long-term dynamics of community assembly. *The American Naturalist*, 172, 257–269.
- Fang JY, Song YC, Liu HY, Piao SL (2002) Vegetation–climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122. (in Chinese with English abstract) [方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 朴世龙 (2002) 植被气候关系与我国的植被分区. *植物学报*, 44, 1105–1122.]
- Fortin MJ, Dale MRT (2005) *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fraser SEM, Dytham C, Mayhew PJ, Mouillot D, Anderson BJ (2008) Community structure in ichneumonid parasitoids at different spatial scales. *Oecologia*, 157, 521–530.
- Frey BJ, Dueck D (2007) Clustering by passing messages between data points. *Science*, 315, 972–976.
- Frey BJ, Dueck D (2008) Response to comment on “Clustering by passing messages between data points”. *Science*, 319, 726.
- Gabriel KR, Sokal RR (1969) A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 18, 259–270.
- Griffith DA (1992) What is spatial autocorrelation? Reflection on the past 25 years of spatial statistics. *Espace Géographique*, 3, 265–280.
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guegan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1998) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (1999) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-hot valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 19, 1–14. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 19, 1–14.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干热河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Jing Y, Covell M, Rowley HA (2010) Comparison of clustering approaches for summarizing large populations of images. In: *IEEE International Conference on Multimedia & Expo* (eds Chau LP, Yan SC), pp. 1523–1527. Singapore.
- Karst J, Gilbert B, Lechowicz MJ (2005) Fern community assembly: the roles of chance and the environment at local and intermediate scales. *Ecology*, 86, 2473–2486.
- Kelly K (2007) Affinity program slashes computing times. <http://www.news.utoronto.ca/bin6/070215-2952>. (accessed 2007-02-15)
- Knörr UC, Kovar-Eder J, Mazouch P, Roth-Nebelsick A (2012) Fruit dispersal ecology of woody taxa in temperate to tropical forests of China and Japan. *Palaios*, 27, 523–540.
- Legendre P (1993) Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm. *Ecology*, 74, 1659–1673.
- Legendre P, Gallagher E (2001) Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271–280.
- Legendre P, Legendre LFJ (2012) *Numerical Ecology*. Elsevier, North Holland.
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Leibold MA, Economo EP, Peres-Neto P (2010) Metacommunity phylogenetics: separating the roles of environmental filters and historical biogeography. *Ecology Letters*, 13, 1290–1299.
- Liu FY, Zhu H (2005) Numerical classification and diversity analysis for the vegetation in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province. *Guihaia*, 25, 22–25. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 朱华 (2005) 元江干热河谷植

- 被数量分类及其多样性分析. 广西植物, 25, 22–25.]
- Liu XJ, Swenson NG, Zhang JL, Ma KP (2012) The environment and space, not phylogeny, determine trait dispersion in a subtropical forest. *Functional Ecology*, 27, 264–272.
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. 生物多样性, 24, 378–388.]
- Ludwig F, deKroon H, Berendse F, Prins HHT (2004) The influence of savanna trees on nutrient, water and light availability and the understorey vegetation. *Plant Ecology*, 170, 93–105.
- Luo H, Wang KQ (2006) Soil seed bank of vegetation restoration region in mountainous area of Yuanmou dry-hot valley. *Science of Soil and Water Conservation*, 4, 87–91. (in Chinese with English abstract) [罗辉, 王克勤 (2006) 元谋干热河谷山地植被修复区土壤种子库研究. 中国水土保持科学, 4, 87–91.]
- Mabry C, Ackerly D, Gerhardt F (2000) Landscape and species level distribution of morphological and life history traits in a temperate woodland flora. *Journal of Vegetation Science*, 11, 213–224.
- MacQueen J (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281–297.
- Mahecha MD, Schmidtlein S (2008) Revealing biogeographical patterns by nonlinear ordinations and derived anisotropic spatial filters. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 284–296.
- Mardia KV, Jupp PE (2009) *Directional Statistics*. John Wiley & Sons, New York.
- McIntire EJB, Fajardo A (2009) Beyond description: the active and effective way to infer processes from spatial patterns. *Ecology*, 90, 46–56.
- Munoz F (2009) Distance-based eigenvector maps (DBEM) to analyse metapopulation structure with irregular sampling. *Ecological Modelling*, 220, 2683–2689.
- Natural Divisions Working Committee of Chinese Academy of Sciences (1959) *Comprehensive Physical Regionalization of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院自然区划工作委员会 (1959) 中国综合自然区划. 科学出版社, 北京.]
- Okland RH (1999) On the variation explained by ordination and constrained ordination axes. *Journal of Vegetation Science*, 10, 131–136.
- Oksanen J, Kindt R, Legendre P, O'Hara B, Stevens MHH, Oksanen MJ, Suggests MASS (2007) *The Vegan Package*. *Community Ecology Package*, 10, 631–637.
- Ollier S, Couteron P, Chessel D (2006) Orthonormal transform to decompose the variance of a life-history trait across a phylogenetic tree. *Biometrics*, 62, 471–477.
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot valley. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. 武汉植物学研究, 14, 318–322.]
- Pyron RA, Burbrink FT (2009) Can the tropical conservatism hypothesis explain temperate species richness patterns? An inverse latitudinal biodiversity gradient in the New World snake tribe Lampropeltini. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 406–415.
- Rueda M, Rodríguez MÁ, Hawkins BA (2013) Identifying global zoogeographical regions: lessons from Wallace. *Journal of Biogeography*, 40, 2215–2225.
- Shen ZH, Zhang XS (2001) The spatial pattern and topographic interpretation of the forest vegetation at Dalaoling region in the Three Gorges. *Acta Botanica Sinica*, 42, 1089–1095. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张新时 (2001) 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 42, 1089–1095.]
- Shipley B (2014) Measuring and interpreting trait-based selection versus meta-community effects during local community assembly. *Journal of Vegetation Science*, 25, 55–65.
- Slik JWF, Raes N, Aiba SI, Brearley FQ, Cannon CH, Meijaard E, Nagamasu H, Nilus R, Paoli G, Poulsen AD, Sheil D, Suzuki E, van Valkenburg JLCH, Webb CO, Wilkie P, Wulffraat S (2009) Environmental correlates for tropical tree diversity and distribution patterns in Borneo. *Diversity and Distributions*, 19, 523–532.
- Smith TW, Lundholm JT (2010) Variation partitioning as a tool to distinguish between niche and neutral process. *Ecography*, 33, 648–655.
- Song YC (2001) *Vegetation Ecology*. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2001) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Spano D, Cesaraccio C, Duce P, Snyder RL (1999) Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *International Journal of Biometeorology*, 42, 124–133.
- Sun CY, Wang CH, Song S, Wang YF (2009) A local approach of adaptive affinity propagation clustering for large scale data. In: *International Joint Conference on Neural Networks* (ed. Kozma R), pp. 2998–3002. Atlanta, USA.
- Svenning JC, Kinner DA, Stallard RF, Engelbrecht B, Wright AJ (2004) Ecological determinism in plant community structure across a tropical forest landscape. *Ecology*, 85, 2526–2538.
- terBraak CJF (1986) Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167–1179.
- terBraak CJF, Smilauer P (2002) *Canoco Reference Manual and Canodraw for Windows User's Guide: Software for*

- Canonical Community Ordination (version 4.5). Micro-computer Power, New York.
- Wagner HH, Fortin MJ (2005) Spatial analysis of landscapes: concepts and statistics. *Ecology*, 86, 1975–1987.
- Wang KJ, Zhang JY, Li D, Zhang XN, Guo T (2007) Adaptive affinity propagation clustering. *Acta Automatica Sinica*, 33, 1242–1246. (in Chinese with English abstract) [王开军, 张军英, 李丹, 张新娜, 郭涛 (2007) 自适应仿射传播聚类. *自动化学报*, 33, 1242–1246.]
- Xu CD, Lu SG (2006) The invasive plants in Yunnan. *Guihaia*, 26, 227–234. (in Chinese with English abstract) [徐成东, 陆树刚 (2006) 云南的外来入侵物种. *广西植物*, 26, 227–234.]
- Yang J, Wang Y, Sowmya A, Zhang B, Xu J, Li Z (2010) Affinity propagation feature clustering with application to vehicle detection and tracking in road traffic surveillance. In: *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance* (ed. Sengupta K), pp. 414–419. Boston, USA.
- Yang QY, Zheng D (1989) An outline of physic-geographic regionalization of the Hengduan Mountainous Region. *Mountain Research*, 7, 56–64. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度 (1989) 横断山区综合自然区划纲要. *山地研究*, 7, 56–64.]
- Zhang JL, Bi YF (2009) The soil seed bank's temporal and spatial characteristics in the enclosed process of the mountain-grassland. *Ecology and Environmental Sciences*, 18, 1427–1432. (in Chinese with English abstract) [张建利, 毕玉芬 (2009) 金沙江干热河谷山地草地封育过程中土壤种子库时空特征. *生态环境学报*, 18, 1427–1432.]
- Zhang JL, Liu XK, Shen R, Shi W, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The species quantitative and diversity characteristic of grassland community in hot-dry valley of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1519–1524. (in Chinese with English abstract) [张建利, 柳小康, 沈蕊, 施雯, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 金沙江流域干热河谷草地群落物种数量及多样性特征. *生态环境学报*, 19, 1519–1524.]
- Zhang JT (2004) *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang JY, Xu Y, Su CJ, Liu XL (2005) Research progress on vegetation restoration in the dry-hot valleys of the Jinsha River. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(6), 101–104. (in Chinese with English abstract) [张金盈, 徐云, 苏春江, 刘兴亮 (2005) 金沙江干热河谷植被恢复研究进展. *水土保持研究*, 12(6), 101–104.]
- Zhang RZ (1992) *The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang X, Gao J, Lu P, Yan Y (2008) A novel speaker clustering algorithm via supervised affinity propagation. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (eds Adali T, Rao B), pp. 4369–4372. Las Vegas, USA.
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County. *Acta Botanica Yunnanica*, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. *云南植物研究*, 12, 301–310.]

(责任编辑: 王国宏 责任编辑: 闫文杰)

• 研究报告 •

雅砻江和大渡河干旱河谷植被物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响

韩 杰¹ 沈泽昊^{1*} 石松林^{2,3} 彭培好²

1 (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

2 (成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610058)

3 (中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 干旱河谷植被是我国西南横断山区的一类特殊的隐域性生态系统, 影响不同河谷之间植物群落差异的因素与作用大小尚不清楚。本研究调查了四川省雅砻江和大渡河流域干旱河谷段植被组成, 并比较了两个地区在植物多样性上的差别。结果表明: (1)影响两个地区植被类型的主要因素不同, 雅砻江干旱河谷植被主要受海拔和地形(坡度和坡向)影响, 大渡河干旱河谷植被主要受年平均降水量影响。(2)雅砻江和大渡河干旱河谷植物物种丰富度均随着年均温升高而降低。(3)坡向由北至南, 雅砻江干旱河谷灌木、草本物种丰富度减小, 而大渡河干旱河谷灌木、草本丰富度增加。(4)坡度越大, 雅砻江和大渡河干旱河谷灌木的丰富度越高。(5)雅砻江、大渡河干旱河谷植物 β 多样性受环境距离影响大, 受地理距离影响小。两条江植被间地理隔离效应约为地理距离产生差异的5倍。本研究弥补了干旱河谷研究中对于雅砻江和大渡河干旱河谷植物多样性研究的空白, 为相关区域植被保护提供了参考信息, 同时还为定量估计地理隔离效应对区域间生物多样性差异的影响提供了可行方法。

关键词: 干旱河谷; 植物多样性; 植被类型; 地理隔离

Comparison of plant species diversity and composition in the dry valleys of Yalong River and Dadu River: evaluating the effects of climate, topography and space

Jie Han¹, Zehao Shen^{1*}, Songlin Shi^{2,3}, Peihao Peng²

1 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

2 College of Tourism and Urban-rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610058

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875

Abstract: The vegetation of dry valleys is a suit of unique azonal ecosystems embedded in the Hengduan Mountains region of Southwest China, with the difference of plant communities between the valleys and the causal factors still elusive. In this study, we investigated the dry valleys of the Yalong River and the Dadu River and compared plant diversity. Different factors were found to impact the vegetation types between the two rivers. Elevation and topography (slope and aspect) impacted vegetation types of the Yalong River and mean annual precipitation impacted the Dadu River. Plant richness in the valleys of the two rivers decreased with greater mean annual temperature. From a north to south aspect, plant richness of the dry valley communities decreased in the Yalong River, while increased in the Dadu River. Richness of shrubs in both the Yalong River and the Dadu River were greater at increased slopes. The β diversity of plant community in the dry valleys of the Yalong River and the Dadu River was affected more by environmental than geographical distance. The effect of geographical isolation on the two rivers was approximately 5 times greater than the effect of geographical distance. This research fills the knowledge gap about plant diversity of dry valleys

收稿日期: 2015-11-01; 接受日期: 2016-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

vegetation in the Yalong River and the Dadu River, and reference information for vegetation conservation in the dry valleys of the two rivers. In addition, it provides a practical method for the quantitative assessment of geographical isolation effect on regional biodiversity difference.

Key words: dry valley; plant diversity; vegetation types; geographical isolation

生物多样性的分布、区域间的差异与联系及其成因是生物地理学和生态学的重要问题之一(Brown et al, 1996; Lomolino, 2000)。关于特定地点生物群落的物种多样性与组成,一般归因于群落构建过程的3种相互作用:来自区域种库的物种扩散过程、非生物环境的物种筛选过程和生物种间相互作用过程(Keddy, 1992; 牛克昌等, 2009)。区域尺度上植物群落组成之间的比较,可为验证不同过程的贡献及其作用尺度提供合适的条件(如Shen et al, 2012)。已有的干旱河谷多样性研究成果重点在于解析不同环境因子(特别是气候)对物种及其多样性分布的影响(Jacquemyn et al, 2001; Hawkins et al, 2003);与此同时,尽管空间独立于环境本身对种群隔离和群落构建的贡献已被普遍揭示(Tang et al, 2012; Wang, 2012; Siefert et al, 2013),但对于空间效应的内在机理及其关联尺度的认识仍存在争议。

中国亚热带地区的干旱河谷是西南横断山区一类独特的自然景观,是东南或西南季风与平行排列的纵向岭谷地貌相互作用的结果(张荣祖, 1992)。此类干旱河谷主要分布于西自藏东南的雅鲁藏布江,东到嘉陵江上游的甘南白水江等河谷区域,具有亚热带半干旱-干旱的局域气候特征。由于干旱少雨、土壤贫瘠,植被大多呈现低矮、多刺的稀树灌草丛外貌(刘伦辉, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000)。根据气温的差异,我国西南干旱河谷可被分为干热河谷、干暖河谷和干温河谷3类(张荣祖, 1992)。由于地形和气候的综合作用,西南干旱河谷植被分散镶嵌在横断山区诸山脉之间的下陷河谷底部,形成了彼此隔离的孤岛型分布。然而,从外貌和植物区系构成上却存在显著的相似性和联系(金振洲和欧晓昆, 2000)。

20世纪80年代以来,在全国及各省区植被专著编研工作基础上,关于西南干旱河谷植被、植物区系和植物多样性的研究逐渐增加(欧晓昆, 1988; 金振洲, 1998; 王勇军等, 2010),影响干旱河谷植被和景观的自然机制、人为因素及其环境效应得到进一步探讨(欧晓昆, 1988; 关文彬等, 2004; 冶民生等, 2006)。此前对于干旱河谷植被和植物多样性的研究

主要集中于单一流域,特别是金沙江(曹敏和金振洲, 1989; 欧晓昆和金振洲, 1996)、元江(金振洲, 1999b; 沈蕊等, 2010)、岷江(张文辉等, 2003; 冶民生等, 2004; 杨钦周, 2007)。尽管金振洲和欧晓昆(2000)对云南三江并流区域的干旱河谷植被进行了全面分析描述,金振洲(2002)对滇、川干暖河谷、干热河谷种子植物区系地理进行了系统总结,但是对不同流域干旱河谷植物多样性的比较研究却鲜见报道。

雅砻江和大渡河均位于横断山脉的四川部分。其中,雅砻江位于横断山脉腹地,在地貌上属于青藏高原东部向四川盆地过渡的川西高原;大渡河处于青藏高原东缘,紧邻川西高原区向川西南高山区的过渡带(张荣祖, 1992)。此前对于雅砻江和大渡河的生态和环境研究主要集中在对水利资源的利用及水电站修建后植被恢复方面(摆万奇等, 2003; 俞烜等, 2008; 万东辉, 2008),但对雅砻江及大渡河干旱河谷植物研究较少(何飞等, 2008; 刘中正等, 2013),对于植物多样性的研究则尚属空白。

本文通过对雅砻江和大渡河干旱河谷段的野外植被样方调查,探讨:(1)雅砻江和大渡河干旱河谷植物区系的科属组成特征;(2)雅砻江和大渡河干旱河谷植被的群落物种多样性及其影响因子的差异;(3)估计和比较环境差异和地理隔离对两条河流之间植物群落物种构成的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

雅砻江为长江上游金沙江的支流,发源于青海省巴颜喀拉山南麓,向东南流入四川西北部,在甘孜以下称雅砻江,沿大雪山西侧经新龙、雅江等县至四川边界攀枝花市注入金沙江(张荣祖, 1992)。本研究在雅砻江涉及的区域集中在四川西部的雅砻江中游,地理位置约27°43'41"-30°15'56" N, 100°44'28"-101°55'35" E。该区属高原半湿润气候,降水主要集中在5-10月(其中6-9月最多),冬半年(11月至翌年4月)降水量不到全年总量的6%,形成明显的干湿季节(张荣祖, 1992)。雅砻江干旱河谷平

均海拔2,600 m, 主要植被类型包括槲子栎(*Quercus baronii*)–锈鳞木犀榄(*Olea ferruginea*)林、云南松(*Pinus yunnanensis*)林, 及多种干旱小叶灌丛类型, 如余甘子(*Phyllanthus emblica*)群落等。山地植被垂直带谱包括云南松林或河谷硬叶常绿林(1,200–2,100 m), 云南松林与半湿性常绿阔叶林(1,800–2,600 m), 云南松林与铁杉(*Tsuga* spp.)针阔叶混交林(2,300–3,100 m), 云杉(*Picea* sp.)、冷杉(*Abies* sp.)林(3,500–4,100 m), 高山灌丛、草甸(3,900 m以上)(张荣祖, 1992)。

大渡河为长江上游的主要支流, 发源于青海境内巴颜喀拉山南麓, 向南流入四川, 经阿坝、甘孜、雅安、凉山、乐山等州市汇入岷江(张荣祖, 1992)。本研究在大渡河涉及的区域集中在川西大渡河中游, 地理位置29°38'33"–29°59'45" N, 102°12'14"–102°17'48" E。该区域具北亚热带季风气候, 干湿季明显。年均气温15.4℃, 年均相对湿度6%, 年蒸发量1,480.9 mm, 11月至次年4月为旱季(张荣祖, 1992)。大渡河流域干旱河谷主要分布于泸定县境内, 平均海拔1,300 m。河谷植被以云南松+马尾松(*Pinus massoniana*)林为代表, 同时也有仙人掌(*Opuntia* sp.)肉质灌丛和金合欢(*Acacia farnesiana*)–清香木(*Pistacia weinmannifolia*)群落分布。山地植被垂直带结构为: 云南松林(800–1,800 m), 常绿落叶

阔叶混交林(1,800–2,400 m), 铁杉针阔叶混交林(2,400–2,600 m), 云冷杉林(2,600–4,000m), 高山灌丛、草甸(4,000–4,500 m), 高山流石滩植被(4,500 m以上)(张荣祖, 1992; 沈泽昊等, 2001)。

1.2 数据收集

1.2.1 样地设置和植物群落调查

在雅砻江干旱河谷区域, 以雅江县为中心, 顺雅砻江沿江道路每隔10 km设置一条40 m × 10 m的植被调查样带, 共设置14条。样带地点远离公路50 m以外, 回避显著的植被干扰生境; 在盐源县四坪镇江边河谷设置1条100 m × 10 m的植被调查样带。

在大渡河干旱河谷区域, 沿泸定至康定间的沿江公路每隔10–20 km设置1条100 m × 10 m的植被调查样带, 共设置5条; 在泸定县下游到磨西河口北侧岸边设置1条250 m × 10 m的植被调查样带(图1)。

群落调查时, 均以10 m × 10 m样方为单位进行。调查每个样方中的乔木种类, 测量每一株DBH ≥ 2 cm个体的高度和胸径; 调查灌木和草本的种类, 目测种群多度级和百分比盖度。对于乔木幼苗, 以高度0.5 m为界分两类记录数量。同时, 用GPS记录仪测量每个样方的海拔; 用罗盘仪测定其坡向, 并转换为0°–180°的值域, 正北为0°, 正南为180°; 用坡度计测量坡度(范围0°–90°)。从谷底到坡顶脊将坡位分成5级: 1, 谷底; 2, 中下坡位; 3, 中坡位;

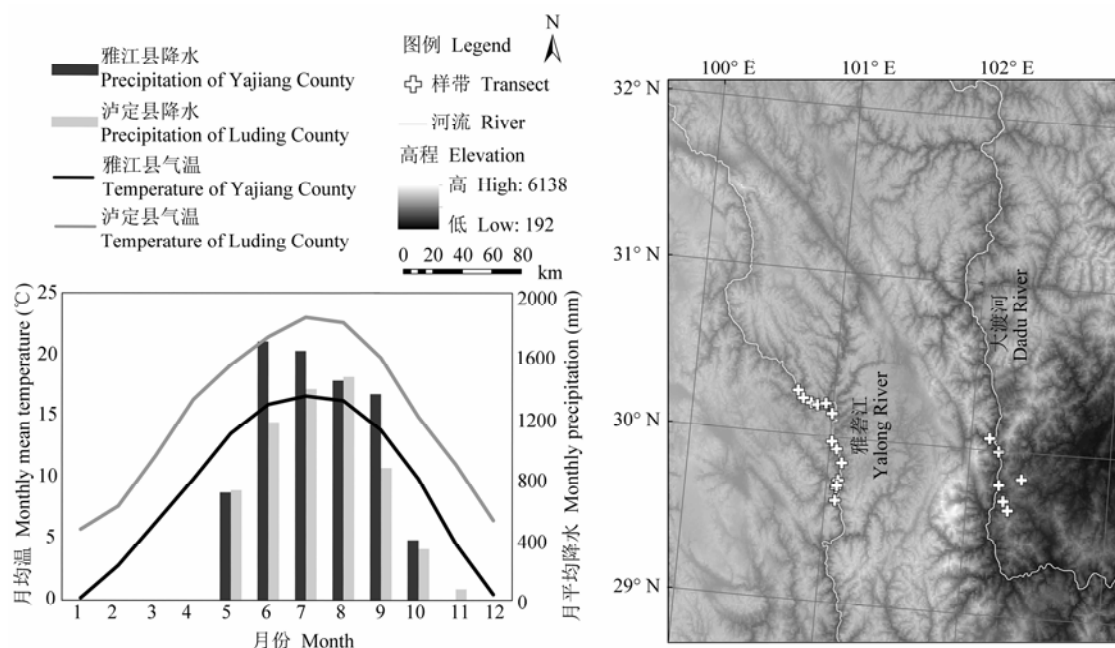


图1 雅砻江和大渡河干旱河谷的气候条件和调查样带分布

Fig. 1 Climate condition and the distribution of transect sites in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River

4, 中上坡位; 5, 坡顶脊。水平方向的坡形可分3级: 1, 凹坡; 2, 平直坡; 3, 凸坡。

1.2.2 气候数据

本研究采用WorldClim全球气候数据集(空间分辨率1 km)的月均温和月降水数据(<http://www.worldclim.com/>), 以及中国国家气象信息中心提供的中国西南地区206个气象台站54年(1960年10月至2014年2月)观测数据(<http://www.nmic.gov.cn/>), 结合3'空间分辨率(插值成100 m)的数字高程模型(SRTM, <http://datamirror.csdb.cn/>)进行海拔校正和插值, 生成各个调查样点的多年平均气候数据(刘晔, 2015)。

利用校正后的气候数据, 提取各样带相应经纬度坐标上的气温、降水数据。由于干旱河谷特殊的水热条件, 从中选出最具有代表性的7个气候数据指标(方精云等, 2002; Hawkins et al, 2003): 年均温(MAT); 最热月均温(WT); 最冷月均温(CT), 采用一月的均温值; 气温年较差(RANGE), 为最热月最高温与最冷月最低温的差值; 湿季降水量(WP); 干季降水量(DP)和降水季节性(PS), 即年内各月降水量的变异系数。

1.3 数据处理

1.3.1 植物群落数量分类分析及对环境的响应

考虑到双向指示种分析(TWINSPAN, Hill, 1979)方法仍是目前最常用的植物群落数量分类方法之一(沈泽昊等, 2000; Zhang et al, 2010)。本研究采用TWINSPAN对雅砻江和大渡河干旱河谷样带的物种构成进行植物群落分类, 依据群落冠层和地被层优势种组合命名。

采用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)探究雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落对环境响应的差异。典范对应分析可以基于环境约束进行植物群落和物种分布的排序, 且结果可与TWINSPAN分类相互补充。分析在PC-ORD软件(McCune & Mefford, 1999)中完成。

1.3.2 样带植物 α 多样性分析

采用稀疏法(rarefaction)估计雅砻江和大渡河干旱河谷的植物物种丰富度。稀疏法是根据物种在样方中的分布信息来估算物种丰富度的一种统计方法, 反映了物种构成的整体信息, 可估算从样方总体中随意抽取数个样方组成的样方亚组的物种数(Thomas et al, 2004), 适用于对具有不同取样强度的群落之间进行物种多样性比较。

采用在处理非平衡实验数据方面具有优势的多元统计的混合效应模型(Little et al, 1996)来分析雅砻江和大渡河干旱河谷植物物种丰富度在去除河流影响后对环境因子的响应。本文中, 河流作为随机效应变量; 而地形(海拔、坡向、坡度、坡位、坡形)及气候指标(年均温、最热月均温、最冷月均温、气温年较差、湿季降水量、干季降水量、降水季节性)作为固定效应变量。分析在统计软件R3.2.1(Bates et al, 2015)的lme4程序包中完成。

1.3.3 样带植物 β 多样性分析

样方间的 β 多样性是计算任意两个样方之间的物种构成差异, 用Jaccard相似性系数(C_j) (Jaccard, 1912)来评价。其计算公式是:

$$C_j = \frac{c}{a+b-c} \quad (1)$$

其中, c 表示两个样本共有物种数, a 和 b 分别表示样本A和B的物种总数。Jaccard相似性系数(C_j)的取值范围在[0, 1], 值越大, 说明相似性越高。计算所有样带间, 包括同一河谷样带间以及两条河谷样带间的Jaccard相似性系数, 构成相似性矩阵。在计算Jaccard相似性系数时, 不采用多度加权。分析用统计软件R3.2.1的vegan程序包完成。

为反映地理空间和环境差异两个因素对雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落构建影响的相对大小, 采用Mantel检验分析物种构成相似性矩阵分别与空间距离矩阵和环境距离矩阵之间的相关程度。为剔除地理距离矩阵和环境距离矩阵的相互作用, 采用偏Mantel检验分析物种构成相似性矩阵与另一距离矩阵的相关关系(Legendre & Legendre, 1998)。

生物分布的地理隔离效应首先是由空间距离引起的, 即IBD (isolation by distance)效应(Jenkins et al, 2010)。但研究表明地形等景观因素对生物分布与扩散的阻隔效应往往超出单纯的距离隔离效应(Ohsawa et al, 2008; Antillensis et al, 2012), 并存在与空间尺度相关联的效应变化(Rahbek et al, 2007)。为了探讨地理隔离效应影响群落物种构成变化的实质和作用尺度, 本文采取如下步骤计算成对样点之间的地理距离: (1)依据地理坐标计算点对之间的欧氏距离作为空间距离; (2)以雅砻江与大渡河干旱河谷之间最短直线距离(113 km)的不同倍数 i ($i = 1, 2, 3, \dots$)作为两江之间的地理隔离 K ; (3)在所得的地理距离矩阵中, 保持雅砻江和大渡河内部样点之

间距离不变; 对于雅砻江与大渡河之间样点对, 其地理距离为样点对的几何距离加 K 值; (4) 改变 K 值为113 km的不同倍数, 得到不同的距离矩阵, 分别做Mantel检验(Mantel, 1967)。分析在统计软件R3.2.1的vegan程序包实现。

2 结果

2.1 雅砻江与大渡河干旱河谷物种组成特点

雅砻江干旱河谷共记录到种子植物244种, 隶属于74科169属, 大渡河干旱河谷种子植物共241种, 隶属于80科176属。

雅砻江干旱河谷中植物属丰富度最高的前10科分别为: 菊科26属(38种)、豆科9属(15种)、禾本科9属(9种)、唇形科7属(12种)、蔷薇科6属(12种)、毛茛科4属(10种)、伞形科4属(5种)、荨麻科4属(4种)、茜草科3属(7种)和迎春花科3属(5种)。

大渡河干旱河谷中植物属丰富度最高的前10科为: 菊科18属(25种)、禾本科18属(21种)、豆科17属(24种)、大戟科6属(6种)、藜科6属(8种)、百合科5属(7种)、唇形科4属(6种)、茜草科4属(6种)、旋花科4属(4种)和漆树科3属(5种)。

雅砻江干旱河谷中的菊科和蔷薇科植物种数要多于大渡河干旱河谷, 而大渡河干旱河谷的禾本科和豆科植物种数要多于雅砻江。

2.2 雅砻江与大渡河干旱河谷物种丰富度特征

结果表明, 雅砻江和大渡河的物种丰富度随着调查面积增加而增加的速率接近。在相同的样方面积下, 雅砻江的干旱河谷物种丰富度略高于大渡河(图2)。

以河流作为随机效应变量, 其他环境因子作为固定效应变量的混合效应模型结果显示(表1), 无论是灌木层还是草本层, 河流差异本身就解释了样方物种丰富度的绝大部分变化量(灌木层92.1%, 草本层92.2%); 去除河流影响后, 影响雅砻江和大渡河干旱河谷灌木层和草本层丰富度的主要因素有年均温、坡向和坡度。在气候因素中, 两条河流干旱河谷灌木层和草本层的丰富度与年均温均呈显著负相关关系。地形因子中, 从北坡到南坡, 雅砻江干旱河谷灌木层和草本层的丰富度减小, 而大渡河干旱河谷灌木层和草本层的丰富度增大。雅砻江和大渡河干旱河谷灌木层丰富度与坡度显著正相关, 而草本层丰富度与坡度无显著关系。

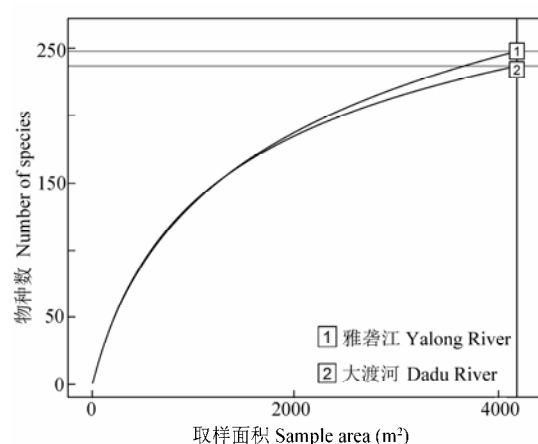


图2 雅砻江和大渡河干旱河谷植物种-面积曲线

Fig. 2 The species-area curve for plant species in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River

2.3 植物群落分类与排序

雅砻江和大渡河干旱河谷的植物群落可划分为5个类型(图3)。这5种群落类型在生境和物种构成上存在区别, 其中位于大渡河的群落类型A不同于其他植物群落(表2), 属于亚热带针阔叶混交林。无论是灌木密度还是草本密度, 群落类型A都是最大的。与大渡河相比, 雅砻江的植物群落中的灌木密度和草本密度要低。

CCA排序结果表明: 7个环境因子可以解释河谷群落物种构成变化的60.7%, 其中第一、二轴分别承担了19.5%和15.8%的信息量。第一轴主要反映了降水(包括年平均降水量和最干季降水量)和海拔的影响, 第二轴主要反映了坡向的影响(图4)。其中, 大渡河干旱河谷的样带主要分布于第二轴的右侧, 较为分散; 而雅砻江干旱河谷的样带主要分布在第二轴的左侧, 较为集中。除位于第二轴右侧海拔较低(1,400 m)的雅砻江样带外, 左侧的雅砻江样带主要受海拔和坡度共同影响。相比于雅砻江干旱河谷段, 大渡河干旱河谷段海拔更低, 降水更少, 植物群落类型主要受降水影响。

2.4 群落 β 多样性的Mantel检验

雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落间物种构成差异的关联因素见表3。雅砻江和大渡河干旱河谷样带间的Jaccard相似性系数与地理距离均为显著负相关关系($R = -0.576$)。考虑到地理距离的表达可能存在不确定性, 对其进行定量分析, 结果显示, 随着距离矩阵中雅砻江与大渡河干旱河谷之间样点对的距离倍增, Jaccard相似性系数与地理距离矩

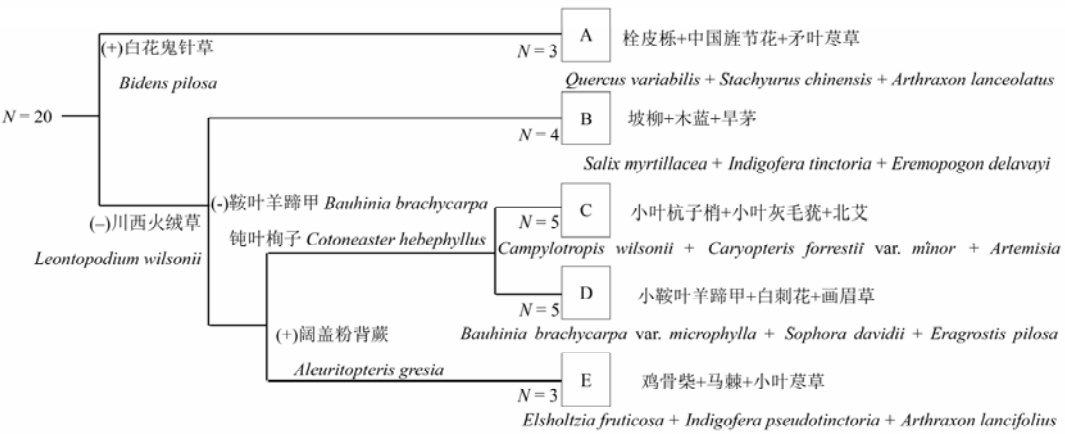


图3 雅砻江和大渡河干旱河谷植物TWINSpan群落分类图。(+)表示与分类聚组正相关, (-)表示与分类聚组负相关。
Fig. 3 Diagram of TWINSpan for community classification in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River. (+) means it is positive relation with classification, (-) means it is negative relation with classification.

表1 雅砻江和大渡河干旱河谷植物丰富度的混合效应模型模拟结果
Table 1 The mixed-effect model estimated for plant richness in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River

| | | | 年均温 Mean annual temperature | 坡向 Aspect | 坡度 Slope | 河流解释 River explanation | 限制性最大似然估计 REML criterion |
|--------------------|-------------------------|--|--------------------------------|--------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|
| 灌木层 Shrub layer | 雅砻江 The Yalong River | | -0.202** | -0.747** | 0.020* | 92.10% | 76.1 |
| | 大渡河 The Dadu River | | -0.432** | 1.005** | 0.016* | | |
| 草本层 Herb layer | 雅砻江 The Yalong River | | -0.537** | -0.687** | — | 92.20% | 104.9 |
| | 大渡河 The Dadu River | | -0.969** | 1.451** | — | | |

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. REML means restricted estimation maximum likelihood.

表2 雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落类型特征(平均值±标准差)
Table 2 The features of community types in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River (mean ± SD)

| 群落类型 Community type | 河流 River | 海拔 Elevation (m) | 灌木密度 Shrub density (/100 m ²) | 草本密度 Herb density (/100 m ²) | 植被型 Vegetation type |
|------------------------|--|---------------------|--|---|---|
| 类型A Type A | 大渡河 The Dadu River | 1,200 | 9 ± 4 | 41 ± 10 | 亚热带针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest in subtropical |
| 类型B Type B | 大渡河-雅砻江 The Dadu River-the Yalong River | 1,400 | 3 ± 1 | 19 ± 3 | 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved shrub |
| 类型C Type C | 雅砻江 The Yalong River | 2,600 | 4 ± 2 | 21 ± 4 | 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved shrub |
| 类型D Type D | 雅砻江 The Yalong River | 2,700 | 6 ± 3 | 26 ± 6 | 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved shrub |
| 类型E Type E | 雅砻江 The Yalong River | 2,500 | 4 ± 1 | 25 ± 7 | 暖性落叶阔叶灌丛 Warm deciduous broadleaved shrub |

群落类型A、B、C、D、E含义同图3。

The meaning of Type A, B, C, D and E are the same as in Fig. 3.

阵的相关系数先增加,后趋于平稳。当倍数增加到5倍时,相关系数接近平稳($R = -0.74$),表明雅砻江和大渡河干旱河谷间的地理隔离效应约为空间几何距离的5倍(图5)。雅砻江和大渡河干旱河谷样带间的Jaccard相似性系数与环境距离也呈显著负相关关系($R = -0.727$),且大于地理距离。

偏Mantel检验结果表明,在剔除环境距离影响

后,样带间的Jaccard相似性系数与地理距离没有显著的相关性($R = -0.013$, $P = 0.513$);而在剔除了地理距离影响后,雅砻江和大渡河样带间的Jaccard相似性系数与环境距离仍然为显著负相关($R = -0.543$, $P = 0.001$),说明环境差异是群落物种构成差异的主导因素。在5倍距离基础上,经偏Mantel检验发现,在剔除环境距离影响后,Jaccard相似性系数

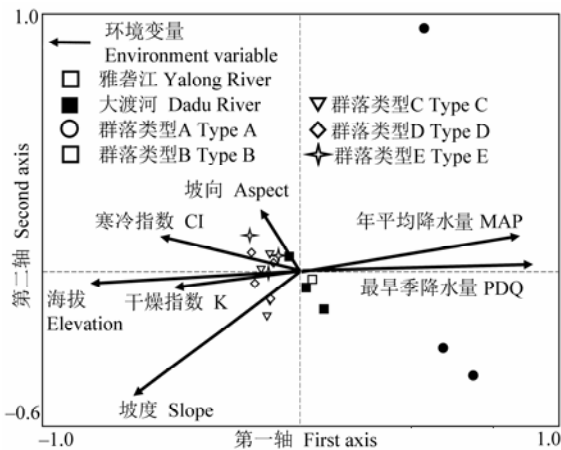


图4 雅砻江和大渡河干旱河谷植物群落的CCA排序。群落类型A、B、C、D、E含义同图3。
Fig. 4 The CCA ordination for plant communities in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River. MAP, Mean annual precipitation; PDQ, Precipitation in driest quarter. The meaning of Type A, B, C, D and E are the same as in Fig. 3.

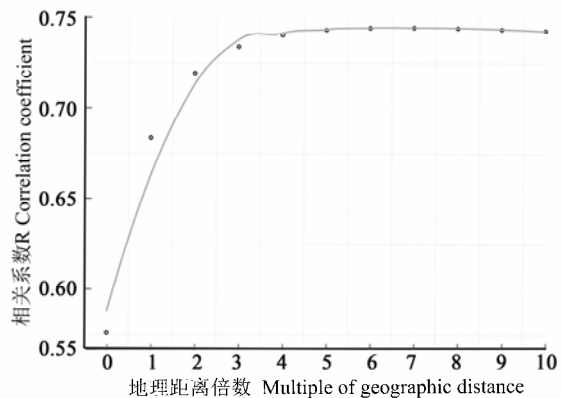


图5 雅砻江和大渡河干旱河谷地理隔离效应曲线。相关系数指的是Jaccard相似性系数矩阵与地理距离矩阵的相关系数。
Fig. 5 The geographical isolation curve in dry valleys of the Yalong River and the Dadu River. R means the correlation coefficient between Jaccard similarity index matrix and geography distance matrix.

与地理距离为显著负相关, 地理距离相比之前未加隔离处理的相关性大幅增加($R = -0.451$, $P = 0.001$), 与环境距离的影响近似。

3 讨论

群落数量分类和CCA排序结果表明, 尽管雅砻江和大渡河的干旱河谷段在地理位置上接近, 但两个地区的植物群落却不相似。影响雅砻江干旱河谷植被构成的主要因素为海拔和地形因子(坡度-坡

表3 雅砻江和大渡河干旱河谷植物物种构成相似性Mantel检验及偏Mantel检验
Table 3 The results of Mantel test and partial Mantel test for similarities of plant species composition between dry valleys of the Yalong River and the Dadu River

| 距离矩阵 Distance matrices | R | P |
|--|--------|-------|
| 环境 Environmental | -0.727 | 0.001 |
| 环境 地理距离 Environmental Geographical distance | -0.543 | 0.001 |
| 环境 5倍地理距离 Environments 5 × Geographical distance | -0.401 | 0.002 |
| 地理距离 Geographical distance | -0.576 | 0.001 |
| 地理距离 环境 Geographical distance Environments | -0.013 | 0.513 |
| 5 × 地理距离 环境 5 × Geographical distance Environments | -0.451 | 0.001 |

向), 而影响大渡河植被构成的主要因素为降水。
相较于植被构成, 海拔对于雅砻江-大渡河干旱河谷区域的灌木层-草本层的丰富度没有显著影响。从数字高程模型中可以看出, 雅砻江与大渡河干旱河谷段两个地区的海拔高程有很大区别。大渡河干旱河谷段平均海拔为1,338 m, 而雅砻江干旱河谷段平均海拔为2,632 m, 相差约1,300 m。海拔上的差别导致雅砻江干旱河谷段比大渡河干旱河谷段温度要低约8℃。雅砻江-大渡河干旱河谷区域气温较高, 年蒸发量大; 气温高, 使得土壤水分大量蒸发而干燥化。温度为物种多样性的限制因子, 温度越高, 多样性越低(刘兴良等, 2001)。海拔的作用很大程度上体现在温度的差异上, 可能因此导致大渡河干旱河谷段的多样性要低于雅砻江。

生物地理学的经典理论强调了距离对生物扩散和生物多样性维持的影响(Wright, 1943; Slatkin, 1993)。地理环境的不同能够影响物种丰富度及其构成(Preston, 1962), 而景观尺度的时空格局对于物种遗传变异有很大的影响(Sork et al, 1999; Kudoh, 2001)。研究表明, 随着地理距离的增加, 基因流减少, 物种间的遗传分化增加, 物种构成越不相似, 这是由于地理距离而产生的地理隔离(Slatkin & Maddison, 1990; Manel et al, 2003; Manel & Segelbacher, 2009)。同时, 空间两点之间的生物隔离效应并非简单地取决于几何距离, 地形起伏和景观异质性所造成的阻隔效应同样显著(Sork et al, 1999; Storfer et al, 2007; Manel & Segelbacher, 2009)。当存在高山阻隔时, 花粉和种子的散播困难, 物种间不

能进行有效地交流。由地形阻隔产生的生物隔离分化效应远远强于仅由空间距离所导致的隔离效应,这也是山地被认为是全球物种分化热点区域的关键原因(Fjelds  et al, 2012)。然而,恰当地定量评估景观隔离效应一直是生物地理-景观生态以及种群遗传研究中的一个挑战(沈泽昊和吉成均, 2010)。

雅砻江和大渡河之间隔着大雪山脉(最高海拔7,556 m)(沈泽昊, 2001),这对于山脉两边低海拔干旱河谷植物的扩散交流显然具有强烈的地理隔离作用。群落 β 多样性的Jaccard指标定量反映了群落物种构成的变化程度,可受群落间地理距离和环境差异的共同影响。对雅砻江和大渡河干旱河谷 β 多样性的偏Mantel检验结果表明,当位于两江之间的样方对的地理距离用两江河谷之间最小几何距离的倍数表示时,随着反映地理隔离的地理距离倍增,雅砻江与大渡河干旱河谷物种构成相似性系数与地理距离矩阵相关性先迅速增加,直至地理距离相当于几何距离的5倍才趋于平稳。可见,在本研究的调查区域,采用约5倍的几何距离来表达雅砻江与大渡河干旱河谷之间样方对的地理距离或是一个比较合理的估计,能够较好地反映地理隔离对两地植物群落物种构成差异的影响。

本研究对雅砻江和大渡河干旱河谷的植物群落进行了调查,对群落组成上的地形隔离效应首次提出了定量估计。由于样本量有限,文中所得结果的普遍性还有待进一步检验。另一方面,样方生境条件的气候变量值是用较粗空间分辨率-较大误差的区域气候数据降尺度生成的。尽管该方法可以解决区域尺度气象观测站点稀疏、气候变量空间分布数据不足的限制,是当前用气候条件解释区域植物群落结构与组成变化的常规做法,但气候变量数据与群落物种构成数据在空间尺度上的不匹配是这类数据应用中不可回避的缺陷,也是本研究结果解释率较低的主要原因。因此对研究结果的应用还需谨慎,不宜做过于精细的推断。

参考文献

- Antillensis E, Barker BS, Rodríguez-Robles JA, Aran VS, Waide RB, Cook JA (2012) Sea level, topography and island diversity: phylogeography of the Puerto Rican Red-eyed Coquí. *Molecular Ecology*, 21, 6033–6052.
- Bai WQ, Zhang YL, Bao WK (2003) Landscape patterns and dynamics in the upper reaches of Dadu River. *Journal of Natural Resources*, 18(1), 75–80. (in Chinese with English

- abstract) [摆万奇, 张镜铨, 包维楷 (2003) 大渡河上游地区景观格局与动态. *自然资源学报*, 18(1), 75–80.]
- Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48.
- Brown JH, Stevens GC, Kaufman DM (1996) The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 597–623.
- Cao M, Jin ZZ (1989) Classification of vegetation in Qiao Jia dry-hot river valley of Jinsha River, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 11, 324–336. (in Chinese with English abstract)
- [曹敏, 金振洲 (1989) 云南巧家金沙江干热河谷的植被分类. *云南植物研究*, 11, 324–336.]
- Fang JY, Song YC, Liu HY, Piao SL (2002) Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122.
- Fjelds  J, Bowie RCK, Rahbek C (2012) The role of mountain ranges in the diversification of birds. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 249–265.
- Guan WB, Yan MS, Ma KM, Liu GH, Wang XL, Tang H (2004) The relationships between plant community species turnover rates and environmental factors in the arid valley of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 2367–2373. (in Chinese with English abstract) [关文彬, 冶民生, 马克明, 刘国华, 汪西林, 谭辉 (2004) 岷江干旱河谷植物群落物种周转速率与环境因子的关系. *生态学报*, 24, 2367–2373.]
- He F, Xie W, Liu XL, Ma QY, He YP, Chen JH, Cai XH, Long TL (2008) Pteridophytic flora of the upper reaches of the Yalong River in western Sichuan Province. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 27, 276–280. (in Chinese with English abstract) [何飞, 谢伟, 刘兴良, 马钦彦, 何亚平, 陈俊华, 蔡小虎, 隆廷伦 (2008) 川西雅砻江上游地区蕨类植物区系研究. *成都大学学报(自然科学版)*, 27, 276–280.]
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guegan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- Hill MO (1979) TWINSPLAN—A Fortran Program for Arranging Multivariate Data in an Ordered Two-way Table by Classification of the Individuals and Attributes. Cornell University Press, Ithaca.
- Jaccard P (1912) The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytologist*, 11, 37–50.
- Jacquemyn H, Butaye J, Hermy M (2001) Forest plant species richness in small, fragmented mixed deciduous forest patches: the role of area, time and dispersal limitation. *Journal of Biogeography*, 28, 801–812.
- Jenkins DG, Carey M, Czerniewska J, Fletcher J, Hether T, Jones A, Knight S, Knox J, Long T, Mannino M, McGuire M, Riffle A, Segelsky S, Shappell L, Sterner A, Strickler T, Tursi R (2010) A meta-analysis of isolation by distance: relic or reference standard for landscape genetics? *Ecogra-*

- phy, 33, 315–320.
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plant in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1998) 滇川干暖河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (1999a) The floristic study on seed plants in the dry-hot valleys, Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 19, 1–14. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999a) 滇川干热河谷种子植物区系成分研究. *广西植物*, 19, 1–14.]
- Jin ZZ (1999b) A phytosociological study on the semi-savanna vegetation in the dry-hot valleys of Yuanjiang River, Yunnan. *Guihaia*, 19, 289–302. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999b) 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究. *广西植物*, 19, 289–302.]
- Jin ZZ (2002) Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys in Yunnan and Sichuan Provinces. Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Keddy PA (1992) Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 3, 157–164.
- Kudoh H (2001) Gene flow among plant populations in ecological landscape. *Japanese Journal of Ecology*, 84, 1285–1293.
- Legendre P, Legendre L (1998) *Numerical Ecology*, pp. 139–141, 247–258, 279. Elsevier, Amsterdam.
- Lomolino MV (2000) Ecology's most general, yet protean pattern: the species–area relationship. *Journal of Biogeography*, 27, 17–26.
- Liu LH (1989) Vegetational types of the valleys in the Hengduan Mountains region. *Mountain Research*, 7, 175–182. (in Chinese with English abstract) [刘伦辉 (1989) 横断山区干旱河谷植被类型. *山地研究*, 7, 175–182.]
- Liu XL, Mu CL, Xiang CH, Su YM (2001) Natural features of arid river valleys in western Sichuan and their vegetation restoring and reestablishing ways. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 22(2), 10–17. (in Chinese with English abstract) [刘兴良, 慕长龙, 向成华, 宿以明 (2001) 四川西部干旱河谷自然特征及植被恢复与重建途径. *四川林业科技*, 22(2), 10–17.]
- Liu Y (2015) Plant Diversity and Biogeography of the Arid Valleys in Southwest China. PhD dissertation, Peking University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘晔 (2015) 中国西南干旱河谷植物多样性与生物地理. 博士学位论文, 北京大学, 北京.]
- Liu ZZ, Peng PH, Zhou ZK (2013) Application of 3S techniques in vegetation type investigation in Yajiang. *Geospatial Information*, 11(2), 78–79. (in Chinese with English abstract) [刘中正, 彭培好, 周正坤 (2013) 基于3S技术的雅江县植被类型调查与分析. *地理空间信息*, 11(2), 78–79.]
- Little RC, Milliken GA, Stroup WW (1996) *SAS System for Mixed Models*. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Manel S, Schwartz MK, Luikart G, Taberlet P (2003) Landscape genetics: combining landscape ecology and population genetics. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 189–197.
- Manel S, Segelbacher G (2009) Perspectives and challenges in landscape genetics. *Molecular Ecology*, 18, 1821–1822.
- Mantel N (1967) The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research*, 27, 209–220.
- McCune B, Mefford M (1999) *PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data*, version 4.0. MjM Software Design, Gleneden Beach, OR, USA.
- Niu KC, Liu YN, Shen ZH, He FL, Fang JY (2009) Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory. *Biodiversity Science*, 17, 579–593. (in Chinese with English abstract) [牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 何芳良, 方精云 (2009) 群落构建的中性理论和生态位理论. *生物多样性*, 17, 579–593.]
- Ohsawa T, Saito Y, Sawada H, Ide Y (2008) Impact of altitude and topography on the genetic diversity of *Quercus serrata* populations in the Chichibu Mountains, central Japan. *Flora*, 203, 187–196.
- Ou XK (1988) The study of flora in Yuanmou dry-hot river valley. *Acta Botanica Yunnanica*, 10, 11–18. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1988) 元谋干热河谷植物区系研究. *云南植物研究*, 10, 11–18.]
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot valley. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. *武汉植物学研究*, 14, 318–322.]
- Preston FW (1962) The canonical distribution of commonness and rarity. *Ecology*, 43, 185–215.
- Rahbek C, Gotelli NJ, Colwell RK, Entsminger GL, Rangel TFL, Graves GR (2007) Predicting continental-scale patterns of bird species richness with spatially explicit models. *Proceedings of the Royal Society of London B. Biological Sciences*, 274, 165–174.
- Siefert A, Razvenscroft C, Weiser MD, Swenson NG (2013) Functional beta-diversity patterns reveal deterministic community assembly processes in eastern North American trees. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 682–691.
- Shen R, Zhang JL, He B, Li F, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuanjiang River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 2821–2825. (in Chinese with English abstract) [沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. *生态环境学报*, 19, 2821–2821.]
- Shen ZH, Fang JY, Liu ZL, Wu J (2001) Patterns of biodiversity

- sity along the vertical vegetation spectrum of the east aspect of Gongga Mountains. *Acta Phytocologica Sinica* 25, 721–732. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 方精云, 刘增力, 伍杰 (2001) 贡嘎山东坡植被垂直带谱的物种多样性格局分析. *植物生态学报*, 25, 721–732.]
- Shen ZH, Fei SL, Feng JM, Liu YN, Liu ZL, Tang ZY, Wang XP, Wu XP, Zheng CY, Zhu B, Fang JY (2012) Geographical patterns of community-based tree species richness in Chinese mountain forests: the effects of contemporary climate and regional history. *Ecography*, 35, 1134–1146.
- Shen ZH, Ji CJ (2010) Landscape genetics: principles and its applications for the genetic effects of habitat fragmentation. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 5066–5076. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 吉成均 (2010) 景观遗传学原理及其在生境片段化遗传效应研究中的应用. *生态学报*, 30, 5066–5076.]
- Shen ZH, Jin YX, Zhao ZE, Wu JQ, Huang HD (2000) A study on the quantitative classification of forest communities of Dalaoling region at the Three Gorges. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 18, 99–107. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 金义兴, 赵子恩, 吴金清, 黄汉东 (2000) 三峡大老岭地区森林群落的数量分类研究. *武汉植物学研究*, 18, 99–107.]
- Slatkin M, Maddison W (1990) Detecting isolation by distance using phylogenies of genes. *Genetics*, 126, 249–260.
- Slatkin M (1993) Isolation by distance in equilibrium and non-equilibrium populations. *Evolution*, 47, 264–279.
- Sork VL, Nason J, Campbell DR, Fernandez JF (1999) Landscape approaches to historical and contemporary gene flow in plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 14, 219–224.
- Storfer A, Murphy MA, Evans JS, Goldberg CS, Robinson S, Spear SF (2007) Putting the “landscape” in landscape genetics. *Heredity*, 98, 128–142.
- Tang ZY, Fang JY, Chi XL, Feng JM, Liu YN, Shen ZH, Wang XP, Wang ZH, Wu XP, Zheng CY, Gaston KJ (2012) Patterns of plant beta-diversity along elevational and latitudinal gradients in mountain forests of China. *Ecography*, 35, 1083–1091.
- Thomas K, Anna MH, Thomas W (2004) Rarefaction method for assessing plant species diversity on a regional scale. *Ecography*, 27, 532–544.
- Wan DH, Xia J, Song XF, Liu SX (2008) Evaluation of ecological water requirement based on hydrological cycle analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39, 994–1000. (in Chinese with English abstract) [万东辉, 夏军, 宋献方, 刘苏峡 (2008) 基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算. *水利学报*, 39, 994–1000.]
- Wang IJ (2012) Environmental and topographic variables shape genetic structure and effective population sizes in the endangered Yosemite toad. *Diversity and Distributions*, 18, 1033–1041.
- Wang YJ, Huang CD, Zhang J, Yang WQ, Wang XS (2010) Species diversity, biomass and their relationship of shrub-beries in an arid valley of the Minjiang River. *Arid Zone Research*, 27, 567–572. (in Chinese with English abstract) [王勇军, 黄从德, 张健, 杨万勤, 王宪帅 (2010) 岷江干旱河谷灌丛物种多样性. 生物量及其关系. *干旱区研究*, 27, 567–572.]
- Wright S (1943) Isolation by distance. *Genetics*, 28, 114–138.
- Ye MS, Guan WB, Tan H, Ma KM, Liu GH, Wang XL (2004) The α diversity of shrubs community in the arid valley of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1123–1130. (in Chinese with English abstract) [冶民生, 关文彬, 谭辉, 马克明, 刘国华, 汪西林 (2004) 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. *生态学报*, 6, 1123–1130.]
- Ye MS, Guan WB, Wu B, Ma KM, Liu GH, Wang XL, Chen JY (2006) Plant community complexity in the arid valley of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 3159–3165. (in Chinese with English abstract) [冶民生, 关文彬, 吴斌, 马克明, 刘国华, 汪西林, 陈箐妍 (2006) 岷江干旱河谷植物群落的复杂性. *生态学报*, 26, 3159–3165.]
- Yang QZ (2007) Study on the arid-valley scrubs in the upper reaches of Minjing River. *Journal of Mountain Research*, 25(1), 1–32. (in Chinese with English abstract) [杨钦周 (2007) 岷江上游干旱河谷灌丛研究. *山地学报*, 25(1), 1–32.]
- Yu X, Feng L, Yan DH, Jia YW, Yang SH, Hu DL, Zhang MZ (2008) Development of distributed hydrological model for Yalongjiang River Basin. *Journal of China Hydrology*, 28(3), 49–53. (in Chinese with English abstract) [俞烜, 冯琳, 严登华, 贾仰文, 杨舒媛, 胡东来, 张明珠 (2008) 雅砻江流域分布式水文模型开发研究. *水文*, 28(3), 49–53.]
- Zhang JT, Li S, Li M (2010) A comparison of self-organizing feature map clustering with twinspace and fuzzy C-means clustering in the analysis of woodland communities in the Guancen Mts, China. *Community Ecology*, 11, 120–126.
- Zhang RZ (1992) The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang WH, Lu T, Zhou JY, Kang YX, Ma KM, Liu GH (2003) A floristic study on seed plants in the upper reaches of Minjiang River. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 23, 888–894. (in Chinese with English abstract) [张文辉, 卢涛, 周建云, 康永祥, 马克明, 刘国华 (2003) 岷江上游流域种子植物区系研究. *西北植物学报*, 23, 888–894.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 样带信息

Appendix 1 Information of belt transects

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015300-1.pdf>

韩杰, 沈泽昊, 石松林, 彭培好. 雅砻江和大渡河干旱河谷植被物种多样性比较: 气候、地形与空间的影响. 生物多样性, 2016, **24** (4): 421–430.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015300>

附录1 样带信息

Appendix 1 Information of belt transects

| 样带 | 海拔 Elevation (m) | 坡向 Aspect (°) | 坡度 Slope (°) | 坡位 Position | 坡形 Shape |
|---------|------------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| 大渡河样带1 | 1,236 | 60 | 30 | 4 | 2 |
| 大渡河样带2 | 1,432 | 140 | 38 | 4 | 2 |
| 大渡河样带3 | 1,424 | 65 | 32 | 4 | 2 |
| 大渡河样带4 | 1,540 | 45 | 36 | 4 | 2 |
| 大渡河样带5 | 1,250 | 65 | 18 | 4 | 2 |
| 大渡河样带6 | 1,200 | 150 | 30 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带1 | 2,588 | 135 | 30 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带2 | 2,563 | 105 | 36 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带3 | 2,590 | 100 | 32 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带4 | 2,725 | 180 | 35 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带5 | 2,736 | 148 | 38 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带6 | 2,735 | 135 | 35 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带7 | 2,656 | 85 | 35 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带8 | 2,693 | 135 | 25 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带9 | 2,693 | 150 | 30 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带10 | 2,520 | 135 | 38 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带11 | 2,554 | 180 | 30 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带12 | 2,612 | 90 | 38 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带13 | 2,552 | 110 | 36 | 4 | 2 |
| 雅砻江样带14 | 1,236 | 60 | 30 | 4 | 2 |

坡位分成5级: 1, 谷底; 2, 中下坡位; 3, 中坡位; 4, 中上坡位; 5, 坡顶脊。坡形分成3级, 1, 凹坡; 2, 平直坡; 3, 凸坡。
Position was classified into five levels: 1, valley bottom; 2, lower side slope; 3, mid-slope; 4, upper side slope; 5, hilltop. Slope shape was classified into three levels: 1, concave; 2, straight; 3, convex.

• 研究报告 •

元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较

张志明¹ 沈蕊¹ 张建利² 徐倩¹ 罗园³遇翹楚¹ 张秋霞¹ 欧晓昆^{1*}

1 (云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

2 (贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

3 (云南省环境工程评估中心, 昆明 650032)

摘要: 土壤种子库与地上植被之间的关系和相似性是长期争议的群落生态学问题之一。本研究旨在通过比较元江流域干热河谷典型灌草丛群落与其土壤种子库的物种组成, 探讨土壤种子库与地上植物群落存在怎样的相似性关系。在元江干热河谷上、中、下游选取典型灌草丛群落, 采用典型样地调查法进行植物群落调查, 同时在样方内采集0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm三层土壤样品, 采用萌发实验研究土壤种子库的种子数量和物种组成, 并与地上植物群落进行比较。结果表明: (1)全部调查样方的地上植被中共包含种子植物76种, 隶属于25科64属, 主要集中在豆科、禾本科、菊科、大戟科, 群落物种组成以多年生草本为主、灌木为辅; (2)土壤种子库中共发现33种植物, 隶属于14科32属, 以旱生型禾本科、豆科、菊科物种为主; (3)土壤种子库中的植物种子密度在表层土壤中最, 随着土层的加深而递减; (4)各样方的土壤种子库与地上群落共有物种数较少, 相似性较低; 土壤种子库密度与地上群落的种群密度没有显著的相关性。总体而言, 本研究发现元江流域干热河谷典型灌草丛群落其土壤种子库与地上群落之间没有显著的相关性, 并且地上群落和土壤种子库都有外来入侵种类。

关键词: 干热河谷; 土壤种子库; 地上植物群落; 物种组成; 相似性; 元江

Comparisons of species composition between soil seed banks and above-ground plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River

Zhiming Zhang¹, Rui Shen¹, Jianli Zhang², Qian Xu¹, Yuan Luo³, Qiaochu Yu¹, Qiuxia Zhang¹, Xiaokun Ou^{1*}

1 Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming, 650091

2 Guizhou Provincial Mountain Resource Institute, Guiyang, 550001

3 Yunnan Environmental Engineer Assessment Center, Kunming 650032

Abstract: The relationship between the seed bank and aboveground communities has attracted much interest among plant community ecologists. The objective of this study was to address the relationships between soil seed banks and aboveground plant communities by comparing the species composition in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. Typical shrub-grass communities in the dry-hot valley were selected and five plots were established in upper, middle, and lower sections of the Yuanjiang River watershed. A total of 100 sampling quadrats were collected, and plant communities were surveyed. In addition, soil samples were collected in three layers (0–5 cm, 5–10 cm, and 10–15 cm) in each community sample. The seed banks from the soil samples were germinated in the lab and species were identified. The results showed that (1) 76 plant species belonging to 25 families and 64 genera were found in the aboveground plant communities. These species mainly belonged to Fabaceae, Poaceae, Asteraceae and Euphorbiaceae. (2) 33 plant species belonging to 14 families and 32 genera were found in the soil seed banks. These species mainly belonged to xeromorphy

收稿日期: 2015-09-18; 接受日期: 2016-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(31160101, 41371190, 41361046)、中国科学院“西部之光”人才培养项目, 贵州省社会攻关计划项目(黔科合SY[2015]3018)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xkou@ynu.edu.cn

Gramineae. (3) In three soil layers, the proportion of the surface soil seed banks was the largest, and the numbers of seeds decreased as the depth of soil increased. (4) For each plot, few common species were found between the soil seed banks and plant communities, and thus their similarity is low. In summary, there were no significant correlations between the soil seed banks and aboveground plant communities. Moreover, several invasive species can be found both in the seed banks and aboveground plant communities.

Key words: dry-hot valley; soil seed banks; above ground plant communities; species composition; similarity; Yuanjiang River

土壤种子库(soil seed bank)指存在于土壤上层凋落物内和土壤中全部存活种子的总和(Roberts, 1981)。这些种子作为重要的种源储备库,萌发后参与地上植被的自然更新和演替,直接影响着群落的组成与结构,土壤种子库的种子储量、种类组成与结构对群落更新具有重要影响。因此土壤种子库是植被潜在更新能力的重要组成部分,是植被动态的重要制约因素,影响着生态系统的抗干扰能力和恢复能力(Pugnaire & Lázaro, 2000; 白文娟等, 2012)。大多数情况下,当地上植物群落受到干扰、群落生境发生改变时,土壤种子库可以作为植物群落恢复的主要种源(马坚等, 2007)。

土壤种子库与地上植被之间的关系和相似性是长期争议的群落生态学问题之一(赵凌平等, 2008)。通常地上植被与土壤种子库有着密切的联系,土壤种子库的密度反映出土壤种子库的大小,同时也可以显示种子库的数量特征。一方面,地上植被的种子雨是土壤种子库的来源,地上植物种子的产量直接影响着土壤种子库的大小和动态;另一方面,土壤种子库的种子通过参与群落更新,进而影响地上植物群落结构与组成,乃至物种多样性的维持(刘建立等, 2005; 白文娟等, 2012)。相关研究显示,在不同的生境中土壤种子库与地上植被的相似关系存在较大差异(于顺利和蒋高明, 2003; 赵凌平等, 2008)。部分关于草地的研究结果显示种子库与地上群落物种组成的相关性微弱(孙建华等, 2005)或不显著(Falinska, 1999; Thompson, 2000; Olano et al, 2002; 李峰等, 2007),也有部分研究发现草地种子库与地上群落在组成上具有显著的相关性(赵丽娅等, 2003; 詹学明等, 2005)。这种关系主要受群落类型、演替阶段和环境因子(如干燥度等)等因素的影响,迄今尚未得出一致的结论(赵凌平等, 2008; 白文娟等, 2012)。

由于典型的干热生境和独特的地势地貌特征,

干热河谷有着以热带区系成分为主的耐干旱型植被,其群落外貌以稀树灌木草丛为主(金振洲, 2002)。此外干热河谷受人为干扰严重,植被普遍稀疏、低矮,表现为稀树草丛、稀灌草丛和草丛等外貌特征(金振洲, 2002),并处于脆弱退化状态(钟浩翔, 2000; 方海东等, 2009)。前人针对金沙江干热河谷土壤种子库特征以及种子库与地上植被之间的关系开展了许多研究(沈有信等, 2003; 罗辉和王克勤, 2006a, b; 张建利等, 2008; 张建利和毕玉芬, 2009),其结果也表现出明显的不一致(沈有信等, 2003; 罗辉和王克勤, 2006a; 张建利等, 2008)。

云南的干热河谷以元江流域的元江坝和金沙江流域的元谋龙江段气候最为典型。但迄今对元江干热河谷的土壤种子库的研究较少,关于种子库与地上植被之间的联系尚未见报道。元江干热河谷的土壤种子库与地上植被具有怎样的特征?两者之间存在怎样的关联?该关系是否存在一定的空间异质性?对这些问题的回答一方面有助于了解土壤种子库对地上植物群落结构与组成,乃至物种多样性维持的贡献,另一方面可以为干热河谷中严重退化的植被群落恢复提供参考依据。

本研究旨在通过调查元江流域干热河谷区典型灌草丛群落及其土壤种子库,了解土壤种子库的物种组成、数量和空间分布等特征及其与地上植物群落的相互关系,以完善元江流域干热河谷现有植被资料,为干热河谷环境演变、退化植被恢复和生物多样性保护提供理论依据,并希望能对生态工程和林业措施的实施提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

元江干热河谷呈西北-东南走向狭长斜贯于云南高原的中南部,经楚雄、双柏、新平、元江、红河、元阳至蒙自的曼耗河谷,约在23°12'-25°10' N和

100°30'–103°30' E范围之内(图1)(金振洲和欧晓昆, 2000), 海拔高度在300–1,400 m。属北热带特征的干热气候, 河谷地带的年平均气温23.8℃, 最冷月均温16.8℃, 最热月均温28.6℃, 全年日平均气温>10℃, ≥10℃年积温达8,700℃。年平均降水量600–800 mm, 干湿季节分明, 干季为11月至翌年4月, 雨季为5–10月。年内干燥度在0.94–7.94之间, 全年干燥度平均为1.89。太阳辐射充裕, 年日照总时数>2,291.7 h, 河谷年辐射量>126.495 kcal/cm², 有效生理辐射量63.248 kcal/cm²。全年盛行东南风, 年均大风(≥8级)天数为14.3天(何永彬, 2002)。河谷内土壤主要是燥红土, 土壤有机质分解快、含量低(朱华, 1990)。

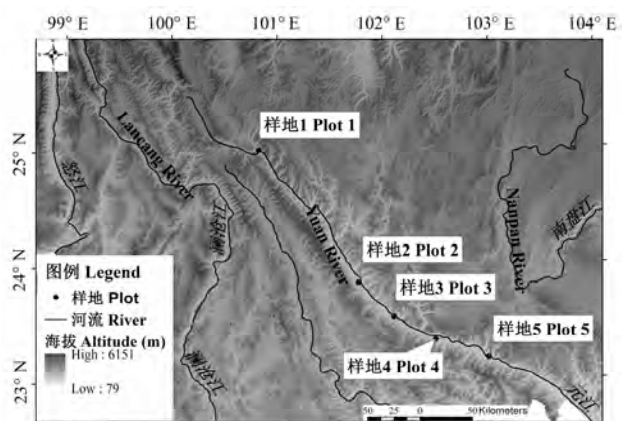


图1 研究样地的分布图

Fig. 1 Distribution of the sampling plots

1.2 样地设置及调查

根据环境和植被状况等特征, 沿元江流域干热河谷区域布设样点, 并选择典型样地(图1)。各个样地海拔差异较大, 样地1位于祥云县境内, 称为祥云样地, 海拔最高, 为1,396 m; 样地2为新平样地, 海拔为467 m; 样地3为元江样地, 海拔为402 m; 样地4位于红河县境内, 称为红河样地, 海拔为735 m; 样地5位于元阳县, 称为元阳样地, 海拔最低, 为241 m。取样均严格限制在干热河谷的灌草丛群落中, 因此取样在坡面上距江岸垂直距离0–200 m的地段内进行。

采用典型样地法(马克平和黄建辉, 1995; 贺金

生和江明喜, 1998)对元江干热河谷灌草丛群落进行调查。选取群落特征典型且分布较均匀、地形条件适宜的位置布设样地。各样地内随机设置5个5 m×5 m的样方调查灌木层, 15个1 m×1 m的小样方调查草本层, 5个样地一共设置100个样方。记录每个样方内的植物种类、数量、植株高度、盖度等指标, 并用GPS定位经、纬度和海拔高度。

1.3 土壤种子库野外取样

土壤种子库的取样于2010年5月初进行。在这个时段, 前一年进入土壤中的种子已经萌发, 而当年还未有新的种子输入, 因此土样中只包含持久土壤种子库, 为持久土壤种子库的较佳取样时间(Leckie et al, 2000; 罗辉和王克勤, 2006a)。

在上述5个样地中的每个5 m×5 m的样方中随机取3个重复(Lavorel et al, 1993)。然后利用土壤取样器, 在每个样点分0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm三层采集土样, 分装于土壤袋中, 贴上标签, 带回实验室风干, 以防种子萌发。

1.4 土壤种子库萌发实验

采用幼苗萌发法对土壤种子库进行种类鉴定。具体步骤为: 将土样中的石块、枯枝落叶拣出, 风干后将土样中的结块部分用母锤轻轻破碎, 尽量不破坏土壤结构, 保证种子不受到损伤(Holzel & Otte, 2004; Adams et al, 2005)。将不同层的土样各自均匀地铺于直径约为13 cm的塑料花盆内, 每个花盆底部都预先填上5–6 cm厚的烘烤处理的无种子基质(无种子基质置于恒温150℃的鼓风干燥箱内烘4 h后得到)。于实验室的温室大棚里进行萌发, 温度在25℃–35℃之间, 花盆顶部用一层透光和透气性良好的密织白布遮盖, 防止其他种子进入污染。种子发芽期间, 每天适当浇水, 使花盆内土壤保持湿润。一旦有种子萌发, 则视为有活力的种子, 该植物即为土壤种子库植物。进行物种鉴定, 并统计数量, 随之将鉴别出的植物从花盆中拔除。整个过程持续至盆中不再有幼苗长出, 然后再将盆中土样进行搅拌混合, 继续进行萌发观测, 直至土样中不再有种子萌发后结束萌发实验(唐勇等, 1997)。

考虑到春季是植物萌发的季节, 所以采回的土壤样品风干20天左右后进行低温处理保存, 尽量避免种子萌发和失去活性。萌发实验从次年的春季3月份开始持续到6月份, 前后共持续了3个月。

1.5 数据处理

1.5.1 土壤种子库密度和地上植物群落密度测定

种子密度是指单位面积上的种子数量。本研究中根据萌发法统计的种子数量与样方面积的比即为土壤种子库的密度。群落密度一般是指主要层或者主要生长型种群个体在单位面积内的数目和分散的疏密程度(金振洲, 2009), 即单位面积(S)内植物个体数量(N), 即 $D = N/S$ (宋永昌, 2000)。法瑞学派少用密度指标描述植物群落, 多用“多度”, 而“密度”或者“相对密度”是英美学派的重要指标(金振洲, 2009)。本研究中的群落密度即调查样方内植物个体数量与样方面积的比。

1.5.2 相似性分析

本研究采用Jaccard相似性系数对元江干热河谷不同灌草丛群落的土壤种子库的相似性以及同一群落的土壤种子库与地上植物群落的相似性进行分析(张金屯, 2004)。

Jaccard相似性系数: $q_{jk} = c/(a+b+c)$; Sorensen相似性系数: $q_{jk} = 2c/(a+b)$ 。其中 c 为两个样方共有的物种数, a 为存在于样方 j 中但不存在于样方 k 中的种数, b 为存在于样方 k 中但不存在于样方 j 中的种数(张金屯, 2004)。

根据Jaccard相似性原理, 当 q 为0.00–0.25时为极不相似, 当 q 为0.25–0.50时为中等不相似, 当 q 为0.50–0.75时为中等相似, 当 q 为0.75–1.00时为极相似(谭速进等, 2010)。

1.6 数据统计分析

本研究采用SPSS 13.0对样方数据和实验数据进行分析。由于各组数据在以自然对数变换后仍旧不符合正态分布和方差齐性原则, 所以采用非参数Wilcoxon秩和检验方法进行方差分析及检验。此外通过线性回归分析土壤种子库密度与其萌发后形成的群落密度之间的相关性, 并进行Pearson相关性检验。

2 结果

2.1 地上植物群落种类组成

元江流域干热河谷灌草丛群落样地内共包含76种植物, 隶属于25科64属(附录1)。其中豆科21种, 占植物种类总数的27.63%; 禾本科10种, 占13.16%; 菊科9种, 占11.84%; 大戟科4种, 占5.26%。莎草科、茜草科、马鞭草科、锦葵科各含3

种, 各占3.95%; 唇形科、蔷薇科、桑科各含2种, 各占2.63%; 其余14科均只含1个物种, 共占18.42%。由此可见, 该流域的植物种类主要集中在少数科内, 如豆科、禾本科、菊科、大戟科等, 优势现象明显。

2.2 土壤种子库数量特征

样地中土壤种子库的密度特征如附录1所示。种子库密度自元江上游到下游逐渐减少, 呈现下降趋势。位于上游的祥云样地种子库密度最大, 为 $2,026.67 \pm 130.13$ 粒/ m^2 ; 而位于下游的元阳样地种子库密度最低, 仅为 486.67 ± 70.40 粒/ m^2 。土壤种子库密度方差分析结果表明, 祥云、新平、元江、红河和元阳的土壤种子库密度差异显著($\chi^2 = 12.703$, $P = 0.013$)。

此外, 不同样地的土壤种子库中各植物种群密度差异较大(附录2)。在祥云、新平、元江和红河的样地土壤种子库中扭黄茅(*Heteropogon contortus*)种群密度最大, 均占总密度的30%以上, 其中在元江的密度甚至达到了76.09%; 而飞机草的种群密度在元阳最大, 其在新平和红河也仅次于扭黄茅位居第二。其他物种的活性种子在数量上分配很不均匀, 种群密度之间差异显著。

2.3 土壤种子库种类组成

物种种类成分及生活型组成是土壤种子库的重要特征。调查的元江流域干热河谷灌草丛群落样方内土壤种子库中共发现33种植物, 隶属于14科32属。其中豆科和菊科各7种, 分别占植物种类总数的21.21%; 禾本科6种, 占18.18%; 锦葵科和大戟科各2种, 分别占6.06%; 其他9科各含1个物种, 共占27.27%。由此可见, 该区内土壤种子库的植物种类主要集中在豆科、禾本科、菊科(附录1)等少数科内, 优势现象明显。此外, 禾本科的臂形草(*Brachiaria eruciformis*)、菊科的飞机草、大戟科的飞扬草为外来物种。

2.4 土壤种子库垂直分布规律

调查的样方土壤种子库密度随土壤深度增加而减小, 土壤种子库中的种子主要集中分布在浅层土壤(0–5 cm)中, 该层中种子的数量达到种子总数的57.8%以上, 而5–10 cm、10–15 cm土层中分布的种子较少(表1)。

2.5 不同样地间土壤种子库差异

元江干热河谷不同样地灌草丛群落土壤种子

表1 元江干热河谷不同灌草丛群落土壤种子库密度(有活力种子数/m²)和种子密度百分比在不同土壤深度的垂直分布
Table 1 Vertical distribution and percentage of seed bank density (seeds/ m²) at different soil depth in grass and shrub communities in the dry-hot valley of Yuanjiang River

| 分层 Layer | 祥云 Xiangyun | 新平 Xinping | 元江 Yuanjiang | 红河 Honghe | 元阳 Yuanyang | Chi-Square χ^2 | P |
|------------------------------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|------------------------|---------|
| 0–5 cm | 1,313.3±83.8 | 706.7±155.4 | 493.3±116.5 | 420.0±57.1 | 326.7±37.1 | 27.646 | <0.01** |
| 种子密度百分比 Seed density percentage | 64.80% | 65.43% | 80.44% | 57.80% | 67.12% | | |
| 5–10 cm | 426.7±41.9 | 240.0±52.4 | 100.0±23.9 | 193.3±50.2 | 106.7±33.0 | 26.822 | <0.05* |
| 种子密度百分比 Seed density percentage | 21.05% | 22.22% | 16.30% | 26.60% | 21.92% | | |
| 10–15 cm | 286.7±60.1 | 133.3±38.6 | 20.0±14.5 | 113.3±35.0 | 53.3±23.6 | 23.616 | <0.05* |
| 种子密度百分比 Seed density percentage | 14.15% | 12.35% | 3.26% | 15.60% | 10.96% | | |

表2 元江干热河谷不同样地间土壤种子库的相似性指数
Table 2 Similarity index of soil seed bank among five different plots in the dry-hot valley of Yuan River

| | 祥云 Xiangyun | 新平 Xinping | 元江 Yuanjiang | 红河 Honghe |
|--------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| 新平 Xinping | 0.292 | – | – | – |
| 元江 Yuanjiang | 0.217 | 0.167 | – | – |
| 红河 Honghe | 0.292 | 0.200 | 0.400 | – |
| 元阳 Yuanyang | 0.208 | 0.222 | 0.462 | 0.467 |

库的Jaccard相似性系数在0.167–0.467之间(表2), 处于中等不相似水平。此外, 不同样地间土壤种子库的相似性大小显示出相邻样地的土壤种子库相似性相对较高, 间隔样地间的相似性偏低, 即距离越近的样地其土壤种子库相似性越高, 反之则相似性越低。

2.6 土壤种子库与地上群落的关系

2.6.1 土壤种子库与地上群落的相似性

由表3可知, 元江干热河谷灌草丛地上群落和土壤种子库共有植物种类较少, 土壤种子库与地上群落的Jaccard相似性系数介于0.083–0.167之间。说明地上群落对土壤种子库的形成虽然有一定的促进作用, 但是综合贡献不大。此外, 5个样地的调查

结果都显示出地上群落的植物种类多于土壤种子库的植物种类(附录1, 附录2)。不同的样地中, 元阳土壤种子库与地上群落的相似性最高, 其次为祥云、红河、新平, 在元江样地相似性最低(表3)。这说明灌草丛群落样方中, 地上群落与土壤种子库的物种组成有较大的差异, 处于不相似水平。

元江流域干热河谷祥云($P = 0.396$)、新平($P = 0.659$)、元江($P = 0.769$)、红河($P = 0.884$)和元阳($P = 0.156$)样地的土壤种子库密度与地上植物群落密度没有显著的相关性。

2.6.2 土壤种子库与地上群落的入侵植物种类

外来入侵种有6种, 即牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)、小蓬草(*Conyza Canadensis*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、金腰箭(*Synedrella nodiflora*)、飞扬草(*Euphorbia hirta*)、大叶桉(*Eucalyptus robusta*)。其中地上群落有3种入侵种, 即臂形草、飞机草和飞扬草。土壤种子库中有6种, 即牛膝菊、小蓬草、飞机草、飞扬草、金腰箭, 以及大叶桉等种类。地上群落中的3种入侵植物除了臂形草外, 其他的在土壤种子库中都有贮存, 而另外3种(牛膝菊、小蓬草和大叶桉)则只在土壤种子库中有发现。

表3 土壤种子库与地上群落共有种比例以及其相似性系数
Table 3 The common species percentage and similarity index between soil seed banks and vegetation

| 样地 Plots | 共有种 No. of common species | 占地上植被种类百分比 % of common species in above-ground communities | 占土壤种子库种类百分比 % % of common specie in seed banks | Jaccard 相似性系数 Jaccard similarity index |
|--------------|------------------------------|---|---|---|
| 祥云 Xiangyun | 7 | 22.58 | 36.84 | 0.163 |
| 新平 Xinping | 4 | 13.79 | 33.33 | 0.108 |
| 元江 Yuanjiang | 2 | 11.76 | 22.22 | 0.083 |
| 红河 Honghe | 5 | 20.00 | 41.67 | 0.156 |
| 元阳 Yuanyang | 5 | 20.00 | 50.00 | 0.167 |

3 讨论

3.1 土壤种子库密度差异

本研究结果显示元江干热河谷调查样地的土壤种子库密度介于486.67–2,026.67粒/m²之间。沈有信等(2003)在金沙江流域的东川干热退化恢复区的土壤种子库的统计结果为292–1,450粒/m²。罗辉和王克勤(2006a, b)针对金沙江流域元谋段的植被恢复区土壤种子库调查统计得出其密度为2,633–9,737粒/m²。相对而言,本研究结果与金沙江东川段的种子库密度较接近,而低于金沙江元谋段的植被恢复区。引起种子库密度和组成差异的原因多样,包括自然气候条件差异和生境条件的差异(沈有信等, 2003; 刘贵华, 2005)。人类干扰也是引起土壤种子库密度和组成差异的重要原因,无论是金沙江还是元江干热河谷人类干扰都比较严重(金振洲, 2002)。

此外,种子库密度随土壤深度增加而减小,可能是因为干热河谷主要以草本植物为主,草本植物的种子通常都较小较轻,大部分种子散落在表层土壤中,难以进入土壤深层。没有机会萌发或处于休眠状态的种子在经过一段时间后,在重力作用、下渗水、动物活动、地表径流、风等因素的带动下,少量种子下移进入土壤深层中;而越是下层的种子,在土壤中的时间越长,种子活力丧失也越多,这可能是导致深层土壤中能萌发的种子数量较少的原因(Donelan & Thompson, 1980; Milberg, 1995; 于顺利和蒋高明, 2003; 张玲等, 2004)。

3.2 土壤种子库与地上群落的关系

本研究结果表明元江干热河谷各调查样地的土壤种子库与地上群落共有物种数较少,相似性较低,并且土壤种子库密度与地上群落密度也没有显著相关性。该结果与前人相关研究有的一致(沈有信等, 2003; 李彦娇等, 2010),有的不一致(罗辉和王克勤, 2006a; 张建利等, 2008)。造成这种差异的原因很多,如群落类型差异、环境因子和演替阶段不同,研究方法的差异,也有物种本身的生物学特征所导致的差异(赵凌平等, 2008)。

本研究显示元江干热河谷地上群落的物种数均大于土壤种子库的物种数。Whipple (1977)将土壤种子库与地上群落的关系分为3种情况:(1)有种子,有植株;(2)有种子,没有植株;(3)有植株,没有种

子。本研究调查的元江干热河谷灌草丛群落样方中也发现类似的3种情况:

(1)扭黄茅、矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、飞机草等植物种类既出现在地上群落中,也存在于土壤种子库里,并且这些物种的种子产量很高。

(2)刺蒴麻(*Triumfetta rhomboidea*)这一灌木物种在祥云样地土壤种子库中普遍存在,但对地上群落的野外调查却没有发现该物种。同样,一些优势种草本植物,如绵毛挖耳草(*Carpesium cernuum* var. *lanatum*)、地耳草(*Hypericum japonicum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)等,尽管在土壤种子库内也占有一定的比例,但在地上群落调查中未记录到。可能是这些种子受外界环境因子的影响或抑制萌发。影响种子萌发的因素多样,如土壤水分条件、温度、光照等(Fenner & Thompson, 2005)。

(3)有些种类广泛存在于植被中而未在种子库中发现或种子存量很少,如蔓草虫豆(*Cajanus scarabaeoides*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)等。此外,样地内存在少量的灌木和乔木物种,如酸豆(*Tamarindus indica*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)等,在种子库萌发实验中没有发现其萌发的种子,这些物种是否具有持久土壤种子库?仍需深入研究。

总体而言,造成土壤种子库与地上群落的物种组成存在差异的原因是多方面的:(1)由于实验条件的局限性,很难在一个实验中满足所有植物种类种子萌发的最适条件(光照、温度、水分等),导致土壤种子库中的一些物种不能萌发,从而有可能低估了一些种子库的物种组成(Pekas & Schupp, 2013)。(2)土壤种子库中的种子并非全部来自现存群落,而是群落不同演替阶段的长期积累,因而种子库与现存群落必然会有一定的差异(刘济明和钟章成, 2000; Wang et al, 2015)。(3)用来与种子库进行比较的地上群落的物种组成只是一次调查的结果,不同物种生长时间存在差异,因此也可能低估了植被的物种组成,并且调查取样面积的大小也会影响土壤种子库和相应地上群落物种组成的相似性结果(刘建立等, 2005)。(4)人类的干扰作用也是影响土壤种子库与地上群落的物种组成差异的重要原因之一(Willems, 1984)。

3.3 土壤种子库中入侵种与本地种比较

该区的主要外来入侵物种有牛膝菊、小蓬草、飞机草、飞扬草等。地上群落只发现臂形草、飞机草和飞扬草3种, 而土壤种子库中发现有小蓬草、飞机草、飞扬草、牛膝菊、金腰箭以及大叶桉。地上群落中的3种入侵植物种除了臂形草外其他的种类在土壤种子库中都有贮存, 而另外3种(牛膝菊、小蓬草和大叶桉)则只在土壤种子库中有发现。由此可见, 一些入侵植物具有一定持久土壤种子库, 可以为这些物种入侵和定殖提供种源。

一些本地种, 如扭黄茅、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、假蓬风毛菊(*Saussurea conyzoides*)、叶下珠(*Phyllanthus urinaria*)、矛叶荩草等通常种子体积小、数量多, 也能形成相对较大的持久土壤种子库密度, 萌发后形成的种群密度较大。但是, 相对而言, 研究区的本地适宜物种能形成持久土壤种子库的比例较小, 而入侵种能形成持久土壤种子库的比例较高。因此入侵种潜在的入侵能力及与本地草本灌木物种间的竞争能力等, 值得进一步开展深入研究。

参考文献

- Adams VM, Marsh DM, Knox JS (2005) Importance of the seed bank for population viability and population monitoring in a threatened wetland herb. *Biological Conservation*, 124, 425–436.
- Bai WJ, Zhang JE, Quan GM (2012) Hot topics and developing trends in soil seed bank. *Soils*, 44, 562–569. (in Chinese with English abstract) [白文娟, 章家恩, 全国明 (2012) 土壤种子库研究的热点问题及发展趋势. *土壤*, 44, 562–569.]
- Donelan M, Thompson K (1980) Distribution of buried viable seeds along a succession series. *Biological Conservation*, 17, 297–311.
- Falinska K (1999) Seed bank dynamics in abandoned meadows during a 20-year period in the Bialowieza National Park. *Ecology*, 87, 461–475.
- Fang HD, Duan CQ, Pan ZX, Sha YC, He L, Ji ZH (2009) Progress and perspectives on ecological restoration in the dry-hot valley of Jinsha River. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2(1), 5–9. (in Chinese with English abstract) [方海东, 段昌群, 潘志贤, 沙毓沧, 何璐, 纪中华 (2009) 金沙江干热河谷生态恢复研究进展及展望. *三峡环境与生态*, 2(1), 5–9.]
- Fenner M, Thompson K (2005) *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- He YB (2002) Environmental variation of dry and hot valley of Yuanjiang and countermeasures. *Yunnan Environmental Science*, 21(2), 26–28. (in Chinese with English abstract) [何永彬 (2002) 元江干热河谷环境变迁与适应对策研究. *云南环境科学*, 21(2), 26–28.]
- He JS, Jiang MX (1998) Plant species diversity of the degraded ecosystems in the Three Gorges Region. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 399–407. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 江明喜 (1998) 长江三峡地区退化生态系统植物群落物种多样性特征. *生态学报*, 18, 399–407.]
- Holzel N, Otte A (2004) Ecological significance of seed germination characteristics in flood-meadow species. *Flora*, 199, 12–24.
- Jin ZZ (2009) *Theory and Methods of Sociologic Geobotany*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [金振洲 (2009) 植物社会学理论与方法. 科学出版社, 北京.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) *Vegetation Of Yuan River, Nu River, Jinsha River, and Lancang River Dry-hot Valleys*. Yunnan University Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被, pp. 285–286. 云南大学出版社, 昆明.]
- Jin ZZ (2002) *Flora Characteristics of the Dry-hot River Valley and Dry-warm Valley of Yunnan and Sichuan*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科学技术出版社, 昆明.]
- Lavored S, Debussche M, Lebreton JD, Lepart J (1993) Seasonal patterns in the seed bank of Mediterranean old-field. *Oikos*, 67, 114–128.
- Leckie S, Vellend M, Bell G, Waterway MJ (2000) The seed bank in an old growth, temperate deciduous forest. *Canadian Journal of Botany*, 78, 181–192.
- Li F, Liang SC, Wang LJ, Zhang ZH, Hu G (2007) Soil seed bank of *Cinnamomum burmannii* community on karst hills in Guilin. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 1511–1515. (in Chinese with English abstract) [李峰, 梁士楚, 王丽君, 张忠华, 胡刚 (2007) 桂林岩溶石山阴香群落土壤种子库. *生态学杂志*, 26, 1511–1515.]
- Li YJ, Bao WK, Wu FZ (2010) Soil seed bank and natural regeneration potential of shrubland in dry valleys of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 399–407. (in Chinese with English abstract) [李彦娇, 包维楷, 吴福忠 (2010) 岷江干旱河谷灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估. *生态学报*, 30, 399–407.]
- Liu GH (2005) *Wetland Seed Banks in the Middle to Lower Reaches of the Changjiang River*. PhD dissertation, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [刘贵华 (2005) 长江中下游湿地的种子库研究. 博士学位论文, 中国科学院武汉植物园, 武汉.]
- Liu JM, Zhong ZC (2000) Seed rain, seed bank and regeneration of a *Castanopsis fargesii* community on Fanjing Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 402–407. (in Chinese with English abstract) [刘济明, 钟章成 (2000) 梵净山栲树群落的种子雨、种子库及更新. *植物生态学报*, 24,

- 402–407.]
- Liu JL, Yuan YX, Peng WX, Ma CM, Guan W (2005) Relationship between the soil seed banks and vegetation in Gushi Pasture, Bashang, Fengning, Hebei Province. *Arid Zone Research*, 22, 295–300. (in Chinese with English abstract) [刘建立, 袁玉欣, 彭伟秀, 马长明, 管伟 (2005) 河北丰宁坝上孤石牧场土壤种子库与地上植被的关系. *干旱区研究*, 22, 295–300.]
- Luo H, Wang KQ (2006a) Soil seed bank and aboveground vegetation in Jinshajiang dry-hot river valley hill slope vegetation restoration site. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2432–2442. (in English with Chinese abstract). [罗辉, 王克勤 (2006a) 金沙江干热河谷山地植被恢复区土壤种子库和地上植被研究. *生态学报*, 26, 2432–2442.]
- Luo H, Wang KQ (2006b) Soil seed bank of vegetation restoration region in mountainous area of Yuanmou dry-hot valley. *Science of Soil and Water Conservation*, 4(1), 87–91. (in Chinese with English abstract) [罗辉, 王克勤 (2006b) 元谋干热河谷山地植被修复区土壤种子库研究. *中国水土保持科学*, 4(1), 87–91.]
- Ma J, Beatrice V, Helge B, Yang YZ, Li L, Wang CL (2007) Basic characteristics of soil seed bank in Celei desert-oasis transitional zone. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 30(3), 53–59. (in Chinese with English abstract) [马坚, Beatrice V, Helge B, 杨远昭, 李利, 王纯利, 张希明 (2007) 策勒沙漠-绿洲过渡带土壤种子库的基本特征. *新疆农业大学学报*, 30(3), 53–59.]
- Ma KP, Huang JH (1995) Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Species richness, evenness and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 268–277. (in Chinese with English abstract) [马克平, 黄建辉 (1995) 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 18, 268–277.]
- Milberg P (1995) Soil seed bank after eighteen years of succession from grassland to forest. *Oikos*, 72, 3–13.
- Olano JM, Caballero I, Uskurain NA (2002) Seed bank spatial pattern in a temperate secondary forest. *Vegetation Science*, 13, 775–784.
- Pekas KM, Schupp EW (2013) Influence of above vegetation on seed bank composition and distribution in a Great Basin Desert sagebrush community. *Journal of Arid Environments*, 88, 113–120.
- Pugnaire FI, Lázaro R (2000) Seed bank and understorey species composition in a semi-arid environment: the effect of shrub age and rainfall. *Annals of Botany*, 86, 807–813.
- Qin L (2010) Statistical Ecology. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [覃林 (2010) 统计生态学. 中国林业出版社, 北京.]
- Shen YX, Liu WY, Zhang YD (2003) The effect of rehabilitation on vegetation species composition and soil seed bank at a degraded dry valley in Dongchuan, Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1454–1460. (in Chinese with English abstract) [沈有信, 刘文耀, 张彦东 (2003) 东川干热退化山地不同植被恢复方式对物种组成与土壤种子库的影响. *生态学报*, 23, 1454–1460.]
- Song YC (2000) *Vegetation Ecology*. East China Normal University Press, Shanghai. (in Chinese) [宋永昌 (2000) 植被生态学. 华东师范大学出版社, 上海.]
- Sun JH, Wang YR, Zeng YJ (2005) Characteristics of the soil seed banks in degenerated grasslands under grazing and grazing suspension. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 25, 2035–2042. (in Chinese with English abstract) [孙建华, 王彦荣, 曾彦军 (2005) 封育和放牧条件下退化荒漠草地土壤种子库特征. *西北植物学报*, 25, 2035–2042.]
- Tan SJ, Wei HJ, Liu DB (2010) Study on fauna and similarity coefficients among communities of house and courtyard ants in Chengdu area. *Journal of Environmental Entomology*, 32(1), 11–19. (in Chinese with English abstract) [谭速进, 魏翰均, 刘丹碧 (2010) 成都地区居室庭院蚂蚁区系及群落相似性分析. *环境昆虫学报*, 32(1), 11–19.]
- Tang Y, Cao M, Zhang JH, Ren YH (1997) The impact of slash and burn agriculture on the soil seed bank of *Trema orientalis* forest. *Acta Botanica Yunnanica*, 19, 423–428. (in Chinese with English abstract) [唐勇, 曹敏, 张建侯, 任泳红 (1997) 刀耕火种对山黄麻林土壤种子库的影响. *云南植物研究*, 19, 423–428.]
- Thompson K (2000) The functional ecology of soil seed banks. In: *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities* (eds Fenner M), pp. 215–235. CAB International eBooks, London.
- Wang YC, Ooi MKJ, Ren GH, Jiang DM, Musa A, Miao RH, Li XH, Zhou QL, Tang J, Lin JX (2015) Species shifts in above-ground vegetation and the soil seed bank in the inter-dune lowlands of an active dune field in Inner Mongolia, China. *Basic and Applied Ecology*, 16, 490–499.
- Whipple SA (1977) The relationship of buried, germination seed to vegetation in an old-growth Colorado subalpine forest. *Canadian Journal of Botany*, 6, 1506–1509.
- Willems ED (1984) Changes during 3 years in the size and composition of the seed bank beneath a long term pasture as influenced by defoliation and fertilize regime. *Applied Ecology*, 21, 603–615.
- Yu SL, Jiang GM (2003) The research development of soil seed bank and several hot topics. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 552–560. (in Chinese with English abstract) [于顺利, 蒋高明 (2003) 土壤种子库的研究进展及若干研究热点. *植物生态学报*, 27, 552–560.]
- Zhan XM, Li LH, Li X, Cheng WX (2005) Effects of grazing on the soil seed bank of a *Stipa krylovii* steppe community. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 747–752. (in Chinese with English abstract) [詹学明, 李凌浩, 李鑫, 程维信 (2005) 放牧和围封条件下克氏针茅草原土壤种子库的比较. *植物生态学报*, 29, 747–752.]
- Zhang JL, Zhang W, Bi YF (2008) Soil seed bank and its rela-

- tions with vegetation on a grassland in Jinsha River dry-hot valley. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1908–1912. (in Chinese with English abstract) [张建利, 张文, 毕玉芬 (2008) 金沙江干热河谷草地土壤种子库与植被的相关性. *生态学杂志*, 27, 1908–1912.]
- Zhang JL, Bi YF (2009) The soil seed bank's temporal and spatial characteristics in the enclosed process of the mountain-grassland. *Ecology and Environmental Science*, 18, 1427–1432. (in Chinese with English abstract) [张建利, 毕玉芬 (2009) 金沙江干热河谷山地草地封育过程中土壤种子库时空特征. *生态环境学报*, 18, 1427–1432.]
- Zhang JT (2004) *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang L, Fang JY (2004) Changes in soil seed banks and biodiversity along an altitude gradient in Taibai Mountain. *Acta Geographica Sinica*, 59, 880–888. (in Chinese with English abstract) [张玲, 方精云 (2004) 太白山土壤种子库储量与物种多样性的垂直格局. *地理学报*, 59, 880–888.]
- Zhao LY, Li FR, Wang XZ (2003) Characteristics of soil seed bank and standing vegetation change in sandy grasslands along a desertification gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1745–1756. (in Chinese with English abstract) [赵丽娅, 李锋瑞, 王先之 (2003) 草地沙化过程中地上植被与土壤种子库变化特征. *生态学报*, 23, 1745–1756.]
- Zhao LP, Cheng JM, Wan HE (2008) Research progresses in the soil seed bank. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(5), 112–118. (in Chinese with English abstract) [赵凌平, 程积民, 万惠娥 (2008) 土壤种子库研究进展. *中国水土保持科学*, 6(5), 112–118.]
- Zhu H (1990) A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County. *Acta Botanica Yunnanica*, 12, 301–310. (in Chinese with English abstract) [朱华 (1990) 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. *云南植物研究*, 12, 301–310.]
- Zhong XH (2000) Degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley: take representative area of Jinsha River, Yunnan Province as an example. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 9, 376–383. (in Chinese with English abstract) [钟祥浩 (2000) 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径: 以云南金沙江典型区为例. *长江流域资源与环境*, 9, 376–383.]

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 元江干热河谷灌草丛群落密度特征

Appendix 1 Density of shrub and grass communities in the dry-hot valleys of the upper, middle and lower regions of Yuan River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015253-1.pdf>

附录2 元江干热河谷灌草丛群落土壤种子库密度特征

Appendix 2 Soil seed bank density of the shrub-grass community in dry-hot valley of Yuan River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015253-2.pdf>

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253>

附录1 元江干热河谷灌草丛群落密度特征

| Appendix 1 Density of shrub and grass communities in the dry-hot valleys of the upper, middle and lower regions of the Yuanjiang River | | | | | | | | | |
|--|-------------|---|---|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| 科 | | 物种名称 | 地上植物群落密度(丛(株)/m ²) | | | | | Chi-Square | P |
| Family | | Species | Aboveground vegetation density (plants/m ²) | | | | | | |
| | | | 祥云 | 新平 | 元江 | 红河 | 元阳 | | |
| | | | Xiangyun | Xinping | Yuanjiang | Honghe | Yuanyang | | |
| 植物总种数 Total number of species | | | 31 | 29 | 18 | 25 | 25 | | |
| 植物总密度 Total plant species density in each plot | | | 91.75±7.78 | 99.54±15.87 | 113.06±18.68 | 98.28±11.22 | 109.94±9.45 | 1.888 | 0.756 |
| 禾本科 | Gramineae | 扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> | 52.60±1.88 | 33.00±5.45 | 79.13±12.41 | 83.33±13.64 | 45.93±4.35 | 14.516 | 0.006** |
| 禾本科 | Gramineae | 白羊草 <i>Bothriochloa ischcemum</i> | 0.06±0.06 | — | — | 3.33±2.56 | — | 9.063 | 0.060 |
| 禾本科 | Gramineae | 旱茅 <i>Eremopogon delavayi</i> | 0.33±0.33 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 禾本科 | Gramineae | 矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i> | 4.93±1.36 | — | — | 1.87±1.08 | — | 33.202 | <0.001*** |
| 禾本科 | Gramineae | 拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i> | 0.73±0.44 | — | — | — | — | 12.000 | 0.015* |
| 禾本科 | Gramineae | 疏花野青茅 <i>Deyeuxia arundinacea</i> var. <i>laxiflora</i> | 3.67±0.90 | — | — | — | — | 40.153 | <0.001*** |
| 禾本科 | Gramineae | 扭鞘香茅 <i>Cymbopogon hamatulus</i> | — | 0.13±0.13 | — | 0.13±0.13 | — | 3.041 | 0.551 |
| 禾本科 | Gramineae | 孔颖草 <i>Bothriochloa pertusa</i> | — | 24.80±8.49 | — | — | — | 36.485 | <0.001*** |
| 菊科 | Compositae | 牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i> | — | — | — | 0.06±0.06 | — | 4.000 | 0.406 |
| 菊科 | Compositae | 百能葳 <i>Blainvillea acmella</i> | 0.13±0.13 | — | — | 0.13±0.13 | 0.40±0.40 | 3.645 | 0.456 |
| 菊科 | Compositae | 万丈深 <i>Crepis phoenix</i> | 0.20±0.14 | — | — | — | — | 8.108 | 0.088 |
| 菊科 | Compositae | 小蓬草 <i>Conyza canadensis</i> | 0.93±0.44 | — | — | — | — | 21.112 | <0.001*** |
| 菊科 | Compositae | 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> | — | 0.67±0.67 | — | 0.40±0.19 | 0.33±0.16 | 10.582 | 0.032* |
| 菊科 | Compositae | 金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i> | — | 0.27±0.15 | — | — | — | 12.329 | 0.015* |
| 菊科 | Compositae | 地胆草 <i>Elephantopus scaber</i> | — | — | — | 0.47±0.35 | — | 8.108 | 0.088 |
| 菊科 | Compositae | 一点红 <i>Emilia sonchifolia</i> | 0.13±0.13 | — | — | — | 0.06±0.06 | 3.041 | 0.551 |
| 菊科 | Compositae | 牡蒿 <i>Artemisia japonica</i> | — | — | — | 0.33±0.23 | — | 8.108 | 0.088 |
| 豆科 | Leguminosae | 单叶木蓝 <i>Indigofera linifolia</i> | — | — | 28.20±8.49 | 0.33±0.27 | 9.13±6.92 | 18.517 | 0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae | 丁癸草 <i>Zornia gibbosa</i> | — | 0.27±0.21 | 0.06±0.06 | — | — | 5.526 | 0.237 |
| 豆科 | Leguminosae | 灰色木蓝 <i>Indigofera cinerascens</i> | — | — | — | 0.47±0.20 | — | 21.119 | <0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae | 假地蓝 <i>Crotalaria ferruginea</i> | — | — | — | 1.00±1.00 | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 | Leguminosae | 截叶铁扫帚 <i>Lespedeza cuneata</i> | 2.93±0.64 | — | — | — | — | 50.466 | <0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae | 蔓草虫豆 <i>Cajanus scarabaeoides</i> | — | 2.60±1.08 | 0.87±0.43 | 1.00±0.32 | 0.53±0.47 | 18.025 | 0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae | 三点金 <i>Desmodium triflorum</i> | 0.40±0.24 | 0.20±0.20 | — | 0.33±0.19 | 0.06±0.06 | 22.489 | <0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae | 小鹿藿 <i>Rhynchosia minima</i> | — | — | — | — | 1.53±1.13 | 8.108 | 0.088 |
| 豆科 | Leguminosae | 小叶三点金 <i>Desmodium microphyllum</i> | — | — | — | 0.53±0.27 | 0.67±0.67 | 12.337 | 0.015* |
| 豆科 | Leguminosae | 圆锥山蚂蝗 <i>Desmodium elegans</i> | 0.27±0.21 | — | — | — | — | 8.108 | 0.088 |

| 科 Family | 物种名称 Species | 地上植物群落密度(丛(株)/m ²) Aboveground vegetation density (plants/m ²) | | | | | Chi-Square | P |
|---------------------|--|---|-------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| | | 祥云 | 新平 | 元江 | 红河 | 元阳 | | |
| | | Xiangyun | Xinping | Yuanjiang | Honghe | Yuanyang | | |
| 豆科 Leguminosae | 练荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i> | 0.27±0.21 | 23.73±11.56 | — | — | 0.73±0.54 | 16.932 | 0.020* |
| 豆科 Leguminosae | 肾叶山蚂蝗 <i>Desmodium renifolium</i> | — | 0.20±0.20 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i> | — | 5.27±3.11 | — | — | — | 16.660 | 0.002** |
| 豆科 Leguminosae | 铁刀木 <i>Cassia siamea</i> | — | — | — | 0.13±0.13 | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 狸尾豆 <i>Uraria lagopodioides</i> | — | — | — | 0.13±0.13 | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 长波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sequax</i> | — | — | — | 0.80±0.50 | — | 12.327 | 0.015* |
| 豆科 Leguminosae | 深紫木蓝 <i>Indigofera atropurpurea</i> | — | 1.27±1.02 | 1.13±0.93 | — | 1.40±1.26 | 5.445 | 0.245 |
| 豆科 Leguminosae | 大叶千斤拔 <i>Flemingia macrophylla</i> | 0.13±0.13 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 元江杭子梢 <i>Campylotropis henryi</i> | — | — | — | — | 0.06±0.06 | 4.000 | 0.406 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i> | 0.40±0.27 | 0.13±0.13 | — | 0.13±0.13 | 0.80±0.35 | 9.260 | 0.054 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 算盘子 <i>Glochidion puberum</i> | — | 0.27±0.21 | — | — | — | 8.108 | 0.088 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 叶下珠 <i>Phyllanthus urinaria</i> | 2.47±1.07 | — | — | — | 19.00±4.64 | 58.395 | <0.001*** |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> | 1.00±0.41 | 0.06±0.06 | — | — | — | 21.500 | <0.001*** |
| 莎草科 Cyperaceae | 水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i> | — | — | — | — | 14.47±5.99 | 40.149 | <0.001*** |
| 莎草科 Cyperaceae | 滇飘拂草 <i>Fimbristylis yunnanensis</i> | — | — | — | — | 1.47±1.33 | 8.108 | 0.088 |
| 莎草科 Cyperaceae | 两歧飘拂草 <i>Fimbristylis dichotoma</i> | — | — | — | — | 6.40±3.44 | 12.327 | 0.015* |
| 锦葵科 Malvaceae | 黄花稔 <i>Sida acuta</i> | 0.13±0.13 | 4.33±1.80 | 1.13±0.65 | 0.06±0.06 | — | 31.355 | <0.001*** |
| 锦葵科 Malvaceae | 梵天花 <i>Urena procumbens</i> | — | — | — | — | 1.40±1.33 | 8.108 | 0.088 |
| 锦葵科 Malvaceae | 拔毒散 <i>Sida szechuensis</i> | 0.20±0.20 | 0.53±0.29 | — | — | — | 12.500 | 0.014* |
| 唇形科 Labiatae | 野拔子 <i>Elsholtzia rugulosa</i> | 1.40±0.52 | — | — | 0.13±0.13 | — | 25.689 | <0.001*** |
| 唇形科 Labiatae | 毛萼香茶菜 <i>Rabdosia eriocalyx</i> | — | — | — | 0.06±0.06 | — | 60.000 | <0.001*** |
| 茜草科 Rubiaceae | 野丁香 <i>Leptodermis potanini</i> | — | — | — | — | 1.27±1.27 | 4.000 | 0.406 |
| 茜草科 Rubiaceae | 白花蛇舌草 <i>Hedyotis diffusa</i> | 0.47±0.35 | 0.06±0.06 | — | — | — | 5.573 | 0.233 |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i> | — | 0.71±0.32 | — | — | 0.13±0.09 | 12.652 | 0.013* |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 山牡荆 <i>Vitex quinata</i> | — | — | — | — | 0.13±0.09 | 8.108 | 0.088 |
| 卷柏科 Selaginellaceae | 卷柏 <i>Selaginella tamariscina</i> | — | — | 0.13±0.13 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> | — | — | 0.06±0.06 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i> | — | 0.13±0.13 | 0.06±0.06 | — | — | 3.041 | 0.551 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 黄果悬钩子 <i>Rubus xanthocarpus</i> | 0.20±0.20 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 桑科 Moraceae | 地石榴 <i>Ficus tikoua</i> | 14.73±6.66 | — | — | — | — | 16.662 | 0.002** |
| 无患子科 Sapindaceae | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> | 2.20±0.35 | — | — | 2.67±1.48 | 0.93±0.28 | 33.192 | <0.001*** |
| 旋花科 Convolvulaceae | 土丁桂 <i>Evolvulus alsinoides</i> | — | — | — | — | 1.40±1.40 | 4.000 | 0.406 |
| 鸭跖草科 Commelinaceae | 鸭跖草 <i>Commelina communis</i> | — | — | 1.20±0.77 | — | — | 12.327 | 0.015* |

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439.
http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253

| 科 Family | 物种名称 Species | 地上植物群落密度(丛(株)/m ²) Aboveground vegetation density (plants/m ²) | | | | | Chi- Square | P |
|--------------------|--|---|---------------|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------|
| | | 祥云 Xiangyun | 新平 Xinping | 元江 Yuanjiang | 红河 Honghe | 元阳 Yuanyang | | |
| 紫茉莉科 Nyctaginaceae | 黄细心 <i>Boerhavia diffusa</i> | — | — | 0.33±0.27 | 0.33±0.27 | 0.73±0.60 | 5.583 | 0.233 |
| 防己科 Menispermaceae | 毛木防己 <i>Cocculus orbiculatus</i> var. <i>mollis</i> | — | 0.06±0.06 | 0.33±0.23 | — | — | 5.573 | 0.233 |
| 禾本科 Gramineae | 扭鞘香茅 <i>Cymbopogon hamatulus</i> | — | 0.24±0.10 | — | — | — | 18.147 | 0.001*** |
| 禾本科 Gramineae | 蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> | — | — | 0.06±0.06 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 禾本科 Gramineae | 类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> | 0.08±0.05 | 0.03±0.02 | — | — | — | 6.878 | 0.142 |
| 豆科 Leguminosae | 酸豆 <i>Tamarindus indica</i> | — | — | 0.01±0.01 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 蔓草虫豆 <i>Cajanus scarabaeoides</i> | — | 0.06±0.06 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 Leguminosae | 马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i> | — | 0.28±0.27 | — | — | — | 8.333 | 0.080 |
| 豆科 Leguminosae | 铁刀木 <i>Cassia siamea</i> | — | 0.02±0.02 | — | 0.05±0.04 | — | 5.790 | 0.215 |
| 豆科 Leguminosae | 白刺花 <i>Sophora davidii</i> | 1.68±1.68 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 锦葵科 Malvaceae | 拔毒散 <i>Sida szechuensis</i> | — | 0.01±0.01 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 锦葵科 Malvaceae | 黄花稔 <i>Sida acuta</i> | 0.20±0.20 | 0.32±0.20 | 0.02±0.02 | — | — | 6.818 | 0.146 |
| 唇形科 Labiatae | 毛萼香茶菜 <i>Rabdosia eriocalyx</i> | — | — | 0.02±0.02 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> | 0.07±0.03 | — | — | — | — | 13.091 | 0.011* |
| 番荔枝科 Annonaceae | 细基丸 <i>Polyalthia cerasoides</i> | — | 0.02±0.02 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 含羞草科 Mimosaceae | 山合欢 <i>Albizia kalkora</i> | — | 0.01±0.01 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 菊科 Compositae | 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> | — | 0.53±0.11 | — | 0.09±0.05 | 0.02±0.02 | 18.129 | 0.001*** |
| 蓼科 Polygonaceae | 戟叶酸模 <i>Rumex hastatus</i> | 0.09±0.04 | — | — | — | — | 13.028 | 0.011* |
| 萝藦科 Asclepiadaceae | 牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> | — | — | 0.02±0.01 | 0.03±0.02 | 0.03±0.02 | 6.685 | 0.154 |
| 漆树科 Anacardiaceae | 清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i> | — | — | 0.05±0.02 | — | — | 13.028 | 0.011* |
| 千屈菜科 Lythraceae | 虾子花 <i>Woodfordia fruticosa</i> | 0.02±0.02 | — | — | — | — | 8.333 | 0.080 |
| 茜草科 Rubiaceae | 水锦树 <i>Wendlandia uvariifolia</i> | 0.05±0.03 | — | — | — | — | 8.333 | 0.080 |
| 蔷薇科 Rosaceae | 华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i> | 0.02±0.02 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 桑科 Moraceae | 构树 <i>Broussonetia papyifera</i> | — | 0.16±0.16 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 柿科 Ebenaceae | 云南柿 <i>Diospyros yunnanensis</i> | — | 0.02±0.02 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 桃金娘科 Myrtaceae | 大叶桉 <i>Eucalyptus robusta</i> | — | 0.01±0.01 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 无患子科 Sapindaceae | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> | — | — | 0.03±0.03 | 0.11±0.05 | 0.29±0.03 | 17.862 | 0.001*** |
| 马鞭草科 Verbenaceae | 疏序黄荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>negundo</i> f. <i>laxipaniculata</i> | — | 0.03±0.02 | 0.19±0.08 | — | — | 14.801 | 0.005** |

****P* < 0.001, ***P* < 0.01, **P* < 0.05.

附录2 元江干热河谷灌草丛群落土壤种子库密度特征
Appendix 2 Soil seed bank density of the shrub-grass community in dry-hot valley of the Yuanjiang River

| 科 Family | 植物名称 Speices | 种子库密度(粒/m ²) Soil seed bank density (seeds/m ²) | | | | | Chi- Square | P |
|-------------|---|--|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|-----------|
| | | 祥云 Xiangyun | 新平 Xinping | 元江 Yuanjiang | 红河 Honghe | 元阳 Yuanyang | | |
| 物种总数量 | Total number of species | 19 | 12 | 9 | 12 | 10 | | |
| 物种平均总密度 | The mean species density in each plot | 2026.67±130.13 | 1080.00±339.87 | 613.33±196.52 | 726.67±118.51 | 486.67±70.40 | 12.703 | 0.013* |
| 禾本科 | Gramineae 扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i> | 633.33±114.02 | 373.33±112.25 | 466.67±222.86 | 240.00±75.57 | 40.00±12.47 | 12.893 | 0.012* |
| 禾本科 | Gramineae 矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i> | 173.33±41.36 | 6.67±6.67 | — | 60.00±26.67 | — | 17.681 | 0.010** |
| 禾本科 | Gramineae 旱茅 <i>Eremopogon delavayi</i> | 120.00±73.48 | — | — | — | — | 8.348 | 0.080 |
| 禾本科 | Gramineae 臂形草 <i>Brachiaria eruciformis</i> | 46.67±16.99 | — | — | — | — | 18.130 | 0.010** |
| 禾本科 | Gramineae 马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> | 326.67±92.73 | — | — | — | — | 23.659 | <0.001*** |
| 禾本科 | Gramineae 白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i> | — | 160.00±48.76 | — | — | — | 18.113 | 0.001*** |
| 豆科 | Leguminosae 响铃豆 <i>Crotalaria albida</i> | 6.67±6.67 | 20.00±20.00 | — | — | — | 3.133 | 0.536 |
| 豆科 | Leguminosae 狸尾豆 <i>Urvaria lagopodioides</i> | 6.67±6.67 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 | Leguminosae 苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i> | — | 6.67±6.67 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 | Leguminosae 猪屎豆 <i>Crotalaria pallida</i> | — | 113.33±113.33 | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 | Leguminosae 绵三七 <i>Eriosema himalaicum</i> | — | — | — | 13.33±8.16 | — | 8.438 | 0.080 |
| 豆科 | Leguminosae 截叶铁扫帚 <i>Lespedeza cuneata</i> | — | — | — | 6.67±6.67 | — | 4.000 | 0.406 |
| 豆科 | Leguminosae 单叶木蓝 <i>Indigofera linifolia</i> | — | — | — | — | 6.67±6.67 | 4.000 | 0.406 |
| 菊科 | Compositae 假蓬风毛菊 <i>Saussurea conyzoides</i> | 240.00±64.46 | — | 26.67±19.44 | 26.67±12.47 | 13.33±8.16 | 13.691 | 0.008 |
| 菊科 | Compositae 苦蒿 <i>Artemisia codoncephala</i> | — | — | 46.67±22.61 | 20.00±8.16 | 20.00±13.33 | 8.048 | 0.090 |
| 菊科 | Compositae 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> | 26.67±16.32 | 173.33±140.39 | — | 193.33±66.16 | 140.00±48.76 | 14.952 | 0.005** |
| 菊科 | Compositae 鼠麴草 <i>Gnaphalium affine</i> | — | 6.67±6.67 | 6.67±6.67 | — | 6.67±6.67 | 2.182 | 0.702 |
| 菊科 | Compositae 豨薟 <i>Siegesbeckia orientalis</i> | 53.33±45.46 | — | — | — | — | 8.330 | 0.800 |
| 菊科 | Compositae 一点红 <i>Emilia sonchifolia</i> | — | — | 6.67±6.67 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 菊科 | Compositae 绵毛挖耳草 <i>Carpesium cernuum</i> var. <i>lanatum</i> | 73.33±24.49 | — | — | — | — | 23.659 | <0.001*** |
| 锦葵科 | Malvaceae 黄花棂 <i>Sida acuta</i> | — | 13.33±8.16 | — | — | — | 8.348 | 0.080 |
| 锦葵科 | Malvaceae 拔毒散 <i>Sida szechuensis</i> | — | — | — | 13.33±13.33 | — | 4.000 | 0.406 |
| 大戟科 | Euphorbiaceae 飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i> | 180.00±59.25 | — | 20.00±20.00 | 46.67±29.05 | 166.67±59.62 | 11.347 | 0.230 |
| 大戟科 | Euphorbiaceae 叶下珠 <i>Phyllanthus urinaria</i> | 20.00±8.16 | 146.67±107.80 | 26.67±16.32 | 26.67±12.47 | 80.00±24.94 | 4.093 | 0.394 |
| 唇形科 | Labiatae 香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i> | — | — | 6.67±6.67 | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 萝藦科 | Asclepiadaceae 牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i> | — | — | — | — | 6.67±6.67 | 4.000 | 0.406 |
| 荨麻科 | Urticaceae 红雾水葛 <i>Pouzolzia sanguinea</i> | 13.33±8.16 | — | 6.67±6.67 | 66.67±29.81 | — | 11.550 | 0.210 |
| 椴树科 | Tiliaceae 刺蒴麻 <i>Triumfetta rhomboidea</i> | 13.33±13.33 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |

张志明, 沈蕊, 张建利, 徐倩, 罗园, 遇翹楚, 张秋霞, 欧晓昆. 元江流域干热河谷灌草丛土壤种子库与地上植物群落的物种组成比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 431–439.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015253>

| 科 Family | 植物名称 Speices | 种子库密度(粒/m ²) Soil seed bank density (seeds/m ²) | | | | | Chi-Square | P |
|------------------|--------------------------------|--|---------------|-----------------|--------------|----------------|------------|----------|
| | | 祥云 Xiangyun | 新平 Xinping | 元江 Yuanjiang | 红河 Honghe | 元阳 Yuanyang | | |
| 茜草科 Rubiaceae | 白花蛇舌草 <i>Hedyotis diffusa</i> | 6.67±6.67 | 53.33±45.46 | — | — | — | 5.948 | 0.203 |
| 茄科 Solanaceae | 龙葵 <i>Solanum nigrum</i> | 6.67±6.67 | — | — | — | — | 4.000 | 0.406 |
| 莎草科 Cyperaceae | 水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i> | 46.47±20.00 | 6.67±6.67 | — | — | — | 10.352 | 0.035 |
| 藤黄科 Guttiferae | 地耳草 <i>Hypericum japonicum</i> | 33.33±10.54 | — | — | — | — | 18.182 | 0.001*** |
| 无患子科 Sapindaceae | 车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> | — | — | — | 13.33±8.16 | 6.67±6.67 | 5.818 | 0.213 |

****P* < 0.001, ***P* < 0.01, **P* < 0.05.

• 研究报告 •

三江并流地区干旱河谷植物物种多样性 海拔梯度格局比较

杨 阳¹ 韩 杰¹ 刘 晔³ 忠永茨仁² 石松林⁴ 斯那此里²
许 玥¹ 应凌霄¹ 张婉君¹ 沈泽昊^{1*}

1 (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

2 (云南白马雪山国家级自然保护区管理局, 云南德钦 674500)

3 (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)

4 (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 在滇西北三江并流地区典型干旱河谷段, 在怒江、澜沧江和金沙江的东、西坡共设置了6条海拔梯度样带, 通过标准样地的植物群落调查, 分析各条样带植物的物种丰富度、物种更替率的海拔梯度格局, 并比较了地理和植被变量对分布格局的解释。干旱河谷植被带位于海拔3,000 m以下, 以灌丛和灌草丛为主, 其在各河谷的分布上限自西向东依次升高。植物物种丰富度的分布主要与海拔、流域、经纬度和植被带有关, 沿纬度和海拔梯度升高而显著增加的格局主要表现在草本层和灌木层, 灌木物种丰富度还呈现自西向东显著增加的趋势。怒江的灌木和草本物种丰富度显著高于金沙江和澜沧江, 三条江的乔木种丰富度差异则不显著。森林带的样方草本物种丰富度显著低于灌草丛样方, 并且还拥有后者没有的乔木种。不同样带的植物物种更替速率呈现了不一致的海拔梯度格局, 但均在样带海拔下部的灌草丛群落与海拔上部森林群落之间的交错带出现峰值。森林–灌草丛植被交错带在怒江样带处于海拔1,900–2,100 m处, 在澜沧江河谷位于海拔2,300–2,400 m, 在金沙江河谷位于海拔2,700–2,900 m。所有海拔样带的森林段或灌草丛段相对于同一样带不同植被段之间的物种更替程度为最小, 不仅小于同一流域不同样带相同植被段之间物种更替率的均值, 更小于所有样带相同植被段之间的更替率均值。在三条河流6条海拔样带的12个植被带段之间的物种更替变化中, 空间隔离因素可以解释34.2%, 而植被类型差异仅能解释不到0.5%。本研究结果显示了环境差异对不同植被类型物种丰富度的首要影响, 和各河流之间的空间隔离对植物群落构建和物种构成的主要作用。

关键词: 三江并流; 干旱河谷; 物种多样性; 海拔梯度; 群落结构

A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan

Yang Yang¹, Jie Han¹, Ye Liu³, Ciren Zhongyong², Songlin Shi⁴, Cili Sina², Yue Xu¹, Lingxiao Ying¹, Wanjun Zhang¹, Zehao Shen^{1*}

1 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

2 Yunnan Baima Snow Mountain National Nature Reserve, Deqin, Yunnan 674500

3 School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Abstract: In the typical dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwest Yunnan Province, we investigated vegetation using six sampling transects, each comprised of ten standard plots, along altitudinal gradients on the eastern and the western aspects of Nu River, Lancang River, and Jinsha River. With these

收稿日期: 2015-12-18; 接受日期: 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)、交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

data, we compared the elevation-related distribution of plant species richness and species turnover rates along the six transects, and explained the patterns using geography and vegetation variables. The dry-warm vegetation zone was dominated by shrubs and herbs and located below the altitude of 3,000 m a.s.l. At higher elevations, shrub and herbs were replaced with a forest zone. The spatial distribution of plant species richness increased with elevation and latitude, especially for herb and shrub species, and was also related to river, vegetation zones, and longitude. The species richness of shrubs also increased significantly across the region, from west to east. Species richness of herbs and shrubs in the Nu River were higher than those in the Lancang River and the Jinsha River, whereas the difference of species richness among three rivers was not significant for trees. Herb species richness in the forest zone was less than that in the shrub and herb zones. Species turnover rate of different zones presented inconsistent altitudinal gradient patterns, but all peak values appeared in the ecotones between shrub communities, in the lower altitudes of the transect, and forest communities, in the higher altitudes. The forest-shrub ecotone is located at an altitude range of 1,900–2,100 m in the Nu River valley, at an altitude range of 2,300–2,400 m in the Lancang River valley and at an altitude range of 2,700–2,900 m in the Jinsha River valley. The mean species turnover rates between shrub & herb section and forest section within each transect were less than the mean turnover rates of the same vegetation section between different transects within the same basin, and also less than the mean turnover rates for same vegetation section in all six transects. Spatial isolation could explain 34.2% of the variation in species turnover rate among the 12 vegetation sections of the six altitudinal transects, while vegetation differences explained less than 0.5% of the variation. These results show the primary role of environment difference in determining the species richness between vegetation types, whereas geographical isolation between the rivers as a dominant factor in the assembly (e.g. species composition) of plant communities.

Key words: Three Parallel Rivers; dry valleys; species richness; altitudinal patterns; community structure

生物多样性的空间分布格局及其潜在机制是生态学和生物地理学领域的重要研究内容(Whittaker, 1960; MacArthur, 1972)。过去30年来, 山地生物多样性随海拔梯度的变化规律及其影响因素在国内外生态学界受到广泛关注(贺金生和陈伟烈, 1997; 沈泽昊和张新时, 2000; 方精云, 2004; Rahbek, 2005), 并成为检验各种生物多样性机制假说的“模式对象”(Stevens, 1996; Colwell et al, 2004; Yang et al, 2016)。

海拔对物种丰富度垂直格局的影响随着区域位置和植物类群的不同而存在较大差异(Kessler, 2000; 唐志尧和方精云, 2004), 主要有4种形式: 单调下降、先平台后下降、中部隆起(hump-shaped)以及先下降后升高(inverse hump-shaped curves)。迄今为止, 大多数研究的结果表明, 山地气温和降水梯度的综合效应决定最优生境在海拔梯度上的分布, 这对应于物种丰富度的峰值海拔; 地形海拔上下限制所造成的“中域效应”决定物种丰富度在海拔中部达到最大, 但其影响大小尚不确定(Grytnes et al, 2008; Beck & Chey, 2008)。最近研究发现进化因素也是物种丰富度的高峰值出现的机制之一(Wu et al, 2014)。然而目前诸多成因对物种丰富度垂直格局的

影响大小还没有形成一致结论, 因此不同山体、不同区域生物多样性的比较研究对于阐明物种丰富度和海拔关系十分必要(Grytnes, 2003; Beck & Kitching, 2009)。

在我国滇西北三江并流地区具有平行岭谷地貌格局, 大致南北走向、自西向东平行排列的山脉与镶嵌其中的江河谷底之间形成悬殊的海拔梯度。从河谷到山顶显著的气候垂直分异, 主导了包含热带、亚热带、温带到高山寒带等多个植被类型的植被垂直带谱(Wang et al, 2004; 冯建孟等, 2006), 并普遍为海拔基带干旱炎热、西南季风影响下干湿季明显的气候特征(张荣祖, 1992)。横断山脉是我国和全球生物多样性的热点区域之一(Myers et al, 2000; Barthlott et al, 2007), 滇西北地区位于其东南端, 这一地区也是云南省两大生物多样性中心之一(李锡文, 1995)。本区域已有不少关于生物多样性海拔梯度格局的研究, 如王志恒等(2004)对高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的分布格局研究, 张志明等(2009)对梅里雪山植被空间格局与环境因子关系的分析, 冯建孟等(2006)对玉龙雪山植物物种多样性沿海拔梯度的分布格局研究, Yang等(2016)用白马雪山东、西坡植物多样性梯度格局的比较验证

了不同机制性假说。Alicia等(2015)曾指出,空间异质性对于局地物种多样性的解释高于宏观气候因子,Bram等(2013)也指出,空间隔离通过阻止物种的扩散形成了物种间的较大差别。纵向岭谷区域具有峡谷和山峰交错分布的特点,为生物提供南北通道的同时对其东西分布形成了空间隔离(欧晓昆,2009)。但是,对于区域内植物多样性海拔梯度格局沿南北纬度梯度的变化和自西向东不同流域之间的差异,以及平行岭谷的地貌隔离对植物群落物种多样性的影响,现有研究还尚未涉及。

本研究沿着海拔梯度分别在金沙江、澜沧江和怒江的干旱河谷区域设置样地,对于3个河谷垂直方向均完全覆盖,且不同河谷、不同经纬度之间形成海拔梯度的对比。研究三江并流地区干旱河谷的群落类型结构和物种多样性的垂直变化格局及其水平对比(McCain, 2010),旨在探讨以下3方面的问题:(1)该地区植物多样性的海拔格局及不同山地之间的差异;(2)影响三江并流地区植物群落 α 和 β 多样性格局的空间和地形因子;(3)探讨平行的纵向岭谷地形对植物群落物种构成所产生的隔离效应。通过探寻该区域植物多样性的垂直分布规律及区域差异,本研究可为该区域生物多样性保护重点的选择提供依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于滇西北三江并流地区,地理坐标范围为 $26^{\circ}25' - 28^{\circ}24' \text{ N}$, $97^{\circ}55' - 100^{\circ}22' \text{ E}$,在北、东方向分别与西藏的林芝地区、四川甘孜藏族自治州和凉山彝族自治州毗邻,西面与缅甸接壤。行政上这一区域包含怒江傈僳族自治州、迪庆藏族自治州和丽江市的11个县市。发源于青藏高原的怒江、澜沧江、金沙江3条大河南北贯穿本区域,与自西向东平行排列的高黎贡山、怒山-碧罗雪山、云岭-老君山、雪山4条山脉,形成“三江并流”的纵向平行岭谷地貌。境内最高点为海拔6,740 m的梅里雪山,位于怒山-碧罗雪山北端,亦是云南省最高峰;最低点位于泸水县怒江河谷,海拔600 m以下(何永彬等,2000;明庆忠和史庆涛,2007)。

三江并流区的气候受西南季风、东南季风和青藏高原大陆性高寒气候的交互影响,加之地表相对高差显著,因而气候具有强烈的季节性变化,且垂

直分化十分明显。高海拔地带冬春季长、夏秋季短,而河谷低地则相反。该区域日温差和年温差大。普遍干湿季分明,降雨集中于夏季,暴雨多,立体气候显著。据区内贡山(海拔1,583.3 m)、泸水(1,804.7 m)、奔子栏(2,005 m)和兰坪(2,344.9 m)四地气象站的长期观测数据,年均温度 $10.7 - 16.6^{\circ}\text{C}$,月均温年较差 $12.5 - 17.8^{\circ}\text{C}$;年平均降雨量自西向东降低,且沿海拔梯度自下而上增加,其中,怒江流域年降水量 $>1,000 \text{ mm}$ (贡山县1,772.4 mm),澜沧江、金沙江流域依次减少(兰坪1,008.2 mm,香格里拉619.9 mm,金沙江河谷奔子栏仅285.6 mm)(图1)。

区域在高山深谷地貌和立体气候的影响下,植被沿海拔显示了层次分明的垂直带谱。各河流两侧沿海拔梯度自下而上分布着河谷(疏林)灌丛带、森林带、高山灌丛草甸带和冰雪带。区内三条江河谷底部的高度差不同,怒江河谷水面海拔700–1,700 m,澜沧江河谷海拔1,200–2,000 m,金沙江河谷海拔1,600–2,000 m。怒江河谷低地以云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林和半湿润的常绿阔叶林为主,而澜沧江和金沙江河谷植被群落外貌多为灌丛或稀树草地,无明显乔木层(欧晓昆和金振洲,1996)。由于气候普遍干热,河谷低地主要的土壤类型有燥红土、褐红壤、赤红壤、紫色土等(王克勤等,2004;刘方炎,2010)。

1.2 野外调查

根据野外调查条件的不同,在怒江、澜沧江和金沙江河谷的不同地点和坡向共设置了6条沿海拔梯度的非连续样带(图1,表1)。其中,金沙江河谷样带(J1)在白马雪山东坡、金沙江西岸奔子栏镇附近;澜沧江河谷样带分别设置在兰坪营盘镇(L1)、维西白济汛乡(L2)和德钦县云岭乡(L3);怒江河谷样带设置在泸水县片马(N1)和贡山县(N2)。每条样带依托一条翻山公路,沿公路从江边开始布置样方。一般情况下海拔每上升100 m,在公路两侧100 m以外选择人为干扰不明显的生境,布置2–5个面积 100 m^2 的样方。有些区域由于地形陡峭或人为干扰较大等因素,样方间的海拔梯度间隔较大。

以 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的样方为调查单元,清查每个样方中出现的物种。对于乔木,记录每株的种名,并测量其胸径和高度;对于草本和灌木,记录每个物种的种名、个体数或多度,并目测其百分比盖度。对于每个调查样方,用GPS测定地理坐标和海拔,

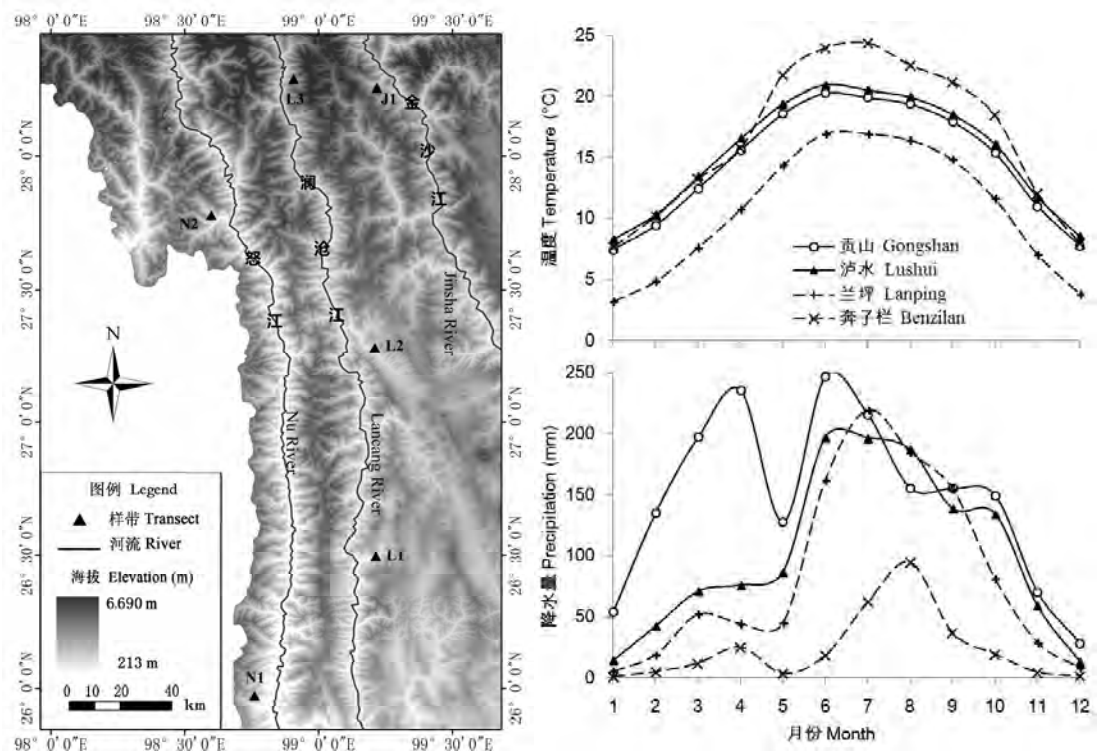


图1 研究区域内河流、地貌及植被调查的海拔样带位置图。N1: 片马; N2: 贡山; L1: 兰坪; L2: 维西; L3: 德钦; J1: 奔子栏。
Fig. 1 The geomorphology, rivers and the locations of altitudinal transects of vegetation survey in the study area. N1, Pianma; N2, Gongshan; L1, Lanping; L2, Weixi; L3, Deqin; J1, Benzilan.

表1 三江并流干旱河谷样方基本信息

Table 1 The features of six transects of vegetation survey in the Three Parallel River Region

| 河流 River | 样带 Transect | 样带地点 Location | 坡面 Aspect | 海拔范围 Elevation range (m) | | 样方数 No. of plots |
|-------------------|----------------|------------------|--------------|--------------------------|-------------|---------------------|
| | | | | 灌木 Shrubs | 森林 Forest | |
| 怒江 Nu River | N1 | 片马 Pianma | 西坡 West | 900–2,100 | 2,200–3,100 | 39 |
| | N2 | 贡山 Gongshan | 西坡 West | 1,100–1,900 | 2,000–2,900 | 27 |
| 澜沧江 Lancang River | L1 | 兰坪 Lanping | 东坡 East | 1,700–2,400 | 2,500–3,100 | 32 |
| | L2 | 维西 Weixi | 东坡 East | 2,000–2,300 | 2,400–2,800 | 28 |
| | L3 | 德钦 Deqin | 东坡 East | 2,000–2,600 | 2,700–3,200 | 34 |
| 金沙江 Jinsha River | J1 | 奔子栏 Benzilan | 西坡 West | 2,000–2,700 | 2,800–3,200 | 32 |

罗盘测量地形的坡向和坡度。

由于河谷干旱气候与山地湿润气候的差异,加上低海拔地区长期的人为活动影响,各条海拔样带上的植物群落样方都可以分为2个植被类型,即低海拔的灌草丛和中山以上的森林群落。各样带因基带气候和人为干扰强度的差异,2种植被类型的分界海拔不同。

1.3 数据分析

1.3.1 多样性指标计算

α 多样性采用单位面积样方中的物种丰富度

值。分别统计各调查样方中全部维管束植物以及乔木、灌木和草本植物(含蕨类)的物种丰富度。每条样带上某一海拔的植物群落物种丰富度及草本、灌木、乔木物种丰富度分别为该海拔全部样方物种丰富度的平均值。

β 多样性包含两个样本之间由于物种数量减少(nestedness)和物种更替(turnover)两个可加性成分(Koleff et al, 2003)。在诸多 β 多样性指数中, Simpson相异性指数(β_{sim})反映了样本之间物种构成的更替速率,且不受样方物种丰富度的影响(Baselga,

2010; Baselga & Leprieur, 2015), 故用来描述同一样带内不同海拔样方群落之间的物种更替。

$$\beta_{sim} = \frac{\min(b, c)}{a + \min(b, c)}$$

其中, a 表示两个样方共有的物种数, b 表示在第一个样方中出现但是在第二个样方中不出现的物种数, c 表示在第二个样方中出现但是在第一个样方中不出现的物种数。

计算同一样带相邻海拔间的物种更替速率时, 由于每个海拔有 2–5 个样方不等, 故计算两个海拔之间所有成对样方组合之间的 β_{sim} 并求平均值。如 A、B 是同一样带内的相邻海拔, A 处有 2 个样方 a_1 、 a_2 , B 处有 3 个样方 b_1 、 b_2 、 b_3 , 则海拔 A、B 之间共 6 种 a、b 样方组合, 求此 6 种样方对之间的 β_{sim} 平均值, 得到 A、B 海拔之间的 β 多样性。

根据野外对调查样带的植被类型划分, 用 β_{sim} 计算 6 条样带和 2 种植被类型(即低海拔的灌丛和中山森林), 总共 12 个样带段之间的 β 多样性。由于不同样带段内的样方数量不同, 为了减少基数不同导致的误差, 此处使用重复随机抽样, 每次从每条样带段中各抽出 5 个样方。而后以各条样带段的 5 个样方中出现的物种计算 12 个样带段之间的 β_{sim} 。重复抽样 1,000 次并计算结果的平均值, 作为样带段间的 β 多样性指数。

1.3.2 物种多样性与构成变化的环境解释和方差分析

运用通用线性回归模型, 分析草本、灌木、乔木和全部物种丰富度的海拔梯度格局受相关环境因子的影响及其区域差异。解释变量包括: (1) 定量变量: 经纬度、海拔、坡向、坡度; (2) 类型变量: 流域(金沙江、澜沧江、怒江)、植被类型(灌丛、森林)。其中坡向 δ 作三角函数变换为 $\cos(\delta)$, 代表光照影响, 值域为 $[-1, 1]$, 正北为 -1 , 正南为 1 ; 作三角函数变换为 $\sin(\delta)$, 代表东西坡, 值域为 $[-1, 1]$, 正西为 -1 , 正东为 1 。

分析 β 多样性时, 针对 3 个类型变量:

(1) 植被类型差别: 0 = 相同, 1 = 不同; (2) 空间隔离: 1 = 同一样带, 2 = 同流域不同样带, 3 = 相邻流域样带, 4 = 间隔流域样带; (3) 样带植被类型: 1 = 灌丛带, 2 = 森林带。

运用方差分析, 解析前述 12 个样带段之间的 β 多样性来源。

文中所有的计算都在 R 软件包中进行, β_{sim} 指数的计算使用软件中的 *vegan* 包完成, 重复抽样的实现则是通过在 R 语言中编写循环程序完成。

2 结果

2.1 植物物种丰富度的基本信息

L1 (兰坪) 的灌丛带是以清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、胡枝子(*Lespedeza* spp.) + 荩草(*Arthraxon hispidus*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*) 为优势种的干旱河谷植被类型, 森林带是以云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、滇杨(*Populus yunnanensis*) + 野艾蒿、白车轴草(*Trifolium repens*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*) 为优势种的温带针阔叶混交林。

L2 (维西) 的灌丛带是以截叶铁扫帚(*Lespedeza cuneata*)、马棘、地蕊(*Melastoma dodecandrum*) + 荩草、鬼针草(*Bidens* spp.)、野艾蒿为优势种的干旱河谷植被类型, 森林带是以云南松、榲桲(*Quercus dentata*) + 野艾蒿、白茅为优势种的温带针阔叶混交林。

L3 (德钦) 的灌丛带是以川西白刺花(*Sophora davidii* var. *chuansiensis*)、小叶灰毛蕨(*Caryopteris forrestii* var. *minor*)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*) + 荩草、画眉草、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*) 为优势种的干旱河谷植被类型, 森林带是以高山松(*Pinus densata*)、华山松、黄背栎(*Quercus pannosa*) + 画眉草、榲桲(*Drynaria fortunei*)、火绒草(*Leontopodium* spp.) 为优势种的温带针阔叶混交林。

N1 (片马) 的灌丛带是以地蕊、地桃花(*Urena lobata*)、山柳(*Clethra* spp.) + 荩草、白茅、鬼针草为优势种的干旱河谷植被类型, 森林带是以尼泊尔栎木(*Alnus nepalensis*)、高山桦(*Betula delavayi*)、云南铁杉(*Tsuga dumosa*) + 常山(*Dichroa febrifuga*)、箭竹(*Fargesia* spp.)、鼠麴草(*Gnaphalium* spp.) 为优势种的温带针阔叶混交林。

N2 (贡山) 的灌丛带是以地蕊、地桃花、饿蚂蝗(*Desmodium multiflorum*) + 荩草、五月艾(*Artemisia indica*)、鬼针草为优势种的干旱河谷植被类型, 森林带是以云南松、栎木、润楠(*Machilus* spp.) + 常山、滇北悬钩子(*Rubus bonatianus*)、竹叶

茅(*Microstegium nudum*)为优势种的温带针阔叶混交林。

J1 (奔子栏)的灌草丛带是以川滇野丁香(*Leptodermis pilosa*)、川西白刺花、马棘+荇草、草沙蚕(*Tripogon* spp.)、垫状卷柏(*Selaginella pulvinata*)为优势种的干旱河谷植被类型,森林带是以高山松、华山松、山杨(*Populus* spp.)+ 榲蕨、菝葜(*Smilax* spp.)、苔草(*Carex* spp.)为优势种的温带针阔叶混交林。

按流域来看,怒江两条样带100 m²样方面积上的平均植物物种丰富度分别为N1 (片马) 36.0 ± 13.8 和N2 (贡山) 46.4 ± 15.4 种,高于澜沧江L1 (兰坪) 34.7 ± 9.1 种、L2 (维西) 32.7 ± 14.2 种和L3 (德钦) 18.1 ± 6.2 种,其中怒江贡山样带的平均物种丰富度最高。白马雪山东坡的J1样带平均物种丰富度 18.7 ± 8.1 种,与其西坡相对的L3样带的物种丰富度值彼此接近且最低。同一流域内不同样带相比,怒江北段的样方物种平均丰富度高于南段,而在澜沧江是南段的该值高于北段。

按植物生长型比较,草本植物物种丰富度普遍较高,怒江两条样带样方平均的草本物种丰富度大约为灌木种的2.5倍(附录1);在澜沧江中、南部的2条样带,样方草本种与灌木种的平均丰富度约2:1;但在澜沧江北部样带和金沙江样带中,样方草本物种与灌木物种的丰富度接近1:1。草本种与灌木种丰富度的比值从西向东沿着怒江、澜沧江、金沙江逐渐下降,主要是草本种丰富度显著降低。乔木种丰富度则在各个流域较为相近,在6条样带均处于0.5–2.8种/100 m²范围。

按植被带比较,怒江流域森林带与灌草丛带草本物种数目的差异最大,澜沧江和金沙江流域森林带与灌草丛带草本物种数目较为相近;所有流域的森林带灌木物种数目基本都要大于灌草丛带,但数目差异与草本数目相比差异不大;森林带和灌草丛带的乔木物种数目差异显著,灌草丛带乔木物种数很少乃至为零。

2.2 植物物种丰富度的海拔梯度格局

6条样带植物物种丰富度在海拔梯度上具有不太一致的格局(图2),其中怒江两条样带都分别在2,000 m及以下和在2,800 m附近出现峰值;澜沧江南部和北部样带的丰富度峰值出现在海拔2,700–2,800 m,而中部样带的峰值在海拔2,000 m以下;金沙江样带的物种丰富度从2,300 m以上随海拔上

升而增加,在3,300 m处达到峰值。

从不同的植物生长型来看,对于草本植物,金沙江样带和澜沧江北部样带丰富度最低,澜沧江中、南部两条样带丰富度与怒江样带接近,但怒江2条样带在海拔2,000 m以下分别出现1个显著的高峰值。除此之外,其余样带的海拔梯度格局不明显。对于灌木种,海拔梯度格局同样不明显,但各条样带都在海拔2,300–2,400 m出现较低值,怒江2条样带灌木种丰富度高峰值出现在海拔2,600–2,800 m,澜沧江样带的灌木种丰富度海拔梯度格局均不明显,而金沙江样带灌木种丰富度随海拔上升而增加。乔木种丰富度除金沙江样带呈现随海拔上升而增加的趋势外,其余样带峰值都在海拔2,300–2,900 m出现。

2.3 植物物种丰富度格局的地理环境解释

区内植物物种分布格局受到地理环境因子的影响,如表2所示。总体来讲,各层植物物种均沿着纬度和海拔梯度升高而丰富度显著增加,其中草本层和灌木层增加更为显著,但乔木种基本不随着地理梯度的变化而变化;相比草本层和乔木层,灌木物种丰富度沿着经度自西向东显著增加。从流域方面分析,澜沧江样带样方的物种丰富度整体上与金沙江样带没有显著区别,尽管草本多样性偏高,灌木多样性偏低,但只有乔木种丰富度显著低于金沙江样带。尽管怒江样带的样方中全部种、灌木和草本种丰富度显著高于金沙江和澜沧江样带,但乔木种丰富度的差异并不显著。从植被类型方面来分析,森林带内样方中的草本物种丰富度显著低于灌草丛带样方,而且拥有后者不具备的乔木种,但灌木种丰富度的多样性差别并不显著,而森林带与灌草丛带的物种丰富度在整体上也没有显著差异。

在样方尺度上,地形特征影响物种丰富度的分布。坡向与样方草本层物种和物种总数显著负相关,即北坡草本物种数高于南坡。坡度对灌木和草本物种数都有接近显著的影响,坡度越大,草本物种多样性越低,而灌木种多样性越高,但对乔木种和总种数影响不显著。以上模型变量总共解释了草本生物多样性67.13%的变异,解释了灌木生物多样性的34.10%,解释了乔木生物多样性的40.65%,解释了总体植物生物多样性的71.26%。

2.4 植物多样性的空间格局

总体来看,三个流域的6条样带中物种更替的

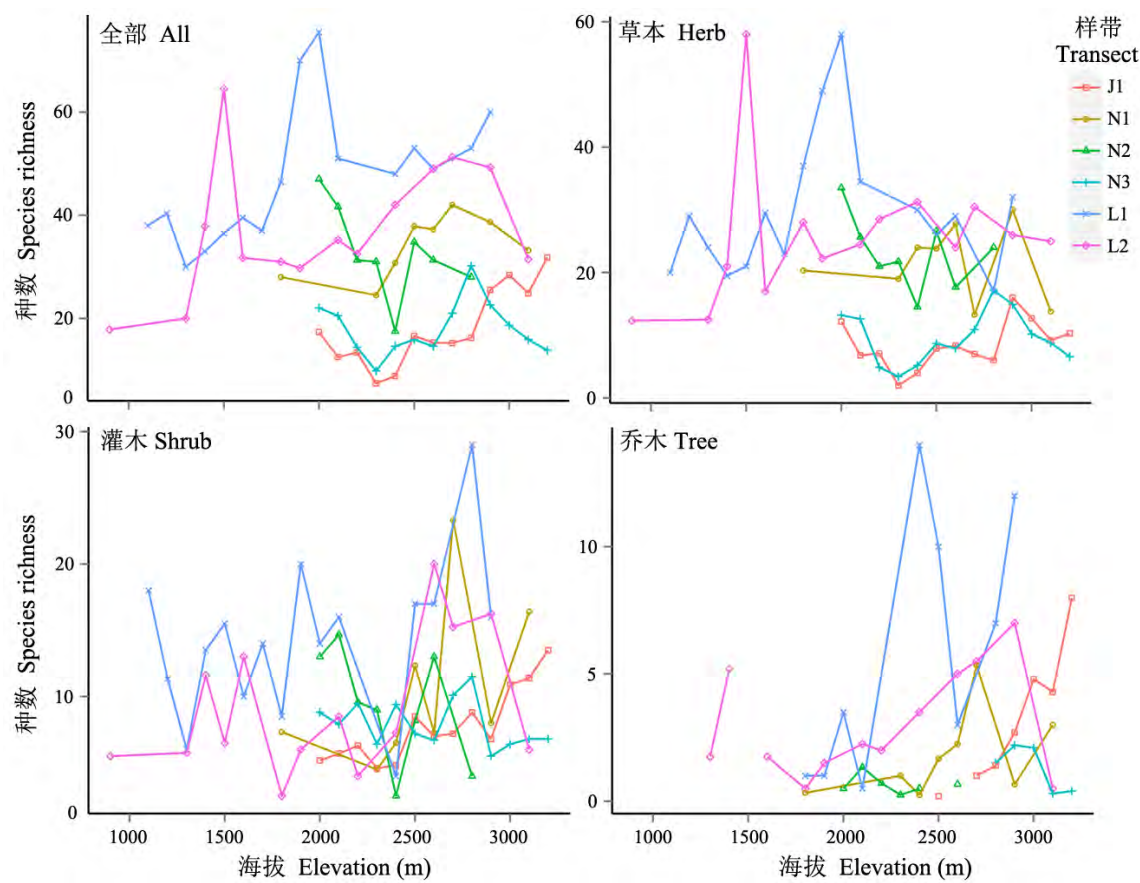


图2 三个流域6条植被样带中全部植物和不同生长型物种丰富度的海拔梯度分布。N1: 怒江片马; N2: 怒江贡山; L1: 澜沧江兰坪; L2: 澜沧江维西; L3: 澜沧江德钦; J1: 金沙江奔子栏。
Fig. 2 Elevational gradients of species richness of all plants and different growth-forms for the six vegetation transects in the three watersheds. N1, Nu River Pianma; N2, Nu River Gongshan; L1, Lancang River Lanping; L2, Lancang River Weixi; L3, Lancang River Deqin; J1, Jinsha River Benzilan.

表2 植物群落样带物种丰富度格局GLM模型的回归系数及其统计显著性(† 代表类别变量, 对应的系数代表类别变量不同水平与模型缺省水平, 即截距的差异值, 这对应的河流是金沙江, 对应的植被带是灌草丛带。统计检验的显著性: *** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$; # $0.05<P<0.1$)。

Table 2 The coefficients and corresponding statistic significance of the generalized linear models for species richness patterns of the plant communities transects. † refers to categorical variable, the corresponding coefficient equals to the intercept difference between the referring level and the default level, which is the Jinsha River when considering the variable “river”, and the Shrub & Herb section when considering the variable “vegetation type”.

| 环境因子 Environmental factors | 草本种 Herb species | 灌木种 Shrub species | 乔木种 Tree species | 全部种 Total species |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 纬度 Latitude | 0.233*** | 0.332*** | 0.404*** | 0.286*** |
| 经度 Longitude | -0.561 | 1.417** | 0.775 | 0.227 |
| 海拔 Elevation | 3.11E-4*** | 4.01E-4** | 4.54E-4 | 3.71E-4*** |
| 坡向 余弦 Aspect cos | -0.124*** | 0.033 | 0.021 | -0.078** |
| 坡向 正弦 Aspect sin | -0.019 | 0.204*** | 0.562*** | 0.084** |
| 坡度 Slope | -2.851E-3# | 4.501E-3# | -4.989E-5 | -0.550E-3 |
| 澜沧江 Lancang River† | 0.308 | -0.685** | -2.046*** | -0.201 |
| 怒江 Nu River† | 1.783*** | 1.190*** | 0.622 | 1.554*** |
| 森林段 Forest section† | -0.221* | 0.061 | 1.074*** | -0.062 |
| Adj.-R ² | 0.671 | 0.341 | 0.407 | 0.713 |

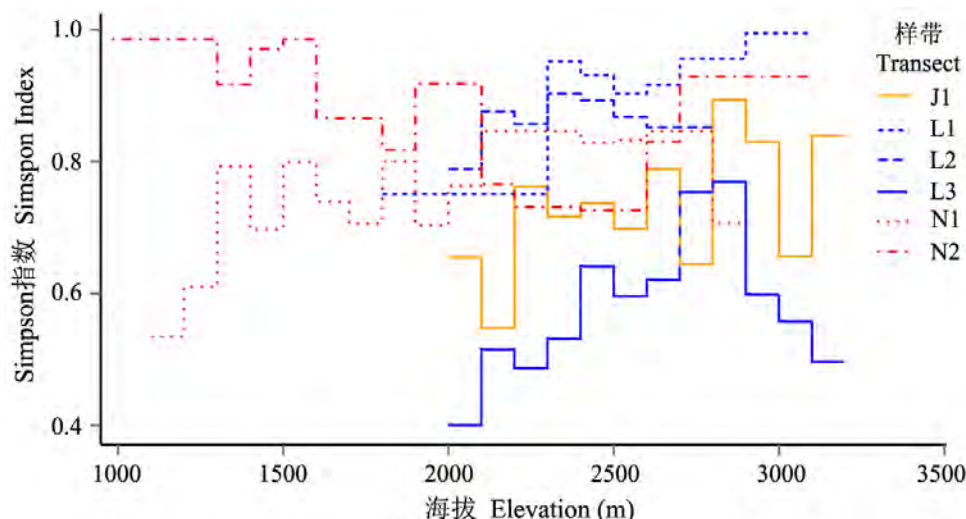


图3 不同样带植被沿海拔梯度的物种更替率(以Simpson指数表示)

Fig. 3 The species turnover rate (Simpson index) of plant community along the elevational transects of vegetation

平均水平存在明显的差异。对于怒江西坡, 北部贡山样带的 β_{sim} (0.870 ± 0.095) 大于南部的片马样带; 而对于澜沧江东坡的3条样带, 海拔梯度上 β_{sim} 平均值从南向北有降低趋势, 分别为 0.915 ± 0.033 (兰坪), 0.863 ± 0.037 (维西) 和 0.581 ± 0.108 (德钦); 金沙江样带处于白马雪山东坡, 与澜沧江的德钦样带(L3)处在同一纬度, 但 β_{sim} (0.731 ± 0.098) 高于后者。

6条样带的物种更替速率也呈现了不一致的海拔梯度格局(图3)。位于白马雪山东、西坡的金沙江样带J1和澜沧江样带L3, 其 β_{sim} 大致呈现了单峰格局, 且两者的最高值都出现在海拔2,800 m; 澜沧江样带L2的 β_{sim} 峰值下降到海拔2,300–2,400 m处, 而澜沧江样带L1的 β_{sim} 却在此海拔位置以上继续增大。怒江南北两条样带的物种更替速率呈现相反的海拔梯度格局。在南部片马的样带N1, β_{sim} 有大致向上的单峰格局, 高值区在海拔2,100–2,800 m之间; 而北部贡山的样带N2, β_{sim} 却表现了一个明显的倒单峰格局, 在低海拔段数值最高, 而在海拔2,400–2,600 m段最低。

2.5 样带间植物 β 多样性的格局

12个样带段的随机抽样(重复1,000次)统计表明(附录2), 群落间物种构成的变异性很大, β_{sim} 值为 0.845 ± 0.118 。总体上, 样带森林段之间的物种更替率与低海拔灌草丛段相近, β_{sim} 值分别为 0.844 ± 0.105 和 0.850 ± 0.121 , 并且单一因素的差异在统计上不显著。

所有样带的森林段或灌草丛段, 都是与同一样带的另一部分(灌草丛段或森林段)之间的物种更替率最小, β_{sim} 均值为0.687, 小于同一流域不同样带相同植被段之间物种更替率的均值(灌草丛段之间 = 0.797; 森林段之间 = 0.776), 更小于所有样带相同植被段之间的更替率均值(灌草丛段之间 = 0.850; 森林段之间 = 0.844)。

金沙江样带两段与相邻的澜沧江6个样带段之间的 β_{sim} (0.905 ± 0.055) 小于其与怒江4个样带段 β_{sim} 的均值 (0.958 ± 0.015); 而所有澜沧江样带段与怒江样带段之间 β_{sim} 值 0.846 ± 0.086 , 小于其与金沙江样带段之间的指数均值 0.905 ± 0.055 。

方差分析结果表明, 以样带植被带段为统计单位的物种更替的所有变化中, 空间隔离因素可以解释34.2%, 而植被类型差异仅能解释不到0.5%。

3 讨论

3.1 植物 α 多样性海拔梯度的比较和影响因素

作为生物多样性的全球热点区域, 滇西北三江并流地区的植被和生物多样性分布格局引人注目, 尤其是独具特色的平行岭谷地貌带来的显著海拔梯度分异(明庆忠和史正涛, 2007)。此前, 对于境内的高黎贡山(王志恒等, 2004; 孙振华等, 2007; Wang et al, 2007)、梅里雪山(张志明等, 2009)、玉龙雪山(冯建孟等, 2006)等已有不少相关的研究, 但都是基于区域物种分布海拔范围数据推算的结果, 均发现

这些山地植物物种丰富度的海拔分布呈现单峰格局。Yang等(2016)基于1,000 m²样带对白马雪山东西坡物种丰富度进行的对比分析也大致反映了类似的趋势。但是,本文比较3个流域中分布在南北不同纬度的6条海拔样带的 α 多样性格局,发现局部尺度的物种丰富度海拔格局并不一致。其中怒江2条样带和澜沧江中、南部的2条样带都显示了在海拔2,000 m左右的高峰值,并特别表现在灌木种和草本种,而位于区域东北部白马雪山东西坡的金沙江样带(J1)和澜沧江样带(L3)都显示 α 多样性峰值在海拔3,000 m以上,特别是木本植物。

这两种 α 多样性海拔梯度模式的存在与区域气候的整体格局应有密切联系。由于印度洋季风对区域气候的主导性影响,区域内降水整体上呈现西高东低、南高北低的趋势(吴绍洪等, 2009),高黎贡山北段西坡和白马雪山北段东坡分别成为区域的“湿极”和“旱极”,因此在海拔梯度的下部,流域内从西向东、从南向北所受的干旱胁迫渐趋严重,而山地中上部的森林带内湿度差逐渐减小。这种环境变化可以解释诸样带之间灌木种丰富度自西向东显著增加,而草本种和乔木种丰富度(不显著)降低的格局(表2);而灌木和草本种丰富度随海拔上升而显著增加的趋势也应与水分条件同方向改善有直接的联系。同时,水分条件的限制也强化了局部地形特征对物种丰富度的影响,如草本和乔木种的丰富度从北坡向南坡降低,灌木种则相反;草本和乔木种丰富度随坡度增大而减少,灌木种则增加。这3种生长型的种丰富度在局部和区域尺度上的差异性变化具有一致性的格局,显示水分条件在不同尺度上对区内植物物种多样性分布具有突出的限制作用,以及灌木生长型对干旱气候的适应。灌草丛带的植被极为特殊,与非洲和印度等地大量分布的稀树干草原(Savanna)植被的外貌、结构和区系等相似(欧晓昆和金振洲, 1996)。灌木生长型主要存在于灌草丛带,其优势种以马棘、清香木、地氈、地桃花、川西白刺花等适应干旱气候的灌木为主,自西向东不同流域水分减少,使得适应湿润气候的草本和乔木物种减少,适应干旱气候的灌木物种优势突出,稀树干草原植被更为典型,从而造成了灌木生长型与木本和草本的分布差异。

3.2 物种更替的区域格局与主导因素

不同植被类型之间的交错带通常导致海拔梯

度上 β 多样性的峰值(沈泽昊等, 2004; Rossatto, 2009)。在研究区内三个流域的6条植被样带上, β 多样性同样显示了多种海拔梯度格局,包括单峰、上升梯度、平台甚至中部低谷等(图3)。不同位置的样带所显示出的 β 多样性海拔梯度变化均有不同,这主要与样带每个海拔梯度上所取样方较少从而导致物种随机变化较大有关。但总体来看,这些起伏之中存在的峰值都与样带上不同植被类型之间的过渡带海拔密切相关。白马雪山东、西坡样带(J1和L3)处于同一纬度,灌丛带过渡到森林带的海拔都在2,700–2,900 m。澜沧江中、南段的两条样带L1和L2上这一植被交错带在2,300–2,400 m之间也对应于 β 多样性峰值。怒江北部N2样带的 β 多样性海拔梯度在1,900–2,000 m出现峰值,南部N1样带的 β 多样性海拔梯度在2,100–2,200 m出现峰值,均对应于两条样带的植被交错带。 β 多样性主要受到空间距离和环境距离的影响,本研究中样带内样方之间的空间距离基本相近,差别在于环境距离不同。环境距离是由环境因子差异所产生,各海拔梯度之间海拔距离相近,依赖于海拔变化所产生的温度和降水变化也相近,因此植被类型的变化便成为了影响环境变化的主要因素。在剧烈的环境变化条件下,植物物种的 β 多样性也会显示出峰值。也正是这些原因形成了 β 多样性随海拔呈波浪式变化,且在植被类型过渡带处呈现峰值的特点。

群落物种构成的更替主要受环境差异和距离产生的扩散限制影响(Graham & Fine, 2008; Novillo & Ojeda, 2014);且在区域尺度上,扩散限制的成因往往不仅仅是空间几何距离(Qian et al, 2009; Svenning et al, 2010)。分隔在3条河流中的6条样带12个植被带段之间的物种更替显示了3方面因素的影响,但最为突出的显然是地形隔离对物种分布的影响(附录2)。一方面,因为不同河流样带段之间的几何距离常常小于同一河流不同样带段之间的距离,如N1–N2的距离就大于N1–L1、N1–L2、N2–L1、N2–L2、N2–L3以及N2–J1,而L3–J1的距离小于L2–L3和L1–L3,但不同河流之间样带段的物种更替率明显较大;而同一样带上、下两段之间主要由于气候差异产生的物种更替率效应远低于区域隔离的效应。另一方面,位于海拔梯度下部的干旱河谷灌草丛植被之间比中部森林带之间的隔离程度应该更强。可见在研究区域尺度上,岭谷地形隔离对植物

群落的物种更替具有最重要的影响。当然, 由于经、纬度方向上明显的气温和降水梯度的存在, 区域环境(特别是气候)梯度可能是未能解释的物种更替格局变异性的另一重要原因。

怒江、澜沧江和金沙江三个流域6条样带植物种 α 和 β 多样性海拔梯度的变化格局, 反映了它们与区域内显著的地形起伏隔离、气候垂直梯度与地理分异之间的联系, 这也许正是区内生物多样性丰富的重要成因。大量的生物多样性区域研究也都证实了气候和环境隔离因素的贡献(Peixoto et al, 2014; Yang et al, 2016)。本研究没有直接分析物种丰富度和物种更替的空间格局与气候因子的定量关系, 主要是因为在这一地形起伏剧烈的区域, 缺少高空间分辨率的气候数据来准确描述气温和降水的地理变异, 而基于少数气象台站的观测数据难以胜任相关的分析。随着更多观测数据的积累, 未来有望更细致地分析和理解本区生物多样性及其分异格局的环境机制。

参考文献

- Alicia MY, Moreno LA, Piñero D, Jorgensen TH, Emerson BC (2015) Biodiversity in the mexican highlands and the interaction of geology, geography and climate within the trans-mexican volcanic belt. *Journal of Biogeography*, 42, 1586–1600.
- Barthlott W, Hostert A, Kier G, Kueper W, Kreft H, Mutke J (2007) Geographic patterns of vascular plant diversity at continental to global scales. *Erdkunde*, 61, 305–315.
- Baselga A (2010) Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Archives Danatomie Dhistologie Et Dembryologie Normales Et Expérimentales*, 19, 134–143.
- Baselga A, Leprieur F (2015) Comparing methods to separate components of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 1069–1079.
- Beck J, Chey VK (2008) Explaining the elevational diversity pattern of geometrid moths from borneo: a test of five hypotheses. *Journal of Biogeography*, 35, 1452–1464.
- Beck J, Kitching IJ (2009) Drivers of moth species richness on tropical altitudinal gradients: a cross-regional comparison. *Global Ecology & Biogeography*, 18, 361–371.
- Bram V, Falko B, Luc B (2013) Disturbance regime alters the impact of dispersal on alpha and beta diversity in a natural metacommunity. *Ecology*, 11, 2547–2557.
- Colwell RK, Rahbek C, Gotelli N (2004) The mid-domain effect and species richness patterns: what have we learned so far? *The American Naturalist*, 163, E1–E23.
- Donzelli D, DeMichele C, Scholes RJ (2013) Competition between trees and grasses for both soil water and mineral nitrogen in dry savannas. *Journal of Theoretical Biology*, 332, 181–190.
- Fang JY (2004) Exploring altitudinal patterns of plant diversity of China's mountains. *Biodiversity Science*, 12, 1–4. (in Chinese) [方精云 (2004) 探索中国山地植物多样性的分布规律. *生物多样性*, 12, 1–4.]
- Feng JM, Wang XP, Xu CD, Yang YH, Fang JY (2006) Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 24, 110–116. (in Chinese with English abstract) [冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云 (2006) 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局. *山地学报*, 24, 110–116.]
- Graham CH, Fine PVA (2008) Phylogenetic beta diversity: linking ecological and evolutionary processes across space in time. *Ecology Letters*, 11, 1265–1277.
- Grytnes JA (2003) Species-richness patterns of vascular plants along seven altitudinal transects in Norway. *Ecography*, 26, 291–300.
- Grytnes JA, Heegaard E, Romdal TS (2008) Can the mass effect explain the mid-altitudinal peak in vascular plant species richness? *Basic and Applied Ecology*, 9, 373–382.
- He JS, Chen WL (1997) A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta ecologica sinica*, 17, 91–99. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 陈伟烈 (1997) 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 17, 91–99.]
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain, Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22(5), 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山——云南高原干热河谷形成原因研究. *资源科学*, 22(5), 69–72.]
- Hubbell SP (1979) Tree dispersion, abundance, and diversity in a tropical dry forest. *Science*, 203, 1299–1309.
- Jiang LG, Liu XN, Feng ZM (2014) Spatial-temporal pattern analysis of land use and land cover change in Xishuangbanna. *Resources Science*, 36(2), 259–266. (in Chinese with English abstract) [姜鲁光, 刘晓娜, 封志明 (2014) 西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析. *资源科学*, 36(2), 259–266.]
- Jiang Y, Kang MY, Zhu Y, Xu GC (2007) Plant biodiversity patterns on Helan Mountain, China. *Acta Oecologica*, 32, 125–133.
- Kessler M (2000) Altitudinal zonation of andean cryptogam communities. *Journal of Biogeography*, 27, 275–282.
- Kraaij T, Ward D (2006) Effects of rain, nitrogen, fire and grazing on tree recruitment and early survival in bush-encroached savanna, South Africa. *Plant Ecology*, 186, 235–246.
- Li K, Liu FY, Yang ZY, Sun YY (2011) Study status and trends of vegetation restoration of dry-hot valley in South-west China. *World Forestry Research*, 24(4), 55–60. (in Chinese with English abstract) [李昆, 刘方炎, 杨振寅, 孙

- 永玉 (2011) 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发展趋势. 世界林业研究, 24(4), 55–60.]
- Li XW (1995) A floristic study on the seed plants from the region of Yunnan Plateau. Acta Botanica Yunnanica, 17(1), 1–14. (in Chinese with English abstract) [李锡文 (1995) 云南高原地区种子植物区系. 云南植物研究, 17(1), 1–14.]
- Liu FY, Li K, Sun YY, Tang GY, Zhang CH (2010) Effects of climate on vegetation recovery in dry-hot valleys of Hengduan Mountainous region in Southwest China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 19, 1386–1391. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 李昆, 孙永玉, 唐国勇, 张春华 (2010) 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响. 长江流域资源与环境, 19, 1386–1391.]
- MacArthur RH (1972) Mathematical ecology and its place among the sciences. Science, 178, 389–394.
- Ma K, Li YN, Jin H, Long ZH, Lu YP (2011) A comparison of the species diversity of *Trollius chinensis* community in different habitats. Pratacultural Science, 28, 1467–1472. (in Chinese with English abstract) [马凯, 李永宁, 金辉, 龙在海, 卢银平 (2011) 不同生境类型金莲花群落物种多样性比较. 草业科学, 28, 1467–1472.]
- McCain CM, Sanders NJ (2010) Metabolic theory and elevational diversity of vertebrate ectotherms. Ecology, 91, 601–609.
- Ming QZ, Shi ZT (2007) New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region. Journal of Desert Research, 27(1), 99–104. (in Chinese with English abstract) [明庆忠, 史正涛 (2007) 三江并流区干热河谷成因新探析. 中国沙漠, 27, 99–104.]
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Da FG, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403, 853–858.
- Nong Y, Zheng L, Jia HY, Lu LH, Huang DW, Huang BH, Lei LQ (2015) Community characteristics and spatial distribution of dominant tree species in a secondary forest of Daqing Mountains, southwestern Guangxi, China. Biodiversity Science, 23, 321–331. (in Chinese with English abstract) [农友, 郑璐, 贾宏炎, 卢立华, 黄德卫, 黄柏华, 雷丽群 (2015) 广西大青山次生林的群落特征及主要乔木种群的空间分布格局. 生物多样性, 23, 321–331.]
- Novillo A, Ojeda RA (2014) Elevation patterns in rodent diversity in the dry Andes: disentangling the role of environmental factors. Journal of Mammalogy, 95, 99–107.
- O'Brien EM, Field R, Whittaker RJ (2000) Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: water-energy dynamics, residual variation, and topography. Oikos, 89, 588–600.
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot Valley. Journal of Wuhan Botanical Research, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. 武汉植物研究, 14, 318–322.]
- Peixoto FP, Braga PHP, Cianciaruso MV, Diniz-Filho JAF, Brito D (2014) Global patterns of phylogenetic beta diversity components in bats. Journal of Biogeography, 41, 762–772.
- Qian H, Badgley C, Fox DL (2009) The latitudinal gradient of beta diversity in relation to climate and topography for mammals in North America. Global Ecology and Biogeography, 18, 111–122.
- Rahbek, C. (2005). The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. Ecology Letters, 8, 224–239.
- Rossatto DR, Hoffmann WA, Franco AC (2009) Differences in growth patterns between co-occurring forest and savanna trees affect the forest–savanna boundary. Functional Ecology, 23, 689–698.
- Ruifrok JL, Postma F, Olff H, Smit C (2014) Scale-dependent effects of grazing and topographic heterogeneity on plant species richness in a Dutch salt marsh ecosystem. Applied Vegetation Science, 17, 615–624.
- Salazar A, Goldstein G, Franco AC (2012) Differential seedling establishment of woody plants along a tree density gradient in Neotropical savannas. Journal of Ecology, 100, 1411–1421.
- Sankaran M, Ratnam J, Hanan N (2008) Woody cover in African savannas: the role of resources, fire and herbivory. Global Ecology and Biogeography, 17, 236–245.
- Shen R, Zhang JL, He B, Li F, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuanjiang River. Ecology and Environmental Sciences, 19, 2821–2825. (in Chinese with English abstract) [沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. 生态环境学报, 19, 2821–2825.]
- Shen ZH, Hu HF, Zhou Y, Fang JY (2004) Altitudinal patterns of plant species diversity on the southern slope of Mt. Shennongjia, Hubei, China. Biodiversity Science, 12, 99–107. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 胡会峰, 周宇, 方精云 (2004) 神农架南坡植物群落多样性的海拔梯度格局. 生物多样性, 12, 99–107.]
- Shen ZH, Zhang XS (2000) A quantitative analysis on the floristic elements of the Chinese subtropical region and their spatial patterns. Acta phytotaxonomica Sinica, 38, 366–380. [沈泽昊, 张新时 (2000) 中国亚热带地区植物区系地理成分及其空间格局的数量分析. 植物分类学报, 38, 366–380.]
- Slik JWF, Raes N, Aiba SI, Brearley FQ, Cannon CH (2009) Environmental correlates for tropical tree diversity and distribution patterns in Borneo. Diversity and Distributions, 19, 523–532.
- Stevens G (1996) Extending rapoport's rule to pacific marine fishes. Journal of Biogeography, 23, 149–154.
- Sun ZH, Peng SJ, Ou XK (2007) A quick assessment and environmental interpretation for the tree species richness in the

- Gaoligong Mountain Range. *Chinese Science Bulletin*, 52(S2), 195–200. [孙振华, 彭声静, 欧晓昆 (2007) 高黎贡山乔木树种丰富度快速评估及其环境解释. *科学通报*, 52(S2), 195–200.]
- Svenning JC, Fitzpatrick MC, Normand S, Graham CH, Pearman PB, Iverson LR, Skov F (2010) Geography, topography, and history affect realized-to-potential tree species richness patterns in Europe. *Ecography*, 33, 1070–1080.
- Tao J, Zang RG, Yu CY (2011) Altitudinal patterns of plant communities and species diversity in the Habaxueshan Mountains, Yunnan, China. *Scientia Sinicae*, 47(7), 1–6. (in Chinese with English abstract) [陶晶, 臧润国, 余昌元 (2011) 云南哈巴雪山植物群落和植物多样性海拔梯度分布格局. *林业科学*, 47(7), 1–6.]
- Tang ZY, Fang JY (2004) A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Sciences*, 2004, 12, 20–28. (in Chinese with English abstract) [唐志尧, 方精云 (2004) 植物物种多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 12, 20–28.]
- Valdés A, Lenoir J, Emilie GM, Andrieu E, Brunet J, Chabrierie O, Déborah CK, Cousins SA, Deconchat M, Frenne PD, Smedt PD, Diekmann M, Hansen K, Hermy M, Kolb A, Liira J, Lindgren J, Naaf T, Paal T, Prokofieva I, Michael SL, Wulf M, Verheyen K, Decocq G (2015) The contribution of patch-scale conditions is greater than that of macroclimate in explaining local plant diversity in fragmented forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1094–1105.
- Vega RV, Salazar A, Wilhelm FM (2014) Do groundwater dynamics drive spatial patterns of tree density and diversity in Neotropical savannas. *Journal of Vegetation Science*, 25, 1465–1473.
- Wang KQ, Shen YX, Chen QB, Wang ZH (2004) Soil water environment of artificial vegetation in Jinshajiang dry-hot valley. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 809–813. (in Chinese with English abstract) [王克勤, 沈有信, 陈奇伯, 王震洪 (2004) 金沙江干热河谷人工植被土壤水环境. *应用生态学报*, 15, 809–813.]
- Wang ZH, Chen AP, Piao SL, Fang JY (2004) Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China. *Biodiversity Science*, 12, 82–88. (in Chinese with English abstract) [王志恒, 陈安平, 朴世龙, 方精云 (2004) 高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的变化. *生物多样性*, 12, 82–88.]
- Wang ZH, Tang ZY, Fang JY (2007) Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, southeast Tibet, China. *Diversity and Distributions*, 13, 845–854.
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338.
- Wu SH, Zhang YP (2009) The Special Environmental Patterns and Ecological Impacts in the Longitudinal Range-Gorge Region. Science Press, Beijing. (in Chinese with English abstract) [吴绍洪, 张一平 (2009) 纵向岭谷区特殊环境格局与生态效应. 科学出版社, 北京.]
- Wu Y, Colwell RK, Han N, Zhang R, Wang W, Quan Q, Zhang C, Song G, Qu Y, Lei F (2014) Understanding historical and current patterns of species richness of babblers along a 5000 m subtropical elevational gradient. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1167–1176.
- Xu J, Zhang BP, Zhu YH, Sun RH (2006) Distribution and geographical analysis of altitudinal belts in the Altun-Qilian Mountains. *Geographical Research*, 25, 977–984. (in Chinese with English abstract) [许娟, 张百平, 朱运海, 孙然好 (2006) 阿尔金山-祁连山山地植被垂直带谱分布及地学分析. *地理研究*, 25, 977–984.]
- Yang D, Xiong DH, Zhai J, Li JJ, Su ZA, Dong YF (2012) Morphological characteristics and causes of gullies in Yuanmou dry-hot valley region. *Science of Soil and Water Conservation*, 10, 38–45. (in Chinese with English abstract) [杨丹, 熊东红, 翟娟, 李佳佳, 苏正安, 董一帆 (2012) 元谋干热河谷冲沟形态特征及其成因. *中国水土保持科学*, 10, 38–45.]
- Yang R, Zhang BR, Wang LL, Yang JJ, Su WH, Zhang GF, Yang B, Zhou R (2010) The response of plant functional traits' group to gradients of altitude in dry-hot valley of Yuan-Mou. *Ecology and Environmental Sciences*, 24, 49–56. (in Chinese with English abstract) [杨锐, 张博睿, 王玲玲, 杨建军, 苏文华, 张光飞, 杨波, 周睿 (2010) 元谋干热河谷植物功能性状组合的海拔梯度响应. *生态环境学报*, 24, 49–56.]
- Yang Y, Shen Z, Han J, Zhongyong C (2016) Elevational gradients of plant species diversity along east and west slopes of Baima Snow Mountain in Southwest China. *Forests*, 7, 89–105.
- Zhang JL, Liu XK, Shen R, Shi W, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The species quantitative & diversity characteristic of grassland community in hot-dry valley of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1519–1524. (in Chinese with English abstract) [张建利, 柳小康, 沈蕊, 施雯, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 金沙江流域干热河谷草地群落物种数量及多样性特征. *生态环境学报*, 19, 1519–1524.]
- Zhang YP, Duan ZX, Dou JX (2005) Comparison of climate characteristics between a dry-warm valley in upper reaches of Min River and a dry-hot valley of Yuanjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 14(1), 76–82. (in Chinese with English abstract) [张一平, 段泽新, 窦军霞 (2005) 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究. *长江流域资源与环境*, 14(1), 76–82.]
- Zhang ZM, Wang WL, Ou XK, Wu WQ (2009) The correlation between vegetation spatial pattern and environmental factors. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 31, 311–315. (in Chinese with English abstract) [张志明, 王文礼, 欧晓昆, 吴伟强 (2009) 梅里雪山植被空间格局与环境因子关系分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 31, 311–315.]

Zhao L, Lang NJ, Zheng K, Peng MJ (2006) A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan Province. *Forest Inventory and Planning*, 31(3), 114–117. (in Chinese with English abstract) [赵琳, 郎南军,

郑科, 彭明俊 (2006) 云南干热河谷生态环境特性研究. *林业调查规划*, 31(3), 114–117.]

(责任编辑: 王国宏 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 怒江、澜沧江和金沙江6条样带的植物物种丰富度的均值(100 m²样方内)和变化范围(括号内), 包括全部种、乔木、灌木和草本(含蕨类)种类。

Appendix 1 The mean values and value ranges (in parentheses) of species richness within the plot area 100 m² of the six altitudinal transects in Nu River, Lancang River and Jinsha River, including total species richness and those of trees, shrubs, herbs (ferns). <http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015361-1.pdf>

附录2 不同样带段之间的物种更替率(Simpson指数)。样地代号见表1。s: 灌草丛段; f: 森林段。

Appendix 2 Species turnover rate (Simpson index) between sections of the sampled transects. The plot codes refer to Table 1. S, Shrubs and herbs section of the transect; f, Forest section of the transect. <http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015361-2.pdf>

杨阳, 韩杰, 刘晔, 忠永茨仁, 石松林, 斯那此里, 许玥, 应凌霄, 张婉君, 沈泽昊. 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较. 生物多样性, 2016, **24** (4): 440–452.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015361>

附录1 怒江、澜沧江和金沙江6条样带的植物物种丰富度的均值(100 m²样方内)和变化范围(括号内), 包括全部种、乔木、灌木和草本(含蕨类)种类。

Appendix 1 The mean values and value ranges (in parentheses) of species richness within the plot area 100 m² of the six altitudinal transects in Nu River, Lancang River and Jinsha River, including total species richness and those of trees, shrubs, herbs (ferns).

| 样带 Transect | 全部物种 Total species | 乔木种数 Tree species | 灌木种数 Shrub species | 草本种数 Herb species |
|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| J1 | 8.7 (1–24) | 8.2 (2–18) | 1.9 (0–11) | 18.7 (6–47) |
| L1 | 21.6 (6–39) | 11.2 (0–25) | 1.9 (0–10) | 34.7 (19–51) |
| L2 | 22.9 (0–54) | 9.3 (0–24) | 0.5 (0–4) | 32.7 (1–69) |
| L3 | 9.6 (1–25) | 7.9 (2–15) | 0.5 (0–4) | 18.1 (7–39) |
| N1 | 30.9 (12–66) | 13.4 (4–29) | 2.2 (0–14) | 46.4 (27–91) |
| N2 | 23.7 (9–59) | 9.7 (2–24) | 2.8 (0–14) | 36.0 (15–68) |

附录2 不同样带段之间的物种更替率(Simpson指数)。样地代号见表1。s: 灌草丛段; f: 森林段。

Appendix 2 Species turnover rate (Simpson index) between sections of the sampled transects. The plot codes refer to Table 1. S, Shrubs and herbs section of the transect, f, Forest section of the transect.

| | J1-s | J1-f | L1-s | L1-f | L2-s | L2-f | L3-s | L3-f | N1-s | N1-f | N2-s |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| J1-f | 0.608 | | | | | | | | | | |
| L1-s | 0.959 | 0.959 | | | | | | | | | |
| L1-f | 0.955 | 0.907 | 0.822 | | | | | | | | |
| L2-s | 0.926 | 0.929 | 0.697 | 0.634 | | | | | | | |
| L2-f | 0.932 | 0.918 | 0.738 | 0.660 | 0.520 | | | | | | |
| L3-s | 0.787 | 0.827 | 0.957 | 0.945 | 0.928 | 0.940 | | | | | |
| L3-f | 0.916 | 0.846 | 0.950 | 0.884 | 0.903 | 0.935 | 0.825 | | | | |
| N1-s | 0.968 | 0.949 | 0.779 | 0.819 | 0.725 | 0.742 | 0.960 | 0.975 | | | |
| N1-f | 0.978 | 0.965 | 0.924 | 0.799 | 0.787 | 0.824 | 0.972 | 0.940 | 0.685 | | |
| N2-s | 0.967 | 0.955 | 0.807 | 0.802 | 0.739 | 0.781 | 0.950 | 0.923 | 0.606 | 0.652 | |
| N2-f | 0.958 | 0.928 | 0.883 | 0.738 | 0.798 | 0.779 | 0.954 | 0.910 | 0.725 | 0.628 | 0.664 |

• 研究报告 •

气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区 清香木潜在分布格局模拟

应凌霄¹ 刘 晔² 陈绍田³ 沈泽昊^{1*}¹ (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)² (北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东深圳 518055)³ (中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650204)

摘要: 清香木(*Pistacia weinmannifolia*)是中国西南干旱河谷植被的特征种。本文利用野外调查的165个清香木分布点信息以及22个环境变量数据, 基于最大熵(Maxent)算法构建清香木分布的适宜生境预测模型, 并据此模拟清香木在我国西南地区的适宜分布区, 以及历史和未来不同气候情景下的分布格局变化。结果表明: 清香木生境预测的Maxent模型准确性非常高(AUC = 0.974), 温度季节性变化、极端低温和降水量是限制其分布的主要气候因子。清香木当前的潜在分布区集中在我国西南干旱河谷区, 其适宜生境的气候特征是降水少、温度季节性变化小且无极端低温。对清香木在末次间冰期和末次冰盛期分布的模拟结果表明, 其分布区范围均以诸大江河的河谷为中心, 随气候变化在我国西南地区主要呈现先向东扩张, 然后向西退缩的趋势, 并印证了“冰期走出横断山(glacial out-of-Hengduan Mts.)”的观点。在未来(2061–2080年)3种典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)的气候情景下, 清香木在我国西南地区的分布都向东扩张, 主要分布在云贵高原与四川盆地结合地带的河谷, 以及云贵高原与广西西部交界地带的河谷中, 这也反映了这些地区河谷地段干旱化的可能, 而当前的潜在分布区趋于消失; 清香木的潜在适宜分布面积在中低浓度路径情景下均将减少约33%, 而在高浓度路径情景下有所增加。

关键词: 最大熵(Maxent)模型; 清香木; 物种分布区; 适宜生境; 气候变化

Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China with climate change based on the maximum-entropy (Maxent) model

Lingxiao Ying¹, Ye Liu², Shaotian Chen³, Zehao Shen^{1*}¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871² School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055³ Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204

Abstract: *Pistacia weinmannifolia* is a characteristic species of dry valleys in Southwest China. In this study, 165 presence points of *P. weinmannifolia* were identified through field surveys, along with point data of 22 environmental factors. The suitable habitat model was formulated using the maximum-entropy (Maxent) algorithm and applied to simulate the potential range of the species in Southwest China, and to project the change of species range in past and future climate scenarios. The results indicate that the Maxent model gave a high accuracy in habitat predictions for *P. weinmannifolia*. Temperature seasonality, minimum temperature and precipitation were the major constraining climatic factors. Contemporarily, the environment suitable for *P. weinmannifolia* was located in the dry valleys of major rivers in Southwest China, and the regions was characterized by decreased temperature variability, no temperatures below 0°C, and low precipitation. Simulations using climate scenarios of the Last Inter-Glacial (LIG) and Last Glacial Maximum (LGM) periods in-

收稿日期: 2015-09-14; 接受日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)和交通运输部西部计划项目(2008 318 799 17)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

indicated that the distribution of *P. weinmannifolia* was centered around the valleys of major rivers in Southwest China, substantially expanded eastward first, and retreated westward following climate change during glacial and inter-glacial periods, supporting the hypothesis of “glacial out-of-Hengduan Mts.”. Under the future climate scenario (2061–2080) with three representative concentration pathways (RCPs), the potential distribution of *P. weinmannifolia* was projected to migrate eastward to the valleys in the adjacent region of the Yunnan-Guizhou Plateau and Sichuan Basin, and the adjacent region of the Plateau and western Guangxi, reflecting a high possibility of increasing dryness in the river valleys in the future, while its current distribution might disappear. The potential distribution of *P. weinmannifolia* would decrease by 33% in Southwest China under the future scenario with both RCP2.6 and 4.5, but would increase with RCP8.5.

Key words: Maxent model; *Pistacia weinmannifolia*; species range; suitable habitat; climate change

植被–气候相互作用关系是生物地理学和全球变化研究的热点问题之一(Bellard et al, 2012)。气候变化对生态系统结构和功能、群落组成及物种分布均有影响(Chen et al, 2011; Ruiz-Labourdette et al, 2012; Pio et al, 2014; Dieleman et al, 2015)。气候的历史变化塑造了物种当前的分布格局(Veloz et al, 2012), 未来的气候变化会继续对它施加影响(Thuiller et al, 2011; Bellard et al, 2012)。气候作为重要的环境驱动因子, 物种分布格局对其变化有着最直接的响应。利用物种分布模型(species distribution model, SDM)模拟气候变化情景下物种的适宜分布格局已得到广泛应用(van der Wal et al, 2013; Gelviz-Gelvez et al, 2015; Moor et al, 2015)。最大熵(maximum-entropy, Maxent)模型是其中的一种机器学习算法模型, 该算法采取Maxent原则, 可最大程度不约束任何未知分布信息, 而更多地保留物种已有分布环境变量数据的信息约束, 从而可以科学地预测物种潜在的分布区域。与其他SDM相比, Maxent模型在只依据存在数据、存在分布点数量不定、各气候环境因子之间相关性不明确的情况下, 预测效果较好(Elith et al, 2006; Philips et al, 2006; Philips & Dudík, 2008)。

清香木(*Pistacia weinmannifolia*)是漆树科黄连木属(*Pistacia*)的一种常绿灌木或小乔木, 耐寒、耐旱, 是广泛分布于中国西南干旱河谷的特有种(傅立国, 2001)。目前, 对清香木的研究多集中在其种群生态、生理生化、药用价值等方面(Zhao et al, 2005; 周葆华, 2008; 王妍等, 2014; 余德会等, 2014), 而对其地理分布的研究很少(王妍等, 2013)。王妍等(2013)初步调查了云南省干旱河谷地区清香木的分布现状, 发现尽管其分布范围较大, 但由于砍伐、火烧以及开荒等人为因素的干扰, 其

野外种群分布已明显减少, 且其分布格局多呈零散状。

本文利用我国西南地区主要河流的干旱河谷野外调查的植被数据, 运用Maxent算法构建了清香木的物种分布模型, 着重研究以下问题: (1)清香木在中国西南地区的潜在适宜分布格局及其与环境因子的关系; (2)历史气候变化情景下, 清香木在中国西南地区的潜在适宜分布范围和空间格局的变化; (3)根据这一西南干旱河谷特有种的分布变化, 预测在未来气候变化情景下, 中国西南干旱河谷的环境范围与分布的变化。研究结果将为清香木资源的保护和管理提供科学依据。

1 方法

1.1 研究区域与野外数据收集

根据《中国高等植物》(傅立国, 2001)记录的清香木县域分布范围, 划定研究区为我国西南地区, 即西藏、云南、广西、贵州、四川和重庆; 在2009–2014年期间, 通过对该区域内各大江河干旱河谷植被进行系统的样方调查, 共采集到165个清香木种群, 得到其地理坐标信息(图1)。

1.2 环境变量数据及预处理

从世界气候数据库(WorldClim v1.4, <http://www.worldclim.org/>)中, 提取研究区的19个气候指标数据。该数据库利用全球各地气象站记录的气象信息, 通过整合插值生成全球气候栅格数据(1950–2000年平均值), 空间分辨率为30" (约1 km)(Hijmans et al, 2005)。由于WorldClim v1.4数据在我国西南地区所用气象站数目较少, 较难反映西南干旱河谷气候的实际空间格局, 为了提高模型模拟的精度, 本文采用如下校正: 选取位于研究区内气候记录连贯性较好的133个气象站(图1, 附录1), 利用

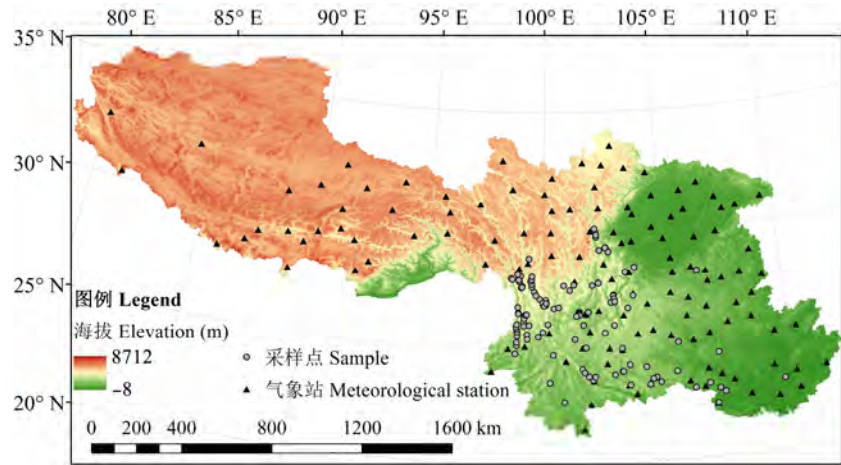


图1 研究区165个采样点和133个气象站的位置
Fig. 1 Study area and locations of 165 samples and 133 meteorological stations

表1 22个用于清香木潜在适宜分布模拟的环境变量
Table 1 22 environmental variables used for modeling potential suitable distribution of *Pistacia weinmannifolia*

| 环境变量 Environmental variables | 代号 Code |
|--|---------|
| 年均温 Mean annual temperature | Bio1 |
| 昼夜温差月均值 Mean diurnal range (Mean of monthly (max temperature – min temperature)) | Bio2 |
| 等温性 Isothermality (Bio2/Bio7 × 100) | Bio3 |
| 温度季节性变化标准差 Standard deviation of temperature seasonality | Bio4 |
| 最暖月最高温 Max. temperature of warmest month | Bio5 |
| 最冷月最低温 Min. temperature of coldest month | Bio6 |
| 温度年较差 Temperature annual range (Bio5 – Bio6) | Bio7 |
| 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter | Bio8 |
| 最干季均温 Mean temperature of driest quarter | Bio9 |
| 最暖季均温 Mean temperature of warmest quarter | Bio10 |
| 最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter | Bio11 |
| 年降水量 Annual precipitation | Bio12 |
| 最湿月降水量 Precipitation of wettest month | Bio13 |
| 最干月降水量 Precipitation of driest month | Bio14 |
| 降水量季节性变异系数 Coefficient of variation of precipitation seasonality | Bio15 |
| 最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter | Bio16 |
| 最干季降水量 Precipitation of driest quarter | Bio17 |
| 最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter | Bio18 |
| 最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter | Bio19 |
| 海拔 Elevation | – |
| 坡度 Slope | – |
| 坡向 Aspect | – |

中国气象科学数据共享服务网提供的相关点的观测数据(中国地面气候资料日值数据集v3.0, <http://cdc.nmic.cn/home.do/>)计算相应的气候变量, 采用

这些数据减去对应位置的WorldClim数据, 得到每个变量的残差值, 然后用其结合100 m分辨率的数字高程模型数据进行协同克里金(Co-Kriging)插值, 生成分辨率为100 m的残差空间分布数据, 再叠加在研究区的WorldClim数据上。

地形数据来自美国国家航空航天局发布的分辨率3"的全球数字高程模型(SRTM v4.1, <http://datamirror.csdb.cn/>), 空间分辨率约为100 m (Farr & Kobrick, 2000; van Zyl, 2001), 在ArcGIS v10.2 (<http://www.esri.com/software/arcgis/>)中应用Asia North Albers Equal Area Conic投影提取研究区内的海拔数据, 利用Spatial Analyst Tools工具中Surface模块的Slope和Aspect算法提取坡度和坡向数据, 其中坡向设定以正北为0°, 往南逐渐增大, 正南为180°。综上得到22个环境变量数据(表1)。

除当前气候外, 末次间冰期(Last Inter-Glacial, LIG, 120–140 ka)气候情景直接采用WorldClim数据库中唯一公布的美国国家大气研究中心开发的CCSM模型的推算数据(Otto-Bliesner et al, 2006); 末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM, 距今约21 ka)气候情景则来自日本东京大学气候系统研究中心、日本环境研究所和日本地球环境研究中心联合开发的适合东亚地区的MIROC模型的推算数据(Hasumi & Emori, 2004); 未来(2061–2080年)气候情景采用我国国家气候中心开发的BCC_CSM模型, 其对温度和降水各变量的模拟和预测都有较高的准确性, 并已得到广泛应用(石彦军等, 2012; 董敏

等, 2013; 周鑫等, 2014; 林壬萍和周天军, 2015)。同时, 未来气候情景包括 4 种典型浓度路径 (representative concentration pathway, RCP), 其中 RCP4.5 和 RCP6 都代表中间稳定路径, 且前者的优先性大于后者 (Moss et al, 2010)。最终我们选取了其中的 3 种: RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5, 分别代表低、中、高 3 种 CO₂ 浓度排放情景。

1.3 模型分析

将 165 个清香木种群分布的地理坐标信息和环境变量数据导入 Maxent v3.3.3 软件 (Philips et al, 2006; Philips & Dudík, 2008) 进行模拟。采用接受者操作特性 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析法进行模型精度检验, 它基于非阈值依赖判断模型精度, 以特异度 (1-specificity) 即假阳性率 (实际上不出现而预测结果出现的概率) 为横坐标, 以灵敏度 (sensitivity) 即真阳性率 (实际上出现且预测结果也出现的概率) 为纵坐标绘制曲线。ROC 曲线下方面积 (area under curve, AUC) 的大小能很好地说明模型模拟的准确性, 其取值范围为 [0, 1], AUC 越大表示模型模拟越准确。交叉验证 (cross-validation) 重复运算 10 次, 以使检验结果更加准确。同时用 Maxent v3.3.3 软件自带的 Jackknife 检验 (Miller, 1968) 确定各环境变量对清香木分布的贡献。不同历史时期的 Maxent 模拟结果均导入 ArcGIS v10.2 中进行可视化处理。为了得到物种出现概率的模型预测结果, 利用在研究区域内各大江河干旱河谷调查的 597 个样点数据 (其中包含清香木种群的样点 165 个) (刘晔等, 2016), 根据 Royle 等 (2012) 的方法, 估计模型中的 τ 值 (Merow et al, 2013) 为 0.5108。为了便于显示, 设定物种出现概率为 0.75–1.00 的地区为清香木最适宜分布区, 出现概率为 0.50–0.75 的地区为比较适宜分布区, 出现概率小于 0.50 的地区为不适宜分布区, 计算各个时期清香木潜在适宜分布区面积。

2 结果

2.1 清香木潜在适宜分布格局及主要环境影响因子

由图 2 可知, 模型的 AUC 值达 0.974, 表明模型预测的准确性非常高。温度季节性变化标准差、等温性、最湿月降水量、温度年较差、最湿季均温、年均温、年降水量、最冷季均温等是影响清香木潜在分布的主要环境变量, 其总贡献超过 80% (表 2)。

清香木适宜分布于温度季节性变化小、无低温冻害、降水少的生境 (表 2)。当前, 研究区内清香木的最适宜和比较适宜分布区集中于各干旱河谷中, 主要包括怒江和澜沧江中上游、元江和南盘江上游、金沙江的全部以及雅砻江、大渡河下段 (图 3c)。

2.2 气候变化情景下清香木的潜在适宜分布范围和空间格局的变化

在末次间冰期, 研究区内清香木的潜在适宜分布范围非常小, 集中在云南中东部的高原河谷中,

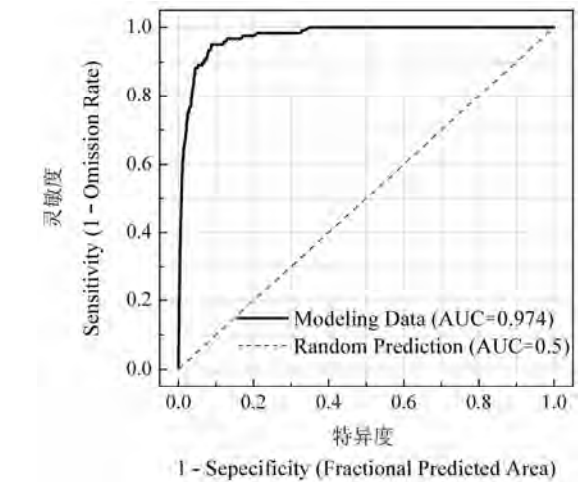


图2 清香木Maxent模型的接受者操作特性曲线
Fig. 2 Reveiver operating characteristic (ROC) curve of Max-ent model for *Pistacia weinmannifolia*

表2 影响清香木潜在适宜分布的主要环境变量
Table 2 Dominant environmental variables for potential suitable distribution of *Pistacia weinmannifolia*

| 环境变量 Environmental variables | 贡献率 Contribution (%) | 相关性 Correlation* |
|--|-------------------------|---------------------|
| 温度季节变化标准差 SD of temperature seasonality | 24.2 | — |
| 等温性 Isothermality | 15.3 | + |
| 最湿月降水量 Precipitation of wettest month | 11.2 | — |
| 温度年较差 Temperature annual range | 9.8 | — |
| 最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter | 7.6 | — |
| 年均温 Mean annual temperature | 6.7 | + |
| 年降水量 Annual precipitation | 4.5 | — |
| 最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter | 4.2 | + |

*清香木出现概率与环境变量的相关性, “+”: 正相关, “—”: 负相关。
* The correlation between probability of occurrence for *Pistacia weinmannifolia* and environmental variable, “+”, Positive correlation, “—”, Negative correlation.

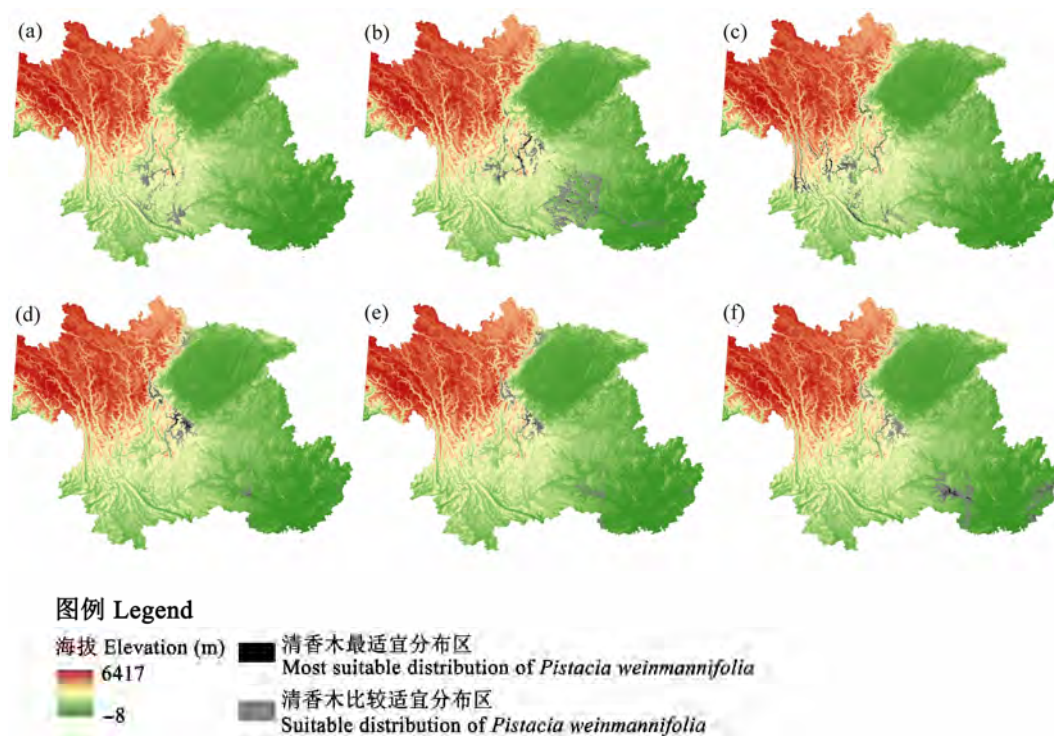


图3 气候变化下清香木在中国西南地区的潜在分布格局。为了突出显示适宜分布区, 只显示了研究区域内东部(95° E以东)的结果, 95° E以西的区域无适宜分布。(a)末次间冰期; (b)末次冰盛期; (c)当前历史时期; (d)未来时期(RCP2.6); (e)未来时期(RCP4.5); (f)未来时期(RCP8.5)。

Fig. 3 Patterns of potential distribution for *Pistacia weinmannifolia* in Southwest China under climate change in different periods, and only the east region of the study area (east of 95° E) was showed to highlight the suitable distributions for *Pistacia weinmannifolia*. There is no distribution in the west of 95° E. (a) Last Inter-Glacial (LIG); (b) Last Glacial Maximum (LGM); (c) Current period; (d) Future with RCP2.6; (e) Future with RCP4.5; (f) Future with RCP8.5.

包括元江在我国境内的全部、南盘江中上游、金沙江中游和雅砻江下段(图3a)。在末次冰盛期, 清香木在我国西南地区的适宜分布范围向东显著扩张, 到达川西高原和云贵高原东部临近河谷的开阔地带, 在云贵高原东南部和桂西南山地邻接地带近连片分布, 并有沿珠江上游河谷向东扩张的趋势, 其在我国西南地区的潜在适宜分布面积较末次间冰期增加了222.5% (图3b)。而从末次冰盛期到目前, 研究区内清香木的适宜分布面积减少44.4%, 并向西大大退缩, 但较末次间冰期时的范围稍大并偏西北, 主要集中在金沙江河谷全部和横断山区其余各条江中上游的干旱河谷(图3c)。在未来时期(2061–2080年)不同情景下, 研究区内清香木的适宜分布范围均再次向东推进, 大致到云贵高原和丘陵盆地邻接地带的长江水系和珠江水系的河谷中, 但本来在云贵高原中西部干旱河谷的适宜分布区趋于消失; 在低、中浓度路径的情景下, 清香木的潜在分

布面积分别比当前减少32.7% (RCP2.6情景)和32.9% (RCP4.5情景) (图3d, 3e), 而在高浓度路径的情景下, 清香木的潜在分布面积比当前增加28.9% (图3f)。

3 讨论

本文利用Maxent模型预测了清香木在中国西南地区的潜在分布区, 结果表明其分布主要集中在各干旱河谷地带, 该物种可作为干旱河谷的指示物种。影响清香木分布的主要环境变量均为气候因子(表2), 它适宜于温度变异性低和较干旱的环境。

分子系统发育学研究表明, 伴随着青藏高原的隆起, 清香木作为古老的支系(~15 mya), 早在第三纪中新世便与黄连木属的古地中海起源中心分离(Xie et al, 2014)。第四纪气候变化深刻地影响了中国古老植物的种群历史(Qiu et al, 2011), 清香木也不例外。在末次冰盛期, 清香木在中国西南地区可

能经历了自西向东的大范围扩张,向北甚至到达四川盆地北缘山麓(图3),可见有耐寒耐旱特性的清香木在冰期有着更广泛的适宜分布区。Kozhoridze等(2015)利用全球尺度较低的2.5'分辨率数据和偏最小二乘回归方法,模拟了气候变化情景下黄连木属的潜在分布格局,指出从末次间冰期到末次冰盛期,主要由于温度的季节性变异减小,等温性增大,降水减少,导致黄连木属在全球的分布发生大面积扩展。这与本文根据清香木当前分布构建的适宜环境预测模型所得的结果一致。而进入全新世以来,上述主要气候因子变化趋势反转,导致全球黄连木属分布面积减少(Kozhoridze et al, 2015),位于中国西南地区的清香木种群也再次退缩到西部横断山脉和云贵高原的干旱河谷中,适宜分布区大大缩小(图3)。第四纪以来青藏高原的持续抬升,加强了来自热带印度洋的西南季风及其对我国西南山地的影响(An, 2000; Wang, 2002),并通过平行岭谷地形的强化效应形成了大面积非地带性的干旱河谷气候,使得清香木的适宜分布区趋于这一地区河流的中上游,分布位置大致较末次间冰期偏北(图3)。利用Maxent模型模拟的不同时期清香木潜在适宜分布范围和格局的变化,反映了清香木在研究区域内可能的种群历史动态,在冰期与非冰期东西往返的扩张与退缩,印证了关于中国西南干旱河谷植物种群的“冰期走出横断山(glacial out-of-Hengduan Mts.)”的观点(Fan et al, 2013),而不支持田中-楷永线(Tanaka-Kaiyong Line)为一条普适的生物地理分界线假说(Coyne & Orr, 2004)。根据最低迁移成本的原则,研究区域内的河谷是清香木扩张和退缩最可能的途径(Cox et al, 1993)。

在当今全球变暖的大背景下,气候变化及其复杂性引起了前所未有的重视(IPCC, 2013),极端气候事件越来越频繁和剧烈(Planton et al, 2008; Kodra et al, 2011; Cai et al, 2014; Patricola et al, 2015)。在此趋势下,清香木的适宜分布区或将进一步缩小(中低浓度路径)。同时,由于西南季风的加强,在青藏高原东南部地区未来降水可能进一步增加(刘晓东等, 2009; 胡琴等, 2015),也许会导致当前研究区内干旱河谷范围缩小,清香木的潜在分布区仅在云贵高原与四川盆地结合地带的河谷,以及云贵高原与广西西部交界地带的河谷中,也反映了这些地区在未来有干旱河谷发育的可能(图3)。而对于完全不采

取任何措施的高浓度路径,清香木在研究区内的适宜分布区有所增加,或许跟该情景下温度的季节性变异和极端低温事件大大减少有关(Xu & Xu, 2012; Kharin et al, 2013)。总之,在较切合实际的中低浓度路径下,未来清香木适宜分布区的减小,意味着该物种以及其他亚热带半干旱环境适宜种的生存风险加剧,这对于清香木所指示的生态系统类型的结构、功能与服务(包括生物多样性)在气候变化情景下的保护和管理提出了严峻的挑战。

Maxent模型是近年来广泛应用的物种潜在适宜分布区预测模型,本文利用其较好地模拟了气候变化下清香木的适宜分布格局。然而,本研究仍然存在一些局限性。首先,只依据存在数据(presence-only data),即物种出现或“1”值数据建立的模型会有一定的偏差(Raes & ter Steege, 2007; Phillips et al, 2009; Yackulic et al, 2013)。Yackulic等(2013)指出这样建立模型得到的预测概率结果实际上由采样概率、被发现概率和物种本身存在概率3个部分组成。Elith等(2011)认为采样效应的影响可以凭借一定的先验知识降低,对于本研究来说就是乡土物种清香木主要分布在研究区内各干旱河谷中(傅立国, 2001),几乎不会出现在其他地区。被发现概率或多或少会受到样点的自然或人为生境破坏的影响。这两种概率都会对我们期望得到的物种存在概率带来偏差。另外,我们对于古气候和未来气候情景下的模拟和预测结果都基于一个假设,那就是根据当前气候情景和物种分布建立起来的模型,二者之间的相互作用关系会在过去和未来保持不变。最后,包括Maxent模型在内,目前常见的线性或非线性SDM模型,都是基于物种的现实生态位来模拟适宜分布区,但实际上还会受到物种个体生命周期造成的时滞效应、物种的扩散和定殖能力、种间竞争等的影响(Boulangéat et al, 2012)。因此,对于模型预测结果中的不确定性,在应用中需要予以考虑。

参考文献

- An Z (2000) The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quaternary Science Reviews*, 19, 171–187.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15, 365–377.
- Boulangéat I, Gravel D, Thuiller W (2012) Accounting for dispersal and biotic interactions to disentangle the drivers of

- species distributions and their abundances. *Ecology Letters*, 15, 584–593.
- Cai W, Borlace S, Lengaigne M, van Rensch P, Collins M, Vecchi G, Timmermann A, Santoso A, McPhaden MJ, Wu L, England MH, Wang G, Guilyardi E, Jin FF (2014) Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4, 111–116.
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333, 1024–1026.
- Cox CB, Moore PD, Marquardt WC, Demaree RS, Grieve RB (1993) *Biogeography: An Ecological and Evolutionary Approach* 6th edn. Blackwell Scientific Publications, London.
- Coyne JA, Orr HA (2004) *Speciation*. Sinauer Associates, Sunderland.
- Dieleman CM, Branfireun BA, McLaughlin JW, Lindo Z (2015) Climate change drives a shift in peatland ecosystem plant community: implications for ecosystem function and stability. *Global Change Biology*, 21, 388–395.
- Dong M, Wu TW, Wang ZZ, Xin XG, Zhang F (2013) Simulation of the precipitation and its variation during the 20th century using the BCC climate model (BCC_CSM1.0). *Journal of Applied Meteorological Science*, 24(1), 1–11. (in Chinese with English abstract) [董敏, 吴统文, 王在志, 辛晓歌, 张芳 (2013) BCC_CSM1.0模式对20世纪降水及其变率的模拟. *应用气象学报*, 24(1), 1–11.]
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JM, Peterson AT, Phillips SJ, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE, Araujo M (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ (2011) A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43–57.
- Fan DM, Yue JP, Nie ZL, Li ZM, Comes HP, Sun H (2013) Phylogeography of *Sophora davidii* (Leguminosae) across the 'acros-Kaiyong Line', an important phytogeographic boundary in Southwest China. *Molecular Ecology*, 22, 4270–4288.
- Farr TG, Kobrick M (2000) Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81, 583–585.
- Fu LG (2001) *Higher Plants of China*, Vol. 8. Qingdao Publishing House, Qingdao. (in Chinese with English foreword) [傅立国 (2001) 中国高等植物第八卷. 青岛出版社, 青岛.]
- Gelviz-Gelvez SM, Pavón NP, Illoldi-Rangel P, Ballesteros-Barrera C (2015) Ecological niche modeling under climate change to select shrubs for ecological restoration in Central Mexico. *Ecological Engineering*, 74, 302–309.
- Hasumi H, Emori S (2004) K-1 Coupled GCM (MIROC) description. Center for Climate System Research (CCSR), University of Tokyo, Tokyo.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hu Q, Jiang DB, Fan GZ (2015) Climate change projection on the Tibetan Plateau: results of CMIP5 models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39, 260–270. (in Chinese with English abstract) [胡琴, 姜大膀, 范广洲 (2015) 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果. *大气科学*, 39, 260–270.]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X, Wehner M (2013) Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119, 345–357.
- Kodra E, Steinhäuser K, Ganguly AR (2011) Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios. *Geophysical Research Letters*, 38, L08705.
- Kozhoridze G, Orlovsky N, Orlovsky L, Blumberg DG, Golan-Goldhirsh A (2015) Geographic distribution and migration pathways of *Pistacia*—present, past and future. *Ecography*, 38, 1–14.
- Lin RP, Zhou TJ (2015) Reproducibility and future projections of the precipitation structure in East Asia in four Chinese GCMs that participated in the CMIP5 experiments. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39, 338–356. (in Chinese with English abstract) [林壬萍, 周天军 (2015) 参加CMIP5计划的四个中国模式模拟的东亚地区降水结构特征及未来变化. *大气科学*, 39, 338–356.]
- Liu XD, Cheng ZG, Zhang R (2009) The A1B scenario projection for climate change over the Tibetan Plateau in the next 30–50 years. *Plateau Meteorology*, 28, 475–484. (in Chinese with English abstract) [刘晓东, 程志刚, 张冉 (2009) 青藏高原未来30~50年A1B情景下气候变化预估. *高原气象*, 28, 475–484.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. *生物多样性*, 24, 378–388.]
- Merow C, Smith MJ, Silander JA (2013) A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36, 1058–1069.
- Miller RG (1968) Jackknifing variances. *The Annals of Mathematical Statistics*, 39, 567–582.

- Moor H, Hylander K, Norberg J (2015) Predicting climate change effects on wetland ecosystem services using species distribution modeling and plant functional traits. *AMBIO*, 44, 113–126.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756.
- Otto-Bliesner BL, Marshall SJ, Overpeck JT, Miller GH, Hu A (2006) Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 311, 1751–1753.
- Patricola CM, Chang P, Saravanan R (2015) Impact of Atlantic SST and high frequency atmospheric variability on the 1993 and 2008 Midwest floods: regional climate model simulations of extreme climate events. *Climatic Change*, 129, 397–411.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Phillips SJ, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Phillips SJ, Dudík M, Elith J, Graham CH, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S (2009) Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19, 181–197.
- Pio DV, Engler R, Linder HP, Monadjem A, Cotterill FPD, Taylor PJ, Schoeman MC, Price BW, Villet MH, Eick G, Salamin N, Guisan A (2014) Climate change effects on animal and plant phylogenetic diversity in southern Africa. *Global Change Biology*, 20, 1538–1549.
- Planton S, Déqué M, Chauvin F, Terray L (2008) Expected impacts of climate change on extreme climate events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 564–574.
- Qiu YX, Fu CX, Comes HP (2011) Plant molecular phylogeography in China and adjacent regions: tracing the genetic imprints of Quaternary climate and environmental change in the world's most diverse temperate flora. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 225–244.
- Raes N, ter Steege H (2007) A null-model for significance testing of presence-only species distribution models. *Ecography*, 30, 727–736.
- Royle JA, Chandler RB, Yackulic C, Nichols JD (2012) Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 545–554.
- Ruiz-Labourdette D, Nogués-Bravo D, Ollero HS, Schmitz MF, Pineda FD (2012) Forest composition in Mediterranean mountains is projected to shift along the entire elevational gradient under climate change. *Journal of Biogeography*, 39, 162–176.
- Shi YJ, Ren YL, Wang SG, Shang KZ, Li X, Zhou GL (2012) Verification of simulation ability of BCC_CSM climate model in regional climate change in China. *Plateau Meteorology*, 31, 1257–1267. (in Chinese with English abstract) [石彦军, 任余龙, 王式功, 尚可政, 李旭, 周甘霖 (2012) BCC_CSM气候模式对中国区域气候变化模拟能力的检验. *高原气象*, 31, 1257–1267.]
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470, 531–534.
- van der Wal J, Murphy HT, Kutt AS, Perkins GC, Bateman BL, Perry JJ, Reside AE (2013) Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change*, 3, 239–243.
- van Zyl JJ (2001) The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48, 559–565.
- Veloz SD, Williams JW, Blois JL, He F, Otto-Bliesner, Liu Z (2012) No-analog climates and shifting realized niches during the late quaternary: implications for 21st-century predictions by species distribution models. *Global Change Biology*, 18, 1698–1713.
- Wang B (2002) Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *Journal of Climate*, 15, 386–398.
- Wang Y, Zhang C, Li K (2013) Investigation on the distribution of *Pistacia weinmannifolia* in dry-hot valley of Yunnan Province. *Forest Resources Management*, (3), 156–160. (in Chinese with English abstract) [王妍, 张超, 李昆 (2013) 云南干热河谷地区清香木分布调查. *林业资源管理*, (3), 156–160.]
- Wang Y, Zhang C, Li K (2014) Responses of *Pistacia weinmannifolia* seedling to different water gradient in dry-hot valley. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 34(10), 19–25. (in Chinese with English abstract) [王妍, 张超, 李昆 (2014) 干热河谷乡土树种清香木幼苗生长对不同水分梯度的响应. *中南林业科技大学学报*, 34(10), 19–25.]
- Xie L, Yang ZY, Wen J, Li DZ, Yi TS (2014) Biogeographic history of *Pistacia* (Anacardiaceae), emphasizing the evolution of the Madrean-Tethyan and the eastern Asian-Tethyan disjunctions. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 77, 136–146.
- Xu CH, Xu Y (2012) The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5, 527–533.
- Yackulic CB, Chandler R, Zipkin EF, Royle JA, Nichols JD, Campbell GEH, Veran S (2013) Presence-only modelling using Maxent: when can we trust the inferences? *Methods in Ecology and Evolution*, 4, 236–243.
- Yu DH, Yuan CJ, An MT, Li H, Yan LB (2014) Study on the niche characteristics of main tree species of *Pistacia weinmannifolia* community in natural forest along Chishui River.

- Journal of West China Forestry Science, 43(6), 91–96. (in Chinese with English abstract) [余德会, 袁丛军, 安明态, 李鹤, 严令斌 (2014) 赤水河流域清香木天然群落主要树种生态位研究. 西部林业科学, 43(6), 91–96.]
- Zhao X, Sun H, Hou A, Zhao Q, Wei T, Xin W (2005) Antioxidant properties of two gallotannins isolated from the leaves of *Pistacia weinmannifolia*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1725, 103–110.
- Zhou BH (2008) Volatile oil in the leaves of *Pistacia weinmannifolia* and their antibacterial effects. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 25, 305–308. (in Chinese with English abstract) [周葆华 (2008) 清香木叶挥发油成分及其抑菌作用. 应用化学, 25, 305–308.]
- Zhou X, Li QQ, Sun XB, Wei M (2014) Simulation and projection of temperature in China with BCC_CSM1.1 model. *Journal of Applied Meteorological Science*, 25, 95–106. (in Chinese with English abstract) [周鑫, 李清泉, 孙秀博, 魏敏 (2014) BCC_CSM1.1模式对我国气温的模拟和预估. 应用气象学报, 25, 95–106.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究所用气象站点基本信息

Appendix 1 Information of meteorological stations applied in this study

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015246-1.pdf>

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

附录1 本研究所用气象站的基本信息
Appendix 1 Information of meteorological stations applied in this study

| 气象站 Meteorological station | 纬度 Latitude | 经度 Longitude |
|----------------------------|-------------|--------------|
| 狮泉河 | 32.50 | 80.08 |
| 普 兰 | 30.28 | 81.25 |
| 改 则 | 32.15 | 84.42 |
| 聂拉尔 | 28.18 | 85.97 |
| 定 日 | 28.63 | 87.08 |
| 拉 孜 | 29.08 | 87.60 |
| 申 扎 | 30.95 | 88.63 |
| 日喀则 | 29.25 | 88.88 |
| 帕 里 | 27.73 | 89.08 |
| 江 孜 | 28.92 | 89.60 |
| 班 戈 | 31.38 | 90.02 |
| 尼 木 | 29.43 | 90.17 |
| 安 多 | 32.35 | 91.10 |
| 当 雄 | 30.48 | 91.10 |
| 拉 萨 | 29.67 | 91.13 |
| 泽 当 | 29.25 | 91.77 |
| 错 那 | 27.98 | 91.95 |
| 那 曲 | 31.48 | 92.07 |
| 隆 子 | 28.42 | 92.47 |
| 嘉 黎 | 30.67 | 93.28 |
| 索 县 | 31.88 | 93.78 |
| 林 芝 | 29.67 | 94.33 |
| 丁 青 | 31.42 | 95.60 |
| 波 密 | 29.87 | 95.77 |
| 洛 隆 | 30.75 | 95.83 |
| 昌 都 | 31.15 | 97.17 |
| 察 隅 | 28.65 | 97.47 |
| 左 贡 | 29.67 | 97.83 |
| 瑞 丽 | 24.02 | 97.85 |
| 石 渠 | 32.98 | 98.10 |
| 腾 冲 | 25.02 | 98.50 |
| 德 格 | 31.80 | 98.58 |
| 怒江州 | 25.87 | 98.85 |
| 德 钦 | 28.48 | 98.92 |
| 巴 塘 | 30.00 | 99.10 |
| 保 山 | 25.12 | 99.18 |
| 得 荣 | 28.72 | 99.28 |
| 甘 孜 | 31.62 | 100.00 |
| 大 理 | 25.70 | 100.18 |
| 理 塘 | 30.00 | 100.27 |
| 稻 城 | 29.05 | 100.30 |
| 新 龙 | 30.93 | 100.32 |
| 色 达 | 32.28 | 100.33 |
| 景 东 | 24.47 | 100.87 |
| 道 孚 | 30.98 | 101.12 |

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

| 气象站 Meteorological station | 纬度 Latitude | 经度 Longitude |
|----------------------------|-------------|--------------|
| 木里 | 27.93 | 101.27 |
| 九龙 | 29.00 | 101.50 |
| 楚雄 | 25.03 | 101.55 |
| 勐腊 | 21.48 | 101.57 |
| 阿坝 | 32.90 | 101.70 |
| 攀枝花 | 26.58 | 101.72 |
| 仁和 | 26.50 | 101.73 |
| 江城 | 22.58 | 101.85 |
| 元谋 | 25.73 | 101.87 |
| 康定 | 30.05 | 101.97 |
| 元江 | 23.60 | 101.98 |
| 马尔康 | 31.90 | 102.23 |
| 会理 | 26.65 | 102.25 |
| 西昌 | 27.90 | 102.27 |
| 小金 | 31.00 | 102.35 |
| 越西 | 28.65 | 102.52 |
| 红原 | 32.80 | 102.55 |
| 玉溪 | 24.33 | 102.55 |
| 昆明 | 25.00 | 102.65 |
| 汉源 | 29.35 | 102.68 |
| 昭觉 | 28.00 | 102.85 |
| 若尔盖 | 33.58 | 102.97 |
| 雅安 | 29.98 | 103.00 |
| 宜良 | 24.92 | 103.17 |
| 会泽 | 26.42 | 103.28 |
| 峨眉山 | 29.52 | 103.33 |
| 蒙自 | 23.38 | 103.38 |
| 松潘 | 32.65 | 103.57 |
| 雷波 | 28.27 | 103.58 |
| 都江堰 | 31.00 | 103.67 |
| 屏边 | 22.98 | 103.68 |
| 昭通 | 27.35 | 103.72 |
| 乐山 | 29.57 | 103.75 |
| 成都 | 30.70 | 103.83 |
| 沾益 | 25.58 | 103.83 |
| 文山 | 23.38 | 104.25 |
| 威宁 | 26.87 | 104.28 |
| 砚山 | 23.62 | 104.33 |
| 盘县 | 25.72 | 104.47 |
| 平武 | 32.42 | 104.52 |
| 资阳 | 30.12 | 104.65 |
| 绵阳 | 31.45 | 104.73 |
| 内江 | 29.62 | 105.12 |
| 兴义 | 25.43 | 105.18 |
| 毕节 | 27.30 | 105.28 |
| 纳溪 | 28.78 | 105.38 |
| 叙永 | 28.17 | 105.43 |

应凌霄, 刘晔, 陈绍田, 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟. 生物多样性, 2016, **24** (4): 453-461.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015246>

| 气象站 Meteorological station | 纬度 Latitude | 经度 Longitude |
|----------------------------|-------------|--------------|
| 遂 宁 | 30.50 | 105.55 |
| 那 坡 | 23.42 | 105.83 |
| 安 顺 | 26.25 | 105.90 |
| 阆 中 | 31.58 | 105.97 |
| 黔 西 | 27.03 | 106.02 |
| 望 谟 | 25.18 | 106.08 |
| 南 充 | 30.78 | 106.10 |
| 习 水 | 28.33 | 106.22 |
| 靖 西 | 23.13 | 106.42 |
| 沙坪坝 | 29.58 | 106.47 |
| 涪 陵 | 29.58 | 106.47 |
| 百 色 | 23.90 | 106.60 |
| 贵 阳 | 26.58 | 106.73 |
| 巴 中 | 31.87 | 106.77 |
| 罗 甸 | 25.43 | 106.77 |
| 桐 梓 | 28.13 | 106.83 |
| 龙 州 | 22.33 | 106.85 |
| 遵 义 | 27.70 | 106.88 |
| 田 东 | 23.60 | 107.12 |
| 彭 水 | 29.75 | 107.42 |
| 湄 潭 | 27.77 | 107.47 |
| 达 县 | 31.20 | 107.50 |
| 独 山 | 25.83 | 107.55 |
| 平 果 | 23.32 | 107.58 |
| 梁 平 | 30.68 | 107.80 |
| 凯 里 | 26.60 | 107.98 |
| 南 宁 | 22.63 | 108.22 |
| 思 南 | 27.95 | 108.25 |
| 万 县 | 30.77 | 108.40 |
| 榕 江 | 25.97 | 108.53 |
| 三 穗 | 26.97 | 108.67 |
| 酉 阳 | 28.83 | 108.77 |
| 铜 仁 | 27.72 | 109.18 |
| 来 宾 | 23.75 | 109.23 |
| 灵 山 | 22.42 | 109.30 |
| 融 安 | 25.22 | 109.40 |
| 奉 节 | 31.02 | 109.53 |
| 桂 平 | 23.40 | 110.08 |
| 玉 林 | 22.65 | 110.17 |
| 桂 林 | 25.32 | 110.30 |
| 梧 州 | 23.48 | 111.30 |

•综述•

云南干热河谷植被与环境研究进展

杨济达¹ 张志明¹ 沈泽昊² 欧晓昆^{1*} 耿宇鹏¹ 杨明玉¹¹ (云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)² (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 特殊的地理位置和独特的地形地貌特征组合形成了典型的干热气候环境, 在云南省亚热带高原山地河谷下部发育了一类特有的植被类型, 即干热河谷植被。干热河谷植被具有非地带性和稀有性, 以及由土地利用变化为主的人为活动干扰导致的脆弱性。本文回顾了干热河谷植被的研究历史, 分别从干热河谷的植物群落学和植物区系学、干热河谷植被与土地的关系以及干热河谷植被保护与恢复三个方面进行了总结。植物群落与区系研究主要集中于群落分类、植被分类、群落特征、人为干扰影响、区系特征、性质和起源; 植被与土地关系研究侧重于土壤特性、土地利用/覆盖变化、土地退化及水土流失状况; 植被保护与恢复的热点在植被恢复目标、植被恢复功能区划、植被恢复引种及筛选及植被恢复效益评价研究。未来在这些区域应注重自然灾害及预防、水电工程建设对植被的影响及其响应等方面的研究, 深入开展大尺度植被时空格局的监测和动态服务功能分析。

关键词: 干热河谷; 植物群落; 植物区系; 土地关系; 植被恢复; 展望

Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan

Jida Yang¹, Zhiming Zhang¹, Zehao Shen², Xiaokun Ou^{1*}, Yupeng Geng¹, Mingyu Yang¹¹ Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091² Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871

Abstract: The vegetation of the dry-hot valleys in southwestern China, especially in Yunnan, is unique as the valley bottom in a subtropical plateau and mountainous region, which is characterized by its geographic location, climate, and geomorphology. A long history of biological adaptation to the specific environmental contributes to the rarity and non-zonality of vegetation in these dry-hot valleys. Disturbances including land use through human activities have endangered some vegetation types in the dry-hot valleys. This paper examines the history of vegetation studies in the dry-hot valleys, and summarizes studies on flora, vegetation and land use and cover change, as well as vegetation restoration. Research of plant communities and flora have mainly focused on the classification of the community and vegetation types, the characteristics of the community, the influence of human disturbance, and the characteristics, nature and origin of the flora. The relationship between vegetation and land has mainly focused on the characteristics of soil, land use/cover change, land degradation and soil erosion. The hot spots of vegetation protection and restoration include the study of vegetation restoration objectives, functional zoning of vegetation restoration, the introduction and selection of vegetation restoration research, and evaluation of the effectiveness of vegetation restoration. We propose that more attention to be paid to the study of the prevention of natural disasters, the impacts of hydropower construction on vegetation, and in-depth vegetation monitoring and analysis of the spatiotemporal dynamics at multiple scales.

Key words: dry-hot valley; plant community; flora; land relationship; vegetation restoration; prospect

收稿日期: 2015-09-18; 接受日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金“退耕还林和村村通公路影响下山地植被景观“格局-过程”关系研究”(41361046)、国家自然科学基金“云南三江并流地区海拔树线的时空格局成因及其对气候变化的响应”(41371190)和国家自然科学基金“水热梯度变化对澜沧江河谷群落谱系结构的影响: 基于“胁迫梯度假说”的比较”(31160101)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xkou@ynu.edu.cn

在第三纪起开始抬升形成的中国青藏高原至云贵高原面上, 由多条大河侵蚀切割形成了深陷的山岭—河谷地貌。由于地处低纬度, 在亚热带季风气候的影响下, 这种高原河谷地貌类型的背风雨影区, 特别是河谷低地, 形成了典型的干热气候, 并孕育演化形成了独特的干热河谷植被(郑远昌等, 1986)。干热河谷主要分布于云南、四川境内, 而在云南集中见于怒江、澜沧江、金沙江、元江(红河)等流域(欧晓昆, 1994; 金振洲, 1998; 沈泽昊等, 2016)。干热河谷是一类四周被湿润环境包围而下部呈现较干旱、温度较高, 使水热条件配合呈现出“干”和“热”特征的独特河谷生态景观。其特点是降水干湿季分明、水热组合失衡、热量高、降水少、蒸发强烈(杨勤业和沈康达, 1984; 何永彬等, 2000)。

山原地貌与季风气候是云南自然景观整体形成的两个基本因素, 而植被能够很好地反映当地的自然环境条件(姜汉侨, 1980)。经过长期演化, 干热河谷成为镶嵌在亚热带湿润与半湿润气候背景中的河谷型干旱区域, 是我国一类独特的生态系统, 其气候、植被、土壤等都具有鲜明的特点(何科昭等, 1996; 张叶春等, 1999), 其植物区系和植被类型与我国同一纬度其他区域的植被之间存在显著差异(金振洲和欧晓昆, 2000)。在长期人为活动干扰下, 干热河谷植被普遍稀疏、低矮并处于脆弱退化状态(钟祥浩, 2000; 方海东等, 2009)。干热河谷生物多样性资源的保护、生境恢复以及可持续管理引起了广泛关注(金振洲和欧晓昆, 1988; 欧晓昆, 1988)。本文在系统回顾中国西南部, 重点是云南省干热河谷的植被研究基础上, 分析了当前干热河谷植被研究所关注的主要领域, 提出未来应予以重视和优先研究的问题和方向, 以期对干热河谷特殊生境下植被以及整个中国西南纵向岭谷区生态系统的研究和管理实践提供参考。

1 干热河谷自然环境概况

1.1 地形与地貌

以云南省为主体的中国西南纵向岭谷区北高南低的山原地貌是该区域景观的突出特征之一(何永彬等, 2000)。高原随海拔有差别地上升和河流切割形成不同的格局分布: 中北部以滇中高原为主

体, 多宽广盆地, 海拔在1,600–1,900 m上下; 中南部残留高原面多小型山间盆地, 海拔一般为1,200–1,400 m; 南部的较大型河谷盆地则分布于海拔500–900 m范围内(姜汉侨, 1980)。中国西南干热河谷集中分布于怒江、澜沧江、金沙江以及元江(红河)流域峡谷内, 23°00′–28°10′ N, 98°50′–103°50′ E, 横跨5个经纬度, 其主体分布区域东南以云南蒙自的曼耗为界, 西以怒江峡谷为边, 北以金沙江流域永善为限, 依随江河道呈现出多边形。地势顺应江河流向北高南低、西高东低, 海拔沿河流自上而下逐渐降低, 属典型的江河两侧高中山峡谷地貌(金振洲和欧晓昆, 2000)。横断山区干热河谷总长4,105 km, 覆盖面积达到11,230 km², 其中金沙江流域的干热河谷总长2,929 km, 覆盖面积8,410 km², 分别占整个横断山区干热河谷总长和覆盖面积的71.4%和74.9% (Ma & McConchie, 2001)。

由于地处山脉横断、河谷深切的复杂区域, 覆盖面积广, 不同河流所处的干热河谷地段呈现出不同的地貌特征(表1)。

1.2 气候特征

地理位置、地形特征、大气环流和局地气流等因素的影响形成了河谷独特的气候环境(汤懋苍等, 1979)。“既干又热”是干热河谷的基本气候特征。由于河谷底部与上部的自然环境区别较大, 在干和热方面有一个适合植被生长的幅度范围。在干和热的水热配比上, “干”者应属于干旱至半干旱气候。干旱气候的全年蒸发量应大于降水量的3–6倍, 半干旱气候则全年蒸发量应大于降水量1–3倍; “热”者需要热至半热的气候, 热气候应有年均温>20℃, 日均温>10℃且年积温>7,000℃的水平, 半热气候应有年均温16–19℃, 日均温>10℃且年积温5,500–7,000℃的水平(钟祥浩, 2000; 金振洲和欧晓昆, 2000)。

张荣祖等(1992)明确提出了干热河谷的气候指标, 即最冷月平均气温>12℃, 最暖月平均气温24–28℃, 日均温≥10℃, 年平均积温>7,000℃, 持续天数>350天, 全年几无霜日, 年平均降雨量600–800 mm, 年平均蒸发量达2,750–3,850 mm, 年平均干燥度2.0以上。干热河谷即处于这一干热气候的幅度范围之内, 其中以元江流域的元江坝和金沙江流域的元谋龙江段气候最为典型(表2)。

表1 云南4条主要河流干热河谷分布情况
Table 1 The distribution of dry-hot valleys of four major rivers in Yunnan

| 河流 Rivers | 分布区域 Distribution | 两侧山脉 Mountain range | 分布长度 Length (km) | 底部海拔 Altitude (m) | 峰线高度 Peak line height (m) | 上下高差 Dispersion (m) |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| 怒江 Nu River | 六库-龙陵 Liuku-Longling | 怒山/高黎贡山 Nushan/Gaoligong | 220 | <1,000 | 3,000 | 2,000 |
| 元江 Yuan River | 新平-蒙自 Xinping-Mengzi | 哀牢山/无量山 Ailao/Wuliang | 300 | 300-600 | 3,000 | 2,000 |
| 金沙江 Jinsha River | 鹤庆-布拖 Heqing-Butuo | 乌蒙山/云岭 Wumeng/Yunling | 850 | 700-1,200 | 2,500-3,500 | 2,000 |
| 澜沧江 Lancang River | 南涧-凤庆 Nanjian-Fengqing | 怒山南/无量山 Nushan/Wuliang | 250 | 800-900 | 2,500-3,000 | 1,500-2,000 |

表2 元江坝、金沙江元谋龙江干热河谷气候条件对比
Table 2 Comparison of climate condition between dry-hot valleys in Yuanjiangba and Longjiang, Yuanmou

| 气候因子 Climatic factors | 元江坝 Yuanjiangba | 元谋龙江 Longjiang, Yuanmou |
|---|--------------------|----------------------------|
| 年均温 Annual mean temperature (°C) | 23.7 | 21.5 |
| 最冷月均温 Average temperature of the coldest month (°C) | 16.7 | 15.1 |
| ≥10℃的年积温 ≥10℃ Annual accumulated temperature (°C) | 8,708.9 | 7,996.1 |
| 年均霜日 Annual mean frosty day | 0.7 | 2.0 |
| 年均降水量 Annual mean precipitation (mm) | 805.1 | 634.0 |
| 年均蒸发量 Annual mean evaporation (mm) | 2,750.9 | 3,847.8 |
| 年蒸发量/年降水量 Annual mean evaporation/annual mean precipitation | 3.4 | 6.1 |
| 年均相对湿度 Annual mean humidity (%) | 69 | 54 |
| 雨季/旱季降水量 Rainy season precipitation /dry season precipitation (%) | 81/19 | 92/8 |

1.3 干热河谷成因的几种假说

关于西南干旱河谷的成因，不同学者提出了多种假说。这些观点也同样适用于云南干热河谷的形成机制，主要包括：

(1)地史原生论。认为干热河谷的形成是基于历史长期自然地理环境演化的产物，是高山隆起、河谷深切的地史时期就已完成并保留至今的原生格局(Schwein, 1972; 沈玉昌和龚国元, 1986; 杨勤业等, 1988)。这一说法侧重于地质的原生格局，忽略了气候和后期的人为干扰的动态影响。

(2)焚风效应假说。从气象学角度较好地解释了由于西南季风或东南季风受到高大山脉的屏障阻隔作用，导致山脉迎风坡截留雨水、背风坡少雨，引发河谷两侧的山脉不同坡向有明显的降水差异，加之河谷内焚风效应增温而形成河谷干热气候特征(Richner & Phillips, 1984; Gallus & Klemp, 2000; 何大明等, 2005)。该说法是目前干热河谷典型干热气候成因的主流观点，但就其成因而言，仅气象学原理仍旧不够完善。

(3)山谷风局地环流假说。强调了河流下切引发河谷内部相对封闭，昼夜温差导致山谷风形成局部环流，伴随热气环流的上升而呈现出下部干热而上部四周湿润的垂直分布的干旱现象(郑度和姚檀栋, 2004; 闵石头和王随继, 2007)。该观点过分强调河谷内部封闭空间，忽略了外部因素的作用。

(4)次生干扰论。突出土地利用变化和人为干扰活动导致森林植被逆向演替和生态环境退化，从而引起河谷由湿热环境向干热环境转变(许再富等, 1985)。这一说法则过分强调了人为活动的干扰而忽视了自然环境的演替和变化。

(5)综合论。综合前4种假说，认为干热河谷是构造-地貌-古生态效应、环流-季风-“狭管”效应、地形波-局地环流-降水-焚风效应、植被-土地利用-人为活动干扰效应等综合作用而形成的原生性山地生态现象，是局部地-水-生-人交互作用及耦合效应的综合产物(何永彬等, 2000; 明庆忠, 2006; 明庆忠和史正涛, 2007)。

2 干热河谷植被研究的历史

1957年, 曲仲湘、周纪纶等人对元江干热河谷植被进行了首次调查, 对于当地植物群落结构和种类作出了首次记录, 其调查结果刊于《综考会1957年西双版纳植被调查总结》(油印稿, 未刊)。1964年, 朱彦丞等对金沙江以及支流的干热河谷进行了首次植物群落学调查(吴征镒, 1980; 吴征镒和朱彦丞, 1987)。之后植被生态学家们针对干热河谷植被开展了较全面和深入的调查研究。

20世纪80年代中期开始到90年代末, 以金振洲为代表的学者对滇川干热河谷植被多样性特征以及植物区系进行了系统研究(金振洲和欧晓昆, 1998; 欧晓昆和金振洲, 1987, 1996), 按照Braun-Blanquet的植物群落学研究方法对云南四大江河流域干热河谷植被进行了取样调查, 得到样地记录542个, 建立群纲1个, 群目6个, 群属11个, 群丛67个, 建立了2,088种种子植物地理成分的数据库, 同时通过与世界同类植被的对比, 确定元江、怒江、金沙江、澜沧江四大江干热河谷植被为“河谷型萨王纳植被(Savanna of valley type)”, 它以其自身特有的群落特征和植物区系组成, 成为了我国西南河谷地区的一种特殊的植被类型, 同时也是世界植被中萨王纳植被的干热河谷残存者(周跃和金振洲, 1987; 欧晓昆, 1988; 曹敏和金振洲, 1989; 曹永恒和金振洲, 1993)。这些研究成果全面、深入地揭示了干热河谷植被与植物群落的多样性特征、植物资源的珍稀性和独特性以及资源利用的潜力, 同时也为干热河谷环境和植物资源的保护及可持续发展提供了理论基础。

21世纪以来, 生态学者们对西南干旱河谷地区的植物区系和植被群落再次开展了系统的调查研究工作, 从干热河谷植被的保护与恢复(钟祥浩, 2000; 罗辉和王克勤, 2006; 刘方炎等, 2010; 李昆等, 2011), 区域整体的植物地理和区系格局(朱华, 2008; 欧朝蓉等, 2015; 刘晔等, 2016a), 植物群落分类与群落构建(刘方炎等, 2007; 张建利等, 2010a; 李新辉等, 2016; 刘晔等, 2016b), 植物群落多样性的海拔梯度格局比较(杨阳等, 2016), 生物入侵(胡发广等, 2007; 许玥等, 2016)以及干热河谷资源环境问题与生物多样性保护(方海东等, 2009; 沈泽昊等, 2016)等方面进行了大量研究。从地理区系方面

进一步深入探索植被及植物群落与世界同类的地理联系和历史亲缘关系, 从景观格局层次开展植被分布格局与生态过程的关系研究, 以及从资源利用的角度权衡区域植被的保护与开发问题。

3 干热河谷植被研究现状

3.1 植物群落与植物区系

3.1.1 植物群落

干热河谷植被不同于其海拔上界的常绿阔叶林、山地针叶林等类型, 因而深入了解其群落特征显得尤为重要(金振洲和欧晓昆, 2000)。目前关于干热河谷植物群落的研究主要集中在以下几个方面:

(1)群落分类。基于法瑞植物群落学的理论和方法对滇川干热河谷植被进行了群落学分类。根据第四纪植被演化证据, 认为元谋干热河谷的稀树灌草丛类型中普遍存在的扭黄茅(*Heteropogon contortus*) + 车桑子(*Dodonaea viscosa*)群系由于水土流失加剧、人为破坏日盛而由稀树灌草丛退化而成的一种较为稳定的亚顶极植被类型(周麟, 1996)。按群落的外貌、种类组成和结构特点可以分为: 稀树灌草丛类型、肉质刺灌丛类型、扭曲云南松(*Pinus yunnanensis*)稀疏类型、小叶刺灌丛类型(刘伦辉, 1989; 杨兆平和常禹, 2007)。

(2)群落特征。群落外貌以“稀树灌木草丛”为明显特征。主要以大面积禾草草丛分布为主, 其中稀散分布乔木和灌丛, 在人为干扰下可成为“稀树草丛”、“稀灌草丛”和“草丛”外貌。群落结构主要以乔、灌、草3层或灌、草2层形式组成, 群落在河谷坡上为断续带状分布, 群落层次结构单一, 外貌随干湿季节交替变化明显, 植物多是中生种类, 旱生形态突出(刘伦辉, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。沿金沙江从上游到下游, 草地群落密度和Simpson多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数逐渐增加, 而群落丰富度逐渐下降; 群落结构以扭黄茅为优势种群, 且自上而下多年生草本植物种类的比例逐渐增加, 灌木和一年生草本植物种类比例逐渐减少(张建利等, 2010a, b; 沈蕊等, 2010)。而典型的元谋干热河谷, 主要植物群落的多样性水平较低; 基于Patrick物种丰富度指数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson优势度指数(D)对物种多样性与植物生长型的分析表明, 按 S 指数排序为乔木层<草本层<灌木层; 按 H 指数排序为乔木层

<草本层<灌木层;按D指数排序为乔木层>草本层>灌木层(杨振寅等, 2008)。

(3)入侵植物的影响。干热河谷地区已经成为外来植物入侵的重灾区。如在怒江河谷, 入侵植物主要沿区内的道路网络扩散, 在大尺度上入侵物种分布主要受热量限制; 小尺度上, 水分条件和乡土植物群落的完整性构成了入侵植物分布的主要限制因子(许玥等, 2016)。入侵植物在群落构建过程中, 对元江干热河谷植被的谱系群落学研究表明, 空间距离的影响已超出环境因素的贡献(李新辉等, 2016)。

3.1.2 植物区系

了解一个地区的植物区系组成是进一步深入了解其植被以及生态系统的基础(姜汉桥, 1980)。云南干热河谷的植物区系主要位于中国西南热带与亚热带的多山区域, 其组成多样而特殊且具有明显特征(吴征镒等, 2005)。目前的研究主要分为三个方面:

(1)植物区系特征。云南干热河谷植物区系主要分布于金沙江、怒江、元江河谷以及澜沧江川西滇北部分。分布面积不大, 但物种组成丰富, 有162科755属1,791种(金振洲等, 1995; 金振洲, 2002)。物种组成中特有现象突出, 中国特有属21个, 干热河谷特有属6个, 中国特有种767个, 干热河谷特有种46个(金振洲等, 1995)。物种组成多为热带性或热带起源的耐旱种类, 其中热带种占一半以上, 同时具有长期适应干热河谷群落的特征种或区系标志种。优势或常见种多数为生态适生种或耐干热种类。乔木和灌木主要有木棉(*Bombax ceiba*)、菲岛桐(*Mallotus philippinensis*)、虾子花(*Woodfordia fruticosa*)、滇榄仁(*Terminalia franchetii*)、石山羊蹄甲(*Bauhinia comosa*)、坡柳(*Dodonaea viscosa*)等; 草丛优势种如扭黄茅、孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)、双花草(*Dichanthium annulatum*)等(刘伦辉, 1989; 金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002)。独特的山地峡谷地貌和干热气候是干热河谷植物区系形成的近代原因, 而第三纪以后地史演变是其历史原因, 两者相辅相成(金振洲等, 1995)。

(2)植物区系性质。干热河谷植物区系具有偏热带的亚热带性质, 但云南各条河谷在种级区系组成上稍有差异, 元江、怒江河谷的区系性质偏向热带, 金沙江河谷下游则偏向温带(金振洲等, 1995; 欧晓

昆, 1988; 欧晓昆和金振洲, 1996)。朱华(2008)对于覆盖云南全境的31个地区的植物区系多度分布格局分析认为, 在热带成分中, 全热带分布属最多, 占13.64–46%, 其最大值出现在怒江和元江的干热河谷, 全热带分布属和热带亚洲至热带非洲分布属是干热河谷植被的主要成分。

(3)植物区系起源。干热河谷植物区系中有较多古南大陆起源的科和属, 同样也有与热带非洲稀树草原相同的属和种, 由于地史和近代的自然地理环境的变迁, 干热河谷植物在区系上有明显的热带起源, 带有古地中海后裔的残余性, 存在地理替代现象(金振洲等, 1995; 金振洲和欧晓昆, 2000)。在属水平上, 整个西南干旱河谷植物区系的特有性比例并不显著高于中国亚热带区域的平均值, 与古地中海区系的联系信号虽然清晰, 但在整个区系结构中的比例很低, 表明与地中海区系之间的隔离分化已非常显著(刘晔等, 2016a)。

3.2 植被与土地的关系

3.2.1 干热河谷土壤性质

干热河谷区域处于山脉横断、江流纵切的特殊地质环境中, 特殊的气候导致土壤也呈现出特殊性和复杂性(赵琳等, 2006)。目前的研究主要集中于以下几个方面: (1)土壤分类。元谋河谷土壤类型分为普通燥红土、表蚀燥红土、变性燥红土、表蚀干热的半干润变性土、普通干热的半干润变性土、普通薄层土、普通紫色土。河谷主要分布着燥红土(何毓蓉和黄成敏, 1995), 河谷内坡地大多陡峻土薄, 土壤含砾多、粗骨性强, 大多还含有一定数量的 CaCO_3 , 北部河谷分布较广的是由黄土状母质发育的褐土、灰褐土, 呈较强石灰反应, 南部由酸性的古红壤母质发育的燥红壤、褐红土的表层也有复钙现象, 反映了河谷土壤近代发育的旱化趋势(李明森, 1991)。(2)土壤特性。元谋河谷土壤具有弱腐殖化特性, 其线胀系数 $\text{COLE} \geq 0.1$, 远远超过一般的土壤($\text{COLE} < 0.05$), 土壤同时具有变性特征; 根据岩性特征的诊断指标分析认为, 当地还存在紫色砂页岩岩性特征和薄层土的岩性特征(黄成敏和何毓蓉, 1997)。(3)土壤肥力。元谋不同植被类型林地土壤水分含量均较低, 土壤的物理性能较差, 有机质、养分含量极低(郭玉红等, 2007)。对元江植被土壤理化特征研究表明, 除了磷元素极其缺乏以外, 其他营养元素处于中等以上水平, 土壤肥力最好的是群

落结构复杂、具有残存性质的稀树旱生林(刘方炎等, 2007)。

3.2.2 土地利用/覆盖变化

经济、社会的发展加剧了人为活动对植被分布、演替以及退化的干扰, 脆弱生境与开发利用之间的矛盾使得干热河谷区域土地利用/覆盖变化成为该区域保护与开发的关注热点。

土地利用现状方面, 在金沙江河谷段未利用地面积最大, 占了总面积的53.15%, 而农用地(12.5 km^2)占总面积的43.22%, 其中林地占地比例为13.21% (任洪玉等, 2007)。在澜沧江流域, 在土地利用结构方面, 上游有林地面积比例远高于中游和下游, 耕地和灌木林地比例在下游最高, 疏林地、水域和建设用地比例在中游最高(姚华荣和崔保山, 2006)。

覆盖变化状况方面, 1960–2000年, 金沙江南岸区域30年间林地比例下降了3.18%, 森林覆盖率锐减了4.66%, 土地裸岩化和裸土化比例分别上升了5.75%和10.35%, 毁林开荒、乱砍滥伐等不合理利用方式导致陡坡山地上的自然植被包括森林和草丛成片地丧失, 有林地覆盖率降低, 裸地和裸岩石砾地面积明显增加(杨子生等, 2004)。而在云南元谋, 林地以灌木林、疏生林地为主, 有林地、其他林地较少, 高覆被度草地资源数量减少而中、低覆被度草地面积比例增大, 全区80%以上的林地和牧草地集中分布在海拔1,600 m以下; 而90%左右的草地和70%左右的林地分布在海拔1,100–1,600 m之间(何锦峰等, 2009)。在澜沧江流域, 1990–1998年间, 流域中森林片断化趋势增加, 森林覆盖率大大减少, 9年中森林减少达 $354.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 森林有林地(郁闭度>30%的天然林和人工林)从1990年的52.6%减少到1998年的35.3% (许建初等, 2003)。

在土地类型转变和景观格局变化方面, 对金沙江下游干热河谷土地利用/覆盖变化分析表明, 林地和耕地大幅度减少, 草地和建设用地面积显著增加, 土地利用类型转换的主要方向是林地转化为草地、耕地转化为建设用地和草地、草地转化为未利用地。林地是整个研究时段内减少幅度最大的土地类型, 其变化的主要方向为草地和未利用地, 分别转化40,953.2 ha和4,722.7 ha, 另外有林地向灌木林地转化161,300 ha, 林地在人为开发和自然气候变化的影响下不断退化, 覆盖度不断下降(李苗裔等,

2012), 在澜沧江段, 林地仍是减少幅度最大的土地类型, 主要改变为疏林、草地、灌丛和旱地, 其中转化面积最大的是疏林和荒草地类型(许建初等, 2003)。

综合来看, 云南干热河谷植被总体处于不同程度的退化状态, 金沙江干热河谷区域主要呈现出森林面积锐减、草地面积增加且高覆被草地面积下降, 中、低覆被草地面积增加的趋势(何锦峰等, 2009)。澜沧江流域土地利用/覆盖变化特点则是耕地少、利用率低; 有相当面积的林地, 但分布不平衡; 草场分散, 退化率高; 荒山荒地较多; 各地土地利用状况差异极大(许建初等, 2003; 姚华荣和崔保山, 2006)。

3.2.3 土地退化及水土流失

山高谷深、高差悬殊、地形破碎、气候干热加之人为活动, 使干热河谷地区地表植被稀疏、水土流失严重, 造成一系列严重的土地退化、生态系统退化问题。其中以金沙江中下游的干热河谷地段最为典型, 是中国水土流失最严重的地区之一(张建平等, 2001)。调查显示, 元谋县的水土流失面积为 $1,080.79 \text{ km}^2$, 占土地总面积的53.5%, 而典型的干热河谷水土流失面积为 236.46 km^2 , 占该区总面积的58.09%, 其中轻、中、强、极强度侵蚀面积分别占该区侵蚀面积的31.6%、32.1%、34.9%和1.4%。年总侵蚀量 $106.43 \times 10^4 \text{ t}$, 平均侵蚀模数为 $4,501 \text{ t/km}^2$ (刘海等, 2012)。根据调查统计, 金沙江下游水土流失面积已达 $16,000 \text{ km}^2$, 占总土地面积的60%, 母岩裸露、沟壑纵横, 使面蚀、沟蚀向深沟和溯源侵蚀方向迅速发展(刘刚才和刘淑珍, 1998), 有不同程度的退化土地面积为 $3,650.7 \text{ km}^2$, 占土地总面积的49.1%, 其中轻度退化土地 $2,752.2 \text{ km}^2$, 中度退化土地 618.7 km^2 , 强度退化土地 243.4 km^2 , 极强度退化(荒漠化)土地 36.4 km^2 , 分别占土地总面积的37.2%、8.2%、3.2%和0.5%(张建平和刘淑珍, 1998)。而在红河流域, 流域东部由于岩性多为较坚硬的石灰岩, 地形地貌已趋于低山丘陵, 地势平缓而坡度较小, 因而水土流失程度较轻, 江河水悬移质的多年平均值普遍低于 0.8 kg/m^3 , 侵蚀模数在 700 t/km^2 以下。而西部则处在由海拔2,000多米的台层向1,300多米台层过渡的坡陡流急裂点区域, 在哀牢山地段, 由于河谷下切较深加之植被退化, 风化而成的破碎岩石及紫色土第四纪红层导致严重的水

土流失,具体表现为河水含沙量较高,悬移质一般在 $2.5\sim 4.9\text{ kg/m}^3$,侵蚀模数达 $1,100\sim 1,900\text{ t/km}^2$ 左右(卢培泽等,2000)。

3.3 干热河谷植被的保护与恢复

特殊、复杂的地理和气候环境造就了干热河谷植被的典型性和稀有性,同时失衡的水热配比条件加之不合理的人为活动及干扰导致了干热河谷植被的脆弱性和濒危性。因而干热河谷植被的保护与恢复成为了政府和研究者的关注目标和研究热点(柴宗新和范建荣,2001;张建平,2001;马焕成和曾小红,2006)。

3.3.1 植被的恢复

从20世纪50年代至今,干热河谷植被恢复研究从不断摸索试验到逐渐深入扩展,无论从理论还是实践上都获得了丰富的科研成果(张金盈等,2005;杨振寅等,2007;方海东等,2009;李昆等,2011)。目前基于干热河谷植被恢复研究主要归纳为4个方面:(1)植被恢复的目标。恢复的目标以及程度是植被恢复的首要问题。根据多元顶极论,因地制宜的保护和引种最终都能恢复成不同类型的顶极森林群落(周麟,1996);而有些学者则强调以恢复和保护生态环境为主,根据生境斑块的异质性宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草,不应强求某种植被类型(金振洲和欧晓昆,2000)。(2)植被恢复的功能区划。环境异质性决定了植被的生长状况,同时也导致了恢复模式的多元化。基于气候、小环境、土壤状况、适宜性、水土流失程度等多方面进行了植被恢复的分区、分模式规划(纪中华等,1999,2003,2006;陈利顶等,2001)。(3)植被恢复引种及筛选。针对引进种的可行性和适应性,对不同物种进行引种实验,均取得了较好的效果,其中以赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)、柠檬桉(*E. citriodora*)、大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)以及豆类等的引种效果较为突出(李昆和曾觉民,1999;李昆等,2004;杨忠等,2000;张信宝等,2003)。(4)植被恢复效益评价。评估和度量恢复力度、程度以及由此产生的生态、经济效益,是检测不同技术方法是否得当、模式体系能否见效、理论实践成功与否的重要标志。目前开展了对水土保持、生物量以及生态环境等多方面的评估,有些已经取得不错的成果,有些则效果不佳。如刁阳光(1994)对新银合欢林和未造林地进行了连续4年的雨季观测,并对0–40 cm土层土壤进行

分析,发现新银合欢(*Leucaena leucocephala*)林对保持水土、改良土壤的作用十分明显,其经济价值也很高。而对人工赤桉林的群落结构、物种多样性以及生长量、生物量的分析发现,其密度普遍偏高、结构比较简单、群落稳定性较差,应降低乔木层密度以增加群落稳定性(王克勤和起家聪,2000)。

3.3.2 植被恢复中存在的问题

干热河谷植被恢复研究虽然无论从理论还是实践方面都有大幅的突破和进展,但仍然存在许多问题。如退化生态系统的成因、干扰体系、驱动机制和退化生态过程及其机理等研究目前仍不够深入,缺乏从流域整体或系统水平的区域尺度的综合研究与示范,也缺乏对现有模式随着时间推移和经济发展的需求而变化的可持续性研究(方海东等,2009)。当前植被恢复重建目标不明确,植被恢复研究缺乏尺度观,对乡土植物和封育措施研究重视不够等(杨振寅等,2008)。

4 研究展望

4.1 植被与自然灾害的关系

由于河水冲刷和自然风化,干热河谷常被分割形成典型的“V”型地貌,地质条件复杂加之长期人类垦殖,使得该区植被的水源涵养功效衰减,滑坡、泥石流灾害频发(石承苍和雍国玮,2001)。目前的研究主要针对水土流失状况及植被涵养水土能力,缺乏对灾害发生机理、预警以及模型预测等方面的研究,同时应深入探讨植被变化与水土流失之间的关系,建立“植被指示-灾害预警-灾害防治-灾后恢复”为一体的综合研究网络并进行长期动态监测,更系统地探究植被对防治水土流失的作用,从而更加科学地保护和恢复植被和环境。

4.2 大型工程建设对干热河谷植被的影响

干热河谷植被特殊的分布区域属典型的高原河谷地带,而这些河流正是水电工程开发建设重点区域,如长江中上游-金沙江,湄公河上游-澜沧江。同时,三江并流区地处西部少数民族聚居地区,经济发展相对落后,面临发展与保护的矛盾,这一地区是我国西部欠发达地区、山区交通基础设施快速发展的一个典型样本。水电和道路工程的建设对自然植被的影响是显而易见的,据《中国生态问题报告》,交通基础设施建设与水利工程建设已经成为我国生物多样性破坏的重要因素(姜睿等,2012)。

工程建设活动不仅改变了地表的植被覆盖, 公路两侧的生境和交通工具的携带作用, 还为杂草和外来植物的入侵提供了机会(刘晔等, 2013), 这些都对生物多样性造成了影响。但目前尚缺乏对于工程建设对周边植被状况、群落构建、恢复能力等方面影响的深入研究。水电工程对于河流水文环境及其周边植被的影响, 将是今后干热河谷植被保护与恢复的全新研究领域。

4.3 河谷植被的保护与功能恢复

鉴于干热河谷地区植被类型的残余性和稀有性, 对于这一区域植被的保护与恢复仍然是一个重要的内容。四川攀枝花已经建立了以攀枝花苏铁(*Cycas panzhihuaensis*)为主要保护对象的苏铁自然保护区, 云南省也已经建立元江干热河谷国家级自然保护区, 而云南省级的玉龙雪山自然保护区也包括了从干热河谷到山顶雪山的整个垂直生态系统。可以预见, 植被的保护、特有植物的研究和植被利用将仍然是干热河谷区域植被研究的重要内容。

4.4 植被大尺度的生态过程和服务功能分析

近年来被广泛使用的群落谱系结构和谱系 β 多样性分析可以从一个较新的角度对不同尺度下的生态过程问题进行研究(Webb et al, 2002; Graham & Fine, 2008)。群落谱系结构的研究方法可以将生态学与进化学的相关理论结合起来, 探讨群落构建和植被变化中的生态过程问题, 特别是物种共存和多样性维持的机制(Webb et al, 2002; Cavender-Bares et al, 2004; Vamosi et al, 2008)。 β 多样性与谱系 β 多样性即物种随空间和进化时间发生替代的格局, 为了解不同尺度的生态过程奠定了基础(McKnight et al, 2007)。 β 多样性和谱系 β 多样性在局域和区域环境空间的分布特征与环境因子变化的关系极其密切, 对这些关系的分析可以揭示生态过程及其与尺度的关系, 从进化过程和生态过程角度更好地解释物种的分布和多样性的问题(Graham & Fine, 2008)。干热河谷植被群落类型多样性、分布空间跨度大且环境梯度明显, 是一个可利用谱系结构方法研究的理想对象。采用群落谱系结构相关的方法来分析云南干热河谷植物群落物种多样性及群落构建过程中可能存在的生态过程以及导致物种发生空间替代的原因, 可为今后的生物多样性研究和植被恢复工作提供理论支持。

参考文献

- Cao M, Jin ZZ (1989) Classification of vegetation in Qiaojia dry-hot valley of Jinsha River, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 11, 324–336. (in Chinese with English abstract) [曹敏, 金振洲 (1989) 云南巧家金沙江干热河谷的植被分类. *云南植物研究*, 11, 324–336.]
- Cao YH, Jin ZZ (1993) A research on the vegetation of Nu River dry-hot valley in Lujiangba of Yunnan. *Guihaia*, 13, 132–138. (in Chinese with English abstract) [曹永恒, 金振洲 (1993) 云南潞江坝怒江干热河谷植被研究. *广西植物*, 13, 132–138.]
- Cavender-Bares J, Ackerly DD, Baum DA, Bazzaz FA (2004) Phylogenetic over dispersion in Floridian oak communities. *The American Naturalist*, 163, 823–843.
- Chai ZX, Fan JR (2001) Study on the restoration of vegetation in arid-hot valleys along the Jinsha River. *Journal of Mountain Research*, 19, 381–384. (in Chinese with English abstract) [柴宗新, 范建容 (2001) 金沙江干热河谷植被恢复的思考. *山地学报*, 19, 381–384.]
- Chen LD, Wang J, Fu BJ (2001) Strategy on sustainable development of eco-fragile area of xerothermic valley in Southwest China. *China Soft Science*, (6), 95–99. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 王军, 傅伯杰 (2001) 我国西南干热河谷脆弱生态区可持续发展策略. *中国软科学*, (6), 95–99.]
- Diao YG (1994) Study on the eco-economic function of artificial forest in the dry-hot valley of Jinsha River. *Forest Science and Technology*, 8(12), 26–27. (in Chinese) [刁阳光 (1994) 金沙江干热河谷人工林生态经济功能研究. *林业科技通讯*, 8(12), 26–27.]
- Fang HD, Duan CQ, Pan ZX, Sha YC, He L, Ji ZH (2009) Progress and perspectives on ecological restoration in the dry-hot valley of Jinsha River. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2(1), 5–9. (in Chinese with English abstract) [方海东, 段昌群, 潘志贤, 沙毓沧, 何璐, 纪中华 (2009) 金沙江干热河谷生态恢复研究进展及展望. *三峡环境与生态*, 2(1), 5–9.]
- Gallus WA, Klemp JB (2000) Behavior of flow over steep orography. *Monthly Weather Review*, 128, 1153–1164.
- Graham C, Fine P (2008) Phylogenetic beta diversity: linking ecological and evolutionary processes across space and time. *Ecology Letters*, 11, 1265–1277.
- Guo YH, Lang NJ, He LP, Zheng K, Zhang LX, Wen SL, Jiang QC (2007) A study on soil characteristics of eight vegetation types in Yuanmou dry-hot valley. *Journal of West China Forestry Science*, 36(2), 56–64. (in Chinese with English abstract) [郭玉红, 郎南军, 和丽萍, 郑科, 张立新, 温绍龙, 江期川 (2007) 元谋干热河谷8种植被类型的林地土壤特性研究. *西部林业科学*, 36(2), 56–64.]
- He DM, Wu SH, Peng H, Yang ZF, Ou XK, Cui BS (2005) A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge region and transboundary eco-security in Southwest China. *Advance in Earth Sciences*, 20, 338–344. (in Chinese with English abstract)

- English abstract) [何大明, 吴绍洪, 彭华, 杨志峰, 欧晓昆, 崔保山 (2005) 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 20, 338–344.]
- He JF, Su CJ, Shu L, Yang Z (2009) A 3S-based study on land use and land cover change in the Jinsha River xerothermic valley—A case of Yuanmou County, Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 27, 341–348. (in Chinese with English abstract) [何锦峰, 苏春江, 舒兰, 杨忠 (2009) 基于3S技术的金沙江干热河谷区LUCC研究-以云南省元谋县为例. 山地学报, 27, 341–348.]
- He KZ, He HS, Cai HB (1996) Formation and evolution of the western Yunnan orogenic belt. *Geological Review*, 42, 97–106. (in Chinese with English abstract) [何科昭, 何浩生, 蔡红飘 (1996) 滇西造山带的形成与演化. 地质论评, 42, 97–106.]
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22, 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山-云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科学, 22, 69–72.]
- He YR, Huang CM (1995) Soil taxonomic classification in Yuanmou dry-hot valley, Yunnan Province. *Mountain Research*, 13, 73–78. (in Chinese with English abstract) [何毓蓉, 黄成敏 (1995) 元谋干热河谷土壤分类. 山地研究, 13, 73–78.]
- Hu FG, Duan CF, Liu GH (2007) Investigation of alien invasive weed in farmland of Nujiang dry hot area in Yunnan Province. *Weed Science*, (4), 20–23. (in Chinese) [胡发广, 段春芳, 刘光华 (2007) 云南怒江干热河谷区农田外来入侵杂草研究. 杂草科学, (4), 20–23.]
- Huang CM, He YR (1997) Dynamic variation of soil water in Yuanmou dry-hot valley, Yunnan Province. *Mountain Research*, 15, 234–238. (in Chinese with English abstract) [黄成敏, 何毓蓉 (1997) 云南省元谋干热河谷土壤水分的动态变化. 山地研究, 15, 234–238.]
- Ji ZH, Li JZ, Sha YC (1999) Study on the recovery mode and benefit of land degradation in dry-hot valley vegetation. *Soil and Water Conservation in China*, (7), 27–29. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 李建增, 沙毓沧 (1999) 金沙江干热河谷退化土地植被恢复模式及效益研究. 中国水土保持, (7), 27–29.]
- Ji ZH, Liu GH, Duan YT, Sha YC, Li JZ (2003) Model of plantation restoration and ecological agriculture in fragile ecological environment in arid hot valley of Jinsha River. *Journal of Soil Water Conservation*, 17(5), 19–22. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 刘光华, 段曰汤, 沙毓沧, 李建增 (2003) 金沙江干热河谷脆弱生态系统植被恢复及可持续生态农业模式. 水土保持学报, 17(5), 19–22.]
- Ji ZH, Pan ZX, Sha YC, Fang HD, Liao CF, Bai DZ, Yang YX (2006) Model construction of ecological restoration in arid hot valley of Jinsha River. *Journal of Agro-Environment Science*, 25(S2), 716–720. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 潘志贤, 沙毓沧, 方海东, 廖承飞, 拜得珍, 杨艳鲜 (2006) 金沙江干热河谷生态恢复的典型模式. 农业环境科学学报, 25(S2), 716–720.]
- Jiang HQ (1980) Characteristics and zonality of vegetation distribution in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 2, 22–32. (in Chinese with English abstract) [姜汉侨 (1980) 云南植被分布的特点及其地带规律性. 云南植物研究, 2, 22–32.]
- Jiang R, Fang R, Chen XP, Shen ZH (2013) Study on the influence and countermeasures of highway construction on biodiversity in Sanjiang area. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, (12), 341–345. (in Chinese with English abstract) [姜睿, 房锐, 陈学平, 沈泽昊 (2013) 三江并流区公路建设对生物多样性的影响分析及对策研究. 公路交通科技(应用技术版), (12), 341–345.]
- Jin ZZ (1998) Study on the floristic elements of seed plants in the dry-warm valleys of Yunnan and Sichuan. *Guihaia*, 18, 313–321. (in Chinese) [金振洲 (1998) 滇川干暖河谷种子植物植物区系研究. 广西植物, 18, 313–321.]
- Jin ZZ (2002) The Features of Floras in the Dry-hot and Dry-warm Valleys in Yunnan and Sichuan Provinces. *Yunnan Science and Technology Press*, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK (1998) The phytosociological classification of Braun Blangute's syntaxa for the dry-hot valley vegetation in Yunnan-Sichuan region. *Acta Botanica Yunnanica*, 20, 279–294. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 欧晓昆 (1998) 滇川干热河谷植被布朗布朗喀群落分类单位的植物群落学分类. 云南植物研究, 20, 279–294.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) The Vegetation of Dry Hot Valley of Yuanjiang River, Nujiang River, Jinsha River, Lancang River. *Yunnan Science and Technology Press*, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ, Ou XK, Zhou Y (1987) The general situation of natural vegetation in dry hot river valley of Yuanmou, Yunnan Province. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 11, 308–317. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆, 周跃 (1987) 云南元谋干热河谷植被概况. 植物生态学与地植物学报, 11, 308–317.]
- Jin ZZ, Yang YP, Tao GD (1995) The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry hot river valley of southwestern of China. *Acta Botanica Yunnanica*, 17, 129–143. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 杨永平, 陶国达 (1995) 华西南干热河谷种子植物区系的特征、性质和起源. 云南植物研究, 17, 129–143.]
- Li K, Liu FY, Yang ZY, Sun YY (2011) Study status and trends of vegetation restoration of dry-hot valley in Southwest China. *World Forestry Research*, 24(4), 55–60. (in Chinese with English abstract) [李昆, 刘方炎, 杨振寅, 孙永玉 (2011) 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发

- 展趋势. 世界林业研究, 24(4), 55–60.]
- Li K, Zeng JM (1999) Effects of some tree species on soil in Yuanmou hot-dry valley. *Journal of Southwest Forestry College*, 19(3), 161–164. (in Chinese with English abstract) [李昆, 曾觉民 (1999) 元谋干热河谷地区不同造林树种对土壤的改良作用研究. 西南林学院学报, 19(3), 161–164.]
- Li K, Zhang CH, Cui YZ, Zhao YH, Shi YZ (2004) A study on the fitting afforestation tree species during converting the land for forestry in hot and arid valley of Jinsha River. *Forest Research*, 17, 555–563. (in Chinese with English abstract) [李昆, 张春华, 崔永忠, 赵一鹤, 施永泽 (2004) 金沙江干热河谷区退耕还林适宜造林树种筛选研究. 林业科学研究, 17, 555–563.]
- Li MS (1991) Rational land exploitation of dry valleys in the Hengduan Mountains region. *Journal of Natural Resources*, 6, 326–334. (in Chinese with English abstract) [李明森 (1991) 横断山区干旱河谷土地合理开发. 自然资源学报, 6, 326–334.]
- Li MY, Wang SY, Jiang R, Zhang W (2012) Analysis of land use/cover and landscape pattern change in the dry-hot valley (DHV) area: a case study in Derong County. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 30, 60–66. (in Chinese with English abstract) [李苗裔, 王石英, 蒋容, 张伟 (2012) 干热河谷区土地利用/覆被和景观格局变化分析——以得荣县为例. 四川农业大学学报, 30, 60–66.]
- Li XH, Liu YH, Liu Y, Xu Y, Yang Y, Shen ZH (2016) Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of Yuanjiang River. *Biodiversity Science*, 24, 399–406. (in Chinese with English abstract) [李新辉, 刘延虹, 刘晔, 许玥, 杨阳, 沈泽昊 (2016) 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落beta多样性的影响. 生物多样性, 24, 399–406.]
- Liu FY, Li K, Sun YY, Tang GY, Zhang CH (2010) Effects of climate on vegetation recovery in dry-hot valleys of Hengduan Mountains region in southwest China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19, 1386–1391. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 李昆, 孙永玉, 唐国勇, 张春华 (2010) 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响. 长江流域资源与环境, 19, 1386–1391.]
- Liu FY, Zhu H, Shi JP, Chen XM (2007) Characteristics of plant communities and their soil fertilities in dry-hot valley of Yuanjiang County, Yunnan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 13, 782–787. (in Chinese with English abstract) [刘方炎, 朱华, 施济普, 陈晓鸣 (2007) 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究. 应用与环境生物学报, 13, 782–787.]
- Liu GC, Liu SZ (1998) Impact on desertification of water environment characteristics of the dry-hot valley of Jinsha River. *Mountain Research*, 16, 156–159. (in Chinese with English abstract) [刘刚才, 刘淑珍 (1998) 金沙江干热河谷区水环境特性对荒漠化的影响. 山地研究, 16, 156–159.]
- Liu H, Chen QB, Wang KQ, Zhou L (2012) Soil erosion properties in typical section of dry-hot valley of Jinsha basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(5), 28–33. (in Chinese with English abstract) [刘海, 陈奇伯, 王克勤, 周玲 (2012) 金沙江干热河谷典型区段水土流失特征. 水土保持学报, 26(5), 28–33.]
- Liu LH (1989) Vegetational types of the arid valleys in the Hengduan mountainous region. *Mountain Research*, 7, 175–182. (in Chinese with English abstract) [刘伦辉 (1989) 横断山区干旱河谷植被类型. 山地研究, 7, 175–182.]
- Liu Y, Zhu XX, Shen ZH, Sun H (2016a) Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 367–377. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 朱鑫鑫, 沈泽昊, 孙航 (2016a) 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异. 生物多样性, 24, 367–377.]
- Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Shen ZH (2016b) Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 378–388. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊 (2016b) 中国西南干旱河谷植物群落的数量分类和排序分析. 生物多样性, 24, 378–388.]
- Liu Y, Peng PH, Shi SL, Xu Y, Shen ZH (2016c) Quantitative classification and environmental interpretations for the structural differentiation of the plant communities in the dry valley of Jinshajiang River. *Biodiversity Science*, 24, 407–420. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 许玥, 石松林, 彭培好, 沈泽昊 (2016) 金沙江干旱河谷植物群落的数量分类及其结构分异的环境解释. 生物多样性, 24, 407–420.]
- Liu Y, Shen LF, Wang T, Fang R, Jiang R, Shen ZH (2013) The intrusion pattern and influence factors of *Eupatorium adenophorum* along the highways of Sanjiang area in northwest Yunnan. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, (5), 284–288. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 沈利峰, 王韬, 房锐, 姜睿, 沈泽昊 (2013) 滇西北三江并流地区公路沿线紫茎泽兰的入侵格局及影响因素. 公路交通科技(应用技术版), (5), 284–288.]
- Lu PZ, Zhu T, He YB (2000) Water and soil erosion in Hong River Basin. *Yunnan Environmental Science*, 19(1), 21–23. (in Chinese with English abstract) [卢培泽, 朱彤, 何永彬 (2000) 云南红河流域的水土流失与重点防治. 云南环境科学, 19(1), 21–23.]
- Luo H, Wang KQ (2006) Study on the soil seed bank and vegetation of mountain vegetation restoration area, Jinsha River hot-valley. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2432–2442. (in Chinese with English abstract) [罗辉, 王克勤 (2006) 金沙江干热河谷山地植被恢复区土壤种子库和地上植被研究. 生态学报, 26, 2432–2442.]
- Ma HC, McConchie JA (2001) The dry-hot valleys and foresta-

- tion in Southwest China. *Journal of Forestry Research*, 12, 35–39.
- Ma HC, Zeng XH (2006) Vegetation restoration in the dry and dry-hot valley areas. *Journal of Southwest Forestry College*, 25(4), 52–55. (in Chinese with English abstract) [马焕成, 曾小红 (2006) 干旱和干热河谷及其植被恢复. *西南林学院学报*, 25(4), 52–55.]
- McKnight M, White P, McDonald R, Lamoreux J, Sechrest W, Ridgely R, Stuart S (2007) Putting beta-diversity on the map: broad-scale congruence and coincidence in the extremes. *PLoS Biology*, 5, 2424–2432.
- Min ST, Wang SJ (2008) Valley morphological characteristics, development law and their cause in the longitudinal rang-gorge region. *Journal of Mountain Science*, 25, 524–533. (in Chinese with English abstract) [闵石头, 王随继 (2008) 滇西纵向岭谷区河谷形态特征, 发育规律及成因. *山地学报*, 25, 524–533.]
- Ming QZ (2006) The progress and significance of the research on the evolution of landforms and environment in the three parallel rivers area in north longitudinal range-gorge region. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition)*, 26(3), 56–61. (in Chinese with English abstract) [明庆忠 (2006) 纵向岭谷北部三江并流区地貌与环境演化研究的进展及其重要意义. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 26(3), 56–61.]
- Ming QZ, Shi ZT (2007) New discussion on dry valley formation in the three parallel rivers region. *Journal of Desert Research*, 27, 99–107. (in Chinese with English abstract) [明庆忠, 史正涛 (2007) 三江并流区干热河谷成因新探析. *中国沙漠*, 27, 99–104.]
- Ou CR, Zhu QK, Sun YY (2015) Research progress in the landscape pattern of dry-hot valley in Southwest China. *Journal of West China Forestry Science*, 44(6), 137–142. (in Chinese with English abstract) [欧朝蓉, 朱清科, 孙永玉 (2015) 中国西南干热河谷景观格局研究进展. *西部林业科学*, 44(6), 137–142.]
- Ou XK (1988) The study of flora in Yuanmou dry-hot river valley. *Acta Botanica Yunnanica*, 10, 11–18. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1988) 元谋干热河谷植物区系研究. *云南植物研究*, 10, 11–18.]
- Ou XK (1994) Ecological condition and ecological construction in dry-hot valley of Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 3, 271–276. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1994) 云南省干热河谷地区的生态现状与生态建设. *长江流域资源与环境*, 3, 271–276.]
- Ou XK, Jin ZZ (1987) A research on the vegetation types of the dry-hot river valley in Yuanmou. II. Units above association. *Acta Botanica Yunnanica*, 9, 18–35. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1987) 元谋干热河谷植被的类型研究. II. 群丛以上单位. *云南植物研究*, 9, 18–35.]
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot valley. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. *武汉植物学研究*, 14, 318–322.]
- Ren HY, Liu JG, Wang AJ, Zou X (2007) Actualities of land use in upper Yangtze River Basin typical spots. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 24(5), 16–20. (in Chinese with English abstract) [任洪玉, 刘纪根, 王爱娟, 邹翔 (2007) 长江上游典型样区土地利用现状初步分析. *长江科学院院报*, 24(5), 16–20.]
- Richner H, Phillips PD (1984) A comparison of temperature from mountain tops and the free atmosphere—their diurnal variation and mean difference. *Monthly Weather Review*, 112, 1328–1340.
- Shen R, Zhang JL, He B, Li F, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010) The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuan river. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 2821–2825. (in Chinese with English abstract) [沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010) 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. *生态环境学报*, 19, 2821–2825.]
- Shen YC, Gong GY (1986) *The Introduction to Fluvial Geomorphology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [沈玉昌, 龚国元 (1986) *河流地貌学概论*. 科学出版社, 北京.]
- Shen ZH, Zhang ZM, Hu JM, Han J, Yang JD, Ying LX (2016) Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 475–488. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张志明, 胡金明, 韩杰, 杨济达, 应凌霄 (2016) 西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用. *生物多样性*, 24, 475–488.]
- Shi CC, Yong GW (2001) Present situation of the ecological environment and the countermeasures for reconstruction of the ecological environment of xerothermic and droughty river valley areas in the upper reach of the Yangtze River. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 14, 114–118. (in Chinese with English abstract) [石承苍, 雍国玮 (2001) 长江上游干热干旱河谷生态环境现状及生态环境重建的对策. *西南农业学报*, 14, 114–118.]
- Tang MC, Shen ZB, Chen YY (1979) Average climatic characteristics of the plateau monsoon. *Acta Geographica Sinica*, 34, 33–42. (in Chinese with English abstract) [汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞 (1979) 高原季风的平均气候特征. *地理学报*, 34, 33–42.]
- Vamosi SM, Heard SB, Vamosi JC, Webb CO (2008) Emerging patterns in the comparative analysis of phylogenetic community structure. *Molecular Ecology*, 18, 572–592.
- Wang KQ, Qi JC (2000) Study on the growth of *Eucalyptus camaldulensis* in dry hot-valley of Yuanmou. *Journal of Southwest Forestry University*, 20(2), 67–73. (in Chinese with English abstract) [王克勤, 起家聪 (2000) 元谋干热

- 河谷赤桉林生长规律研究. 西南林学院学报, 20(2), 67–73.]
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 33, 475–505.
- Wu CY (1980) Vegetation of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Wu CY, 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, 李德铎 (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.]
- Wu CY, Zhu YC (1987) Vegetation of Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 朱彦丞 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu JC, Zhang PF, Wang YH (2003) Land use and land cover in Lancang watershed of Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 145–154. (in Chinese with English abstract) [许建初, 张佩芳, 王雨华 (2003) 云南澜沧江流域土地利用和覆盖变化. 云南植物研究, 25, 145–154.]
- Xu Y, Li P, Liu Y, Zhang WJ, Qin SY, Shen ZH (2016) Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley. *Biodiversity Science*, 24, 389–398. (in Chinese with English abstract) [(许玥, 李鹏, 刘晔, 张婉君, 秦思雨, 沈泽昊 (2016) 怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子. 生物多样性, 24, 389–398.)]
- Xu ZF, Tao GD, Yu PH, Wang YL (1985) An approach to the vegetational changes from Yuan River dry-hot valley of Yunnan in the last 500 years. *Acta Botanica Yunnanica*, 7, 403–412. (in Chinese with English abstract) [许再富, 陶国达, 禹平华, 王耀龙 (1985) 元江干热河谷山地五百年来的植被变迁探讨. 云南植物研究, 7, 403–412.]
- Yang QY, Shen KD (1984) On vertical zonation of the north-western Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 39, 141–147. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 沈康达 (1984) 滇西北横断山地区的垂直自然带. 地理学报, 39, 141–147.]
- Yang QY, Zheng D, Liu YH (1988) The natural features and its exploitation and utilization of arid valleys of the Hengduan Mountains. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2(2), 17–24. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度, 刘燕华 (1988) 横断山地区干旱河谷的自然特点及其开发利用. 干旱区资源与环境, 2(2), 17–24.]
- Yang Y, Han J, Liu Y, Zhongyong CR, Shi SL, Sina XL, Xu Y, Ying LX, Zhang WJ, Shen ZH (2016) A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan. *Biodiversity Science*, 24, 440–452. (in Chinese with English abstract) [杨阳, 韩杰, 刘晔, 忠永茨仁, 石松林, 斯那此里, 许玥, 应凌霄, 张婉君, 沈泽昊 (2016) 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较. 生物多样性, 24, 440–452.]
- Yang Z, Zhang JH, Xu JZ, Luo J, Zhang XB (2000) Growth responses of eucalyptus artificial population to slopes in dry-hot valleys, Yuanmou, Yunnan. *Journal of Soil Water Conservation*, 14(5), 2–14. (in Chinese with English abstract) [杨忠, 张建辉, 徐建忠, 罗辑, 张信宝 (2000) 元谋干热河谷不同岩土组成坡地桉树人工林生长特征初步研究. 水土保持学报, 14(5), 2–14.]
- Yang ZP, Chang Y (2007) Ecology and its research progress of the dry hot valley in Southwest China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 25, 90–99. (in Chinese with English abstract) [杨兆平, 常禹 (2007) 我国西南主要干旱河谷生态及其研究进展. 干旱地区农业研究, 25, 90–99.]
- Yang ZS, He YM, Li YH, Zhang YL, Wang YP (2004) Land use change and soil erosion control in dry-hot valley zone in the middle reaches of Jinsha River during 1960–2000: a case study in Binchuan County, Yunnan Province. *Progress in Geography*, 23(2), 16–26. (in Chinese with English abstract) [杨子生, 贺一梅, 李云辉, 张义琳, 王云鹏 (2004) 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究——以云南宾川县为例. 地理科学进展, 23(2), 16–26.]
- Yang ZY, Su JR, Li CF, Wang Y, Li ZH (2008) Species diversity of main communities in hot and dry valley, Yuanmou County. *Forest Research*, 21, 200–205. (in Chinese with English abstract) [杨振寅, 苏建荣, 李从富, 王云, 李正红 (2008) 元谋干热河谷主要植物群落物种多样性研究. 林业科学研究, 21, 200–205.]
- Yang ZY, Su JR, Luo D, Li ZH, Chen XM (2007) Progress and perspectives on vegetation restoration in the dry-hot valley. *Forest Research*, 20, 563–568. (in Chinese with English abstract) [杨振寅, 苏建荣, 罗栋, 李正红, 陈晓鸣 (2007) 干热河谷植被恢复研究进展与展望. 林业科学研究, 20, 563–568.]
- Yao HR, Cui BS (2006) The effect of Land use and its change on soil erosion of the Lancang River watershed in Yunnan Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26, 1362–1371. (in Chinese with English abstract) [姚华荣, 崔保山 (2006) 澜沧江流域土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响. 环境科学学报, 26, 1362–1371.]
- Zhang JL, Liu XK, Shen R, Shi W, Zhang ZM, Zhou R, Ou XK (2010b) The species quantitative & diversity characteristic of grassland community in hot-dry valley of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1519–1524. (in Chinese with English abstract) [张建利, 柳小康, 沈蕊, 施雯, 张志明, 周睿, 欧晓昆 (2010b) 金沙江流域干热河谷草地群落物种数量及多样性特征. 生态环境学报, 19, 1519–1524.]
- Zhang JL, Shen R, Shi W, Liu XK, Ou XK (2010a) The structure and similarity characteristic of the grassland community in hot-dry valley upper middle and lower of Jinsha River. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 1272–1277. (in Chinese with English abstract) [张建利, 沈蕊, 施雯, 柳小

- 康, 欧晓昆 (2010a) 金沙江流域干热河谷上中下游草地植物群落结构与相似性. *生态环境学报*, 19, 1272–1277.]
- Zhang JP, Liu SZ (1998) A preliminary study on land degradation in Panzhihua city on Jinsha river dry-hot valley area. *Journal of Desert Research*, 18, 150–153. (in Chinese with English abstract) [张建平, 刘淑珍 (1998) 金沙江干热河谷区攀枝花市土地退化初探. *中国沙漠*, 18, 150–153.]
- Zhang JP, Yang Z, Zhuang Z (2001) Soil and water erosion status and countermeasures in Yuanmou dry-hot valley. *Yunnan Geographic Environment Research*, 13(2), 22–27. (in Chinese with English abstract) [张建平, 杨忠, 庄泽 (2001) 元谋干热河谷区水土流失现状及治理对策. *云南地理环境研究*, 13(2), 22–27.]
- Zhang JY, Xu Y, Su CJ, Liu XL (2005) Research progress on vegetation restoration in the dry-hot valleys of the Jinsha River. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(6), 101–104. (in Chinese with English abstract) [张金盈, 徐云, 苏春江, 刘兴亮 (2005) 金沙江干热河谷植被恢复研究进展. *水土保持研究*, 12(6), 101–104.]
- Zhang RZ (1992) *The Arid Valley of Hengduan Mountains*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang XB, Yang Z, Zhang JP (2003) Lithologic types on hill slopes and revegetation zoning in the Yuanmou hot-dry valley. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(4), 16–22. (in Chinese with English abstract) [张信宝, 杨忠, 张建平 (2003) 元谋干热河谷坡地岩土类型与植被恢复分区. *林业科学*, 39(4), 16–22.]
- Zhang YC, Li JJ, Kuang MS, Chen Y (1999) Studies on development of Yuanmou basin and valleys during late Cenozoic. *Journal of Lanzhou University*, 35, 199–205. (in Chinese with English abstract) [张叶春, 李吉均, 况明生, 陈晔 (1999) 晚新生代元谋盆地演化与河谷发育研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 35, 199–205.]
- Zhao L, Lang NJ, Zheng K, Peng MJ (2006) A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan Province. *Forest Inventory and Planning*, 31(3), 114–117. (in Chinese with English abstract) [赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊 (2006) 云南干热河谷生态环境特性研究. *林业调查规划*, 31(3), 114–117.]
- Zheng D, Yao TD (2004) *The Uplift of the Tibetan Plateau and Its Environmental Effects*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑度, 姚檀栋 (2004) 青藏高原隆升与环境效应. 科学出版社, 北京.]
- Zheng YC, Gao SH, Chai ZX (1986) A preliminary study on the vertical natural zones in the Hengduan mountainous region. *Journal of Mountain Science*, 4, 76–83. (in Chinese with English abstract) [郑远昌, 高生淮, 柴宗新 (1986) 试论横断山地区自然垂直带. *山地学报*, 4, 76–83.]
- Zhong XH (2000) degradation of ecosystem and ways of its rehabilitation and reconstruction in dry and hot valley-take representative area of jinsha river, Yunnan province as an example. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 9, 376–383. (in Chinese with English abstract) [钟祥浩 (2000) 干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径: 以云南金沙江典型区为例. *长江流域资源与环境*, 9, 376–383.]
- Zhou L (1996) Vegetation evolution in Yuanmou dry-hot valley since Quaternary period. *Mountain Research*, 14, 239–243. (in Chinese with English abstract) [周麟 (1996) 云南省元谋干热河谷的第四纪植被演化. *山地研究*, 14, 239–243.]
- Zhou Y, Jin ZZ (1987) A research on the vegetation types of the dry-hot river valley in Yuanmou. II. Units below association. *Acta Botanica Yunnanica*, 9, 1–3. (in Chinese with English abstract) [周跃, 金振洲 (1987) 元谋干热河谷植被的类型研究. II. 群丛以下单位. *云南植物研究*, 9, 1–3.]
- Zhu H (2008) Distribution patterns of genera of Yunnan seed plants with references to their biogeographical significances. *Advances in Earth Science*, 23, 831–839. (in Chinese with English abstract) [朱华 (2008) 云南种子植物区系地理成分分布格局及其意义. *地球科学进展*, 23, 831–839.]

(责任编辑: 朱华 责任编辑: 时意专)

• 综述 •

西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用

沈泽昊^{1*} 张志明² 胡金明³ 韩 杰¹ 杨济达² 应凌霄¹¹ (北京大学城市与环境学院生态学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)² (云南大学生态与环境学院, 昆明 650091)³ (云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

摘要: 西南干旱河谷是分布于我国亚热带横断山区的隐域性河谷景观, 其环境受季风气候、岭-谷地形环境和人类开发活动的共同影响。适应于季节性干旱和垂直气候分异, 干旱河谷具有独特的植被和丰富的物种多样性资源。在过去几十年中, 干旱河谷的气候变化以增温为一致特征, 同时经历着广泛的人类活动干扰, 特别是道路建设、水利工程、矿山开发和城镇化驱动的土地利用变化, 造成了普遍的植被破坏、生境退化和生物入侵, 给乡土植物多样性资源和生态系统稳定性带来了严重威胁, 然而至今对干旱河谷生物多样性的保护仍基本属于空白。因此, 建议及时建立干旱河谷的生物多样性保护体系; 因地制宜采取退化植被修复、立体农业规划、特色植物资源利用和风景旅游开发等措施, 以维持干旱河谷生态系统的可持续性; 落实生态文明建设的相关政策, 以保障西南生态屏障的生态安全和生态服务能力。

关键词: 干旱河谷; 植物多样性; 气候变化; 土地利用; 环境胁迫; 生态系统保护; 资源利用; 政策

Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China

Zehao Shen^{1*}, Zhiming Zhang², Jinming Hu³, Jie Han², Jida Yang², Lingxiao Ying¹¹ Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871² College of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650091³ College of International River and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract: The dry valleys of Southwest China specifically refer to a type of azonal landscape distributed in the large river basins of the Hengduan Mountain ranges, and are the outcome of the effects of the monsoon climate, ridge-valley geomorphology, and long-term human perturbations. The dry valley landscape is characterized by prominent seasonal aridity, a vertical climate gradient, rich flora of high endemism, and unique vegetation types well adapted to the distinct environment. The environmental change in the last decades is characterized by consistent climate warming and widespread anthropogenic disturbances, especially land use/land cover changes mainly driven by road building, hydro-power construction, mining, and urbanization. These human disturbances intensified vegetation fragmentation, soil erosion, habitat degradation and biological invasion. Environmental degradation has threatened biodiversity resources and ecosystem security while the conservation measures for this unique ecosystem are lacking. We appeal for attention and timely action of biodiversity conservation in the dry valleys of Southwest China by means of establishing natural reserves. Meanwhile, contingent planning for vertical agriculture, degraded vegetation restoration, utilization program for the unique species resource and ecotourism are critical maintaining the sustainability of the dry valley ecosystems. Moreover, the policy and strategy under the goal of ecological civilization construction are also important tools to be applied in promoting ecosystem services and ecological security in the dry valleys of Southwest China.

收稿日期: 2016-01-21; 接受日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(41371190)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzh@urban.pku.edu.cn

Key words: dry valleys; plant diversity; climate change; land use; environmental stress; ecosystem conservation; resource utilization; policy

中国西南干旱河谷是横断山区及其南延山系一种独特的自然景观和生态系统类型,沿怒江、澜沧江、元江、金沙江及其支流雅砻江、大渡河、岷江、白龙江、白水江等河谷的部分地段分布(张荣祖, 1992)。干旱河谷植被景观的形成主要受到平行山脉对西南和东南季风的水汽阻隔、深陷的河谷地形产生的“焚风效应”等自然因素的控制(张荣祖, 1992; 何永彬等, 2000), 人类历史悠久的农牧业开发对原生植被破坏、局部干旱加剧也具有深刻影响(许再富等, 1985)。过去半个世纪以来, 气候温暖化和极端气候事件频发, 在全球和区域尺度上加剧了对生态系统的胁迫; 区域经济发展驱动下的人类活动在我国西南干旱河谷地区也显著扩张。这两方面的变化都成为本区域生物多样性和生态安全的关键胁迫因子(孙辉等, 2005)。

适应于暖热干旱气候环境的植物种类不仅是保护西南干旱河谷生态安全的重要资源, 也是利用该区域独特自然环境和气候资源、实现区域可持续发展的战略资源。为了保护这些分布狭窄、环境极端、组成独特的宝贵生物多样性资源, 有必要就其生存的自然环境条件和人为影响进行分析总结, 并就其保护和可持续利用提出科学对策。

1 干热河谷的资源环境特点

按热量条件, 西南干旱河谷由南往北被分为“干热”、“干暖”、“干温”3种类型(张谊光等, 1989)。虽然各条河流的干旱河谷彼此隔离, 且大多距离遥远, 却呈现了相对一致的自然环境特点, 即光热资源丰富、干湿季分明、降水少而集中、海拔梯度显著(景锐等, 2000)。

1.1 光热资源丰富

干旱河谷区光热资源丰富, 气温高于我国东部同纬度地区。在深陷的河谷段形成一系列热点区域, 年生物温度的分布见图1a。根据长期气象观测记录, 南部和中部干热河谷区大于10℃积温一般在7,000℃以上, 相当于热带和南亚热带热量水平; 中部干暖河谷区大于10℃积温为4,500–7,000℃, 相当于中亚热带热量水平; 北部干温河谷区大于10℃积

温为3,000–4,500℃, 约相当于北亚热带热量水平(刘伦辉和张建华, 1988; 张谊光等, 1989)。

干旱河谷地区全年光能资源变化范围在20–30亿J/m²之间。干热河谷区全年光能资源达25–30亿J/m², 旱季和雨季各约占一半。西昌、得荣、巴塘、汉源等地雨季光能略多于旱季, 生长季光能总量可达15–20亿J/m²。泸定、丹巴、南坪等地河谷区, 全年光热资源虽也可达20–30亿J/m²之间, 但植物生长季仅在9–13亿J/m²之间, 是干旱河谷区光能资源最少的地区(张荣祖, 1992)。

1.2 季节性干旱

干旱河谷区降水量少, 蒸发量是降雨量的2–4倍, 年均干燥度为1.5–5.0。降雨年内分配不均, 主要集中在夏季, 旱季降水一般不足年降水的20%, 特别是4–5月旱季末期, 气温高, 蒸发强烈, 土壤严重干旱(张谊光等, 1989; 黄炬斌, 2010^①)。区域内降水格局受西南季风和纵向岭谷地形的相互作用主导, 在诸河流上游以及金沙江中游形成了若干个沿河谷狭长延伸的显著干旱中心(图1b)。

1.3 显著的环境海拔分异

干旱河谷以森林植被的出现为上限, 在不同河段具有10²–10³ m的海拔差。其分布的海拔幅度主要受“山脊–河谷”相对高差和具体地点水热环境的影响。干旱河谷的气温垂直递减率一般比较大, 降水量一般随海拔升高呈明显增长趋势(张荣祖, 1992; 陈利顶等, 2001; Yang et al, 2016), 导致土壤、植被和农业系统也出现相应的海拔变化。如岷江上游, 从河谷到山顶可分为河谷暖温带半干旱气候(2,000 m以下)、温带半干旱河谷气候(2,000–2,500 m)、山地寒温带湿润气候(2,500–3,000 m)、山地亚寒带气候(3,000–4,000 m)以及高山高原高寒带气候带(4,000 m以上)(杨钦周, 2007)。在金沙江干热河谷区, 谷底植被为稀树灌草丛, 随着海拔升高, 依次更替为以常绿栎林为主的常绿阔叶林、云南松(*Pinus yunnanensis*)林或松栎混交林、常绿阔叶与落叶阔叶混交林等(张宗锦等, 2006)。这样的立体环境还导致

^① 黄炬斌 (2010) 成兰铁路沿线(岷江干热河谷段)植物多样性及其工程扰动区植被恢复潜力研究. 硕士学位论文, 四川农业大学, 成都.

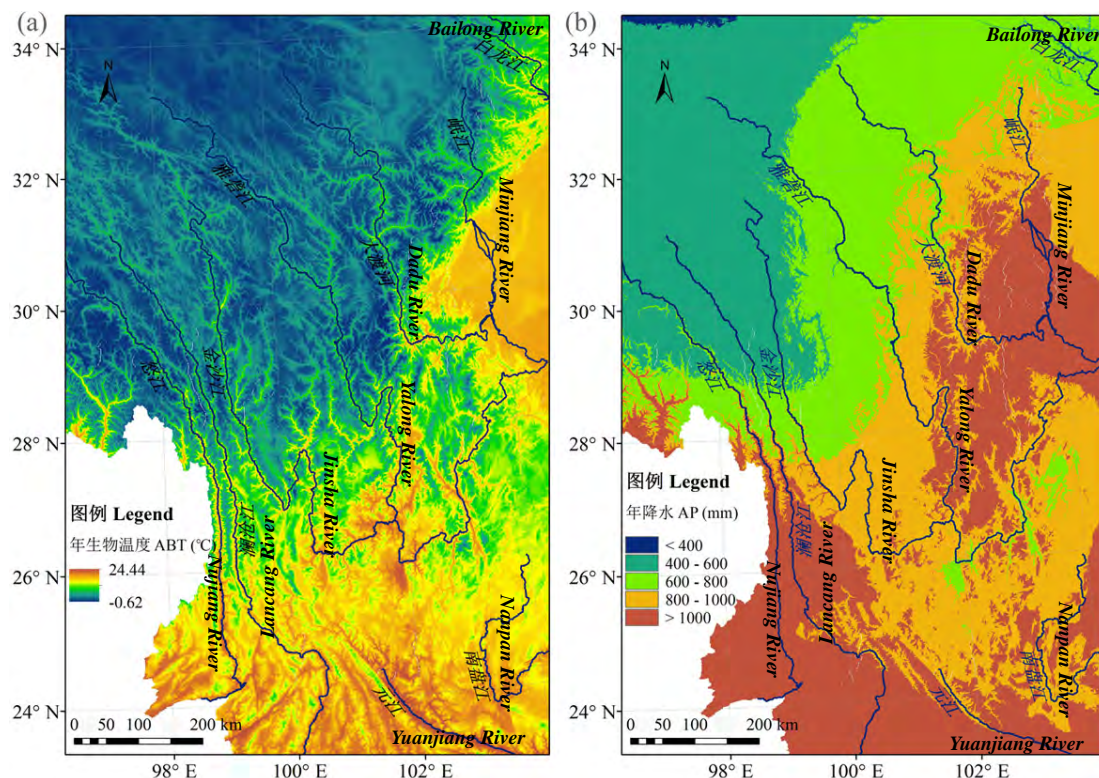


图1 我国西南地区气候特征空间格局。(a)年生物温度(ABT, °C); (b)年降水量(AP, mm)。据刘晔等(2016)作图。

Fig. 1 The spatial pattern of climate features in Southwest China. (a) Annual biotic temperature (ABT, °C); (b) Mean annual precipitation (AP, mm). Following Liu et al (2016).

了农业生产的立体分布,如岷山上游的“河谷林果粮—半山农牧—高山林牧”的农业海拔分布格局(鲍文, 2011)。

1.4 土地资源缺乏

干旱河谷谷坡陡峻,坡度常在30°–40°甚至以上。受地形和水资源影响,适宜耕作的土地资源较匮乏。耕地一般沿河谷呈带状分布,且以坡耕地和旱地为主(张宗锦等, 2006)。如岷江上游耕地仅占其土地面积的2.5%, 25°以上陡坡耕地约占耕地面积的21.46%(叶延琼等, 2002; 鲍文, 2011)。金沙江干热河谷区的东川、会泽、大姚、宾川、元谋五县,其耕地面积仅占总面积的13.74%(拜得珍等, 2006)。

此外,由于干旱河谷区地形陡峭、地质结构松散,滑坡、泥石流等地质灾害多发,水土流失严重,土层普遍较薄,多砂石,土壤贫瘠,保水保肥能力差,不利于农业生产(郭晓鸣, 2001)。如金沙江流域的元谋县水土流失面积占全县国土面积的53.5%(纪中华, 2009);金沙江年均输沙量约占长江上游的一半,达到2.49亿吨,而其泥沙约有70%来自干热河

谷区(石承苍和雍国玮, 2001)。

1.5 经济发展滞后

相较而言,干旱河谷区的交通、通讯和能源等基础设施薄弱,科技、文教、卫生发展水平平均低于全国平均水平,市场化程度较低。兼之土地资源匮乏、干旱、土壤贫瘠、水土流失严重等不利因素,制约了干旱河谷区生态经济发展(拜得珍等, 2006; 沙毓沧等, 2006)。按照国家2014年标准,区内68个县级行政单位中约有国家级贫困县40个,约占全国572个贫困县的7%,占区内全部县级行政单位的近2/3,社会经济发展明显滞后。

2 植物物种多样性资源特点

刘晔等(2016)根据对我国西南9条主要河流干旱河谷的植被调查,结合前人积累的植物分布数据(金振洲和欧晓昆, 2000; 金振洲, 2002; 欧晓昆等, 2006),共记录到典型干旱河谷地段分布的维管束植物186科1,016属2,794种,分别占中国维管束植物科、属、种数的59.6%、30.5%和8.9%,其中有蕨类

和石松类植物29科56属165种、裸子植物4科12属20种、被子植物153科948属2,609种。综合已有资料,得到干旱河谷植物多样性资源特点如下:

(1)构成复杂但优势科、属明显。域内有36个仅含单属单种的科和520个仅含单种的属,分别占本区总科数的19.35%和总属数的51.18%;而种类最多的前5个科即禾本科、菊科、蝶形花科、蔷薇科和唇形科,共占总属数的29.23%和总种数的29.95%。

(2)较强的热带区系亲缘。由于地势低洼、气候干热,干旱河谷植物区系属水平的热带成分与温带成分的比值为 2.56 ± 2.24 (均值 \pm 标准差),明显高于我国亚热带同纬度区域的平均水平(0.89 ± 0.64 , 沈泽昊和张新时, 2000), 在 26°N 以南区域尤为明显(图2); 而在科水平上, 干旱河谷植物区系中热带成分与温带成分的比值更是高达 3.16 ± 1.41 , 表明干旱河谷植物区系中热带成分保留更多, 其中, 泛热带分布属和热带亚洲至热带非洲分布属是干热河谷植被的主要成分(朱华, 2008)。

(3)种、属特有度差异大, 新特有性特征明显。在维管束植物全部1,016属中只有16个中国特有属, 其1.6%的特有率相对于我国亚热带4.7%的平均水平来说很低(沈泽昊和张新时, 2000), 但中国特有种比例却高达61.9%(金振洲, 2002)。属、种水平特有成分比例的悬殊差距表明, 干旱河谷环境足够特殊, 尽管形成的时间较短, 但自其形成以来保留和产生了大量的中国或地区特有物种, 前者以古特有为主, 后者则多为干旱河谷之间隔离分化的新特有种, 如金振洲(2002)确认了46个川滇干热河谷特有种。

(4)局地多样性较低, 但区域差异显著。干旱河谷生境普遍植被稀疏, 植物物种 α 多样性一般较低, 只在一些湿润的局部生境残留的季雨林群落保留了较高的物种丰富度(孙玺雯等, 2008; 顾伯健, 2015^①)。由于河谷海拔梯度显著, 地形变化大, 植物群落类型和物种构成变化大, β 多样性较高; 不同河流之间的物种构成差异是植物多样性仍较丰富的主要原因(刘晔等, 2016; Yang et al, 2016)。

(5)独特的资源植物。干旱河谷由于丰沛的热量资源而造就了独特的乡土生物多样性资源。例如: 滇刺枣(*Ziziphus mauritiana*)是紫胶虫的主要寄主植

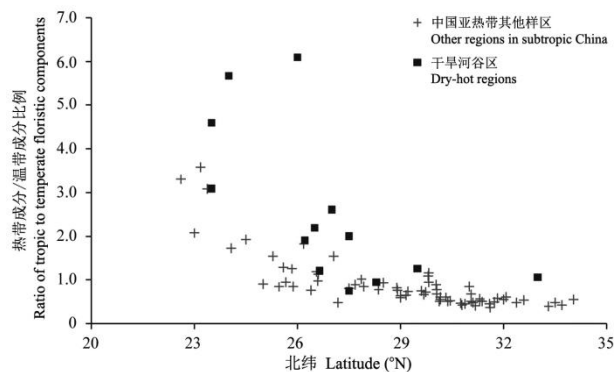


图2 西南干旱河谷及中国亚热带其他地区植物区系热带成分与温带成分在属水平上的比值。数据分别来自刘晔等(2016)和沈泽昊和张新时(2000)。

Fig. 2 The latitudinal pattern of the ratio of tropical over temperate floristic components at the generic level, compared between the sites of the dry-hot valleys of Southwest China (data from Liu et al, 2016) and other regions in the subtropical China (data from Shen & Zhang, 2000)

物; 余甘子(*Phyllanthus emblica*)、酸角(*Tamarindus indica*)、滇刺枣等是制作饮料果脯等系列食品的野生果树; 木棉(*Bombax malabaricum*)、龙须草(*Eulaliopsis binata*)、龙舌兰(*Agave angustifolia*)、剑麻(*A. sisalana*)、火索麻(*Helicteres isora*)等是较好的纤维植物; 金合欢(*Acacia farnesiana*)、香茅(*Cymbopogon tortilis*)等是有开发价值的香料植物(陈玉德等, 1990); 千张纸(*Culicapa arborea*)、大叶紫珠(*Culicapa arborea*)、山黄麻(*Trema orientalis*)、大叶斑鸠菊(*Vernonia volkameriaefolia*)、膏桐(*Jatropha carcas*)、刺天茄(*Solanum indicum*)、鸡嗉子果(*Ficus semicordata*)等为药用植物, 是民间常用的中草药。能源植物也是干热河谷植物资源的一大优势, 如大戟科的膏桐、续随子(*Euphorbia lathyris*)、绿玉树(*Euphorbia tirucalli*), 均为富有潜力的生物质能源物种(何璐等, 2008)。但是, 总体上来看, 干热河谷的植物资源开发还处于自发、分散的状况, 规模化和合理布局还有待提高。

3 环境变化对生物多样性的影响

3.1 气候略有暖旱化趋势

我们利用横断山区干旱河谷内20个典型气象台站的长时序气候数据, 分析了研究区内1970–2012年的气候变化趋势。结果表明: (1)全球变化背景下, 平均气温总体呈现升高趋势, 升幅为 $0.11^\circ\text{C}/10$ 年, 较横断山区整体的 $0.15^\circ\text{C}/10$ 年略低,

① 顾伯健 (2015) 云南绿汁江下游与元江干热河谷普漂段季雨林与萨王纳植被的群落学研究. 硕士学位论文, 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明。

冬季升温幅度高于其他季节; (2)金沙江下游的元谋、东川和巧家段河谷呈现持续降温趋势, 特别是春季降温较为明显; (3)降水量呈微弱减少趋势, 为 $-1.48 \text{ mm}/10\text{年}$, 这主要是由于夏季降水减少量超过其他季节降水增加量所致, 但区域差异明显, 其中高海拔干温河谷近20年降水量有上升趋势(炉霍站, 图3), 干暖河谷保持稳定(茂县站, 图3), 而元江干热河谷近30年基本稳定, 只是近年略有下降(元江站, 图3); (4)多数河谷站点年降水量的集中度呈微弱下降趋势, 而集中期则有所提前, 但不明显。此外, 干旱河谷区气候的相对湿度和日照时间在近几十年间均呈现减少趋势, 相对湿度每10年约减少0.16%, 而日照时间则平均每10年减少24–26 h (丁文荣, 2013)。

3.2 人为干扰与土地覆盖变化

3.2.1 道路建设

当前, 公路建设在国民经济发展中起着越来越重要的作用。据《中国生态问题报告》(环境保护部自然保护司, 1999), 交通基础设施建设与水利工程建设已经成为我国破坏生物多样性的的重要因素。分布于横断山区及其南延山系的干旱河谷区域一方面因为经济欠发达、公共基础设施相对落后, 是过去20年国家投入的重点, 成为交通基础设施快速发展的典型样本(姜睿等, 2013); 另一方面, 该地区又

是我国生物多样性资源的集中分布区, 因而普遍面临保护与发展的矛盾。特别是近十年来, 我国实施了一系列惠农政策, “村村通公路”就是其中的一项, 有效打破了农村经济发展的交通瓶颈(陈建华, 2007)。以滇西北三江并流地区为例, 作为世界自然遗产地和多个自然保护区, 2005年该地区道路总长度为36,254.85 km, 其中国道、省道、县道、乡村公路分别占总长度的2.2%、4.7%、13.4%和79.7%; 而在1989–2005年的16年间道路总长度增加了56.4%, 上述4级公路的长度增量分别为38.9%、26.1%、26.4%和65.9% (Ying et al, 2014)。由于乡村公路一般延伸到更为偏僻、陡峭的乡村, 其长度数倍至数十倍于高等级公路, 加上投资强度不够, 道路建设中植被保护和弃渣处理往往不能达标, 因此所带来的地表植被破坏和水土流失也远远高于高等级公路建设的影响(蒋春燕, 2010)。

而拥有全国最长公路里程的云南省, 2015年各级公路已达23.6万km, 其中农村公路总长19.7万km。据中新网报道, 2010–2015年期间云南省新增公路2.6万km, 除1,375 km高速路外, 其余为低等级公路; 2005–2010年期间, 云南全省改建和新建乡村公路达10.1万 km (www.chinanews.com/df/2016/01-10/7709855.shtml)。

在交通基础设施迅速改善的同时, 路建工程对生态和环境产生了诸多负面效应, 主要包括: (1)对植被的影响: 由于清除了地表的原有植被, 完全改变了地表覆被甚至局部地形, 增加了土壤裸露并加剧了土壤侵蚀和水土流失, 并通过路域次生生境和交通工具的携带作用, 为杂草和外来植物入侵提供了机会(Tikka et al, 2001; 刘晔等, 2013); (2)对动物的影响: 包括交通致死(Forman & Alexander, 1998), 以及干扰、阻断动物原有迁徙路径而使之产生生境回避和巢区转移等行为(Forman & Deblinger, 2000); (3)理化环境影响: 包括改变土壤密度和路域小气候, 路面材料和交通车辆释放固、液、气态污染物而影响周边土壤(Trombulak & Frissell, 2000); 有机物和重金属污染还通过地表径流影响周围水体和水生生物群落(李月辉等, 2003)。

3.2.2 水利工程与土地淹没

西南干旱河谷因其独特的高山峡谷地貌常常成为水电开发中坝址的首选之地, 西南重大水电工程也大多位于干旱河谷区(李少丽等, 2007)。由于大

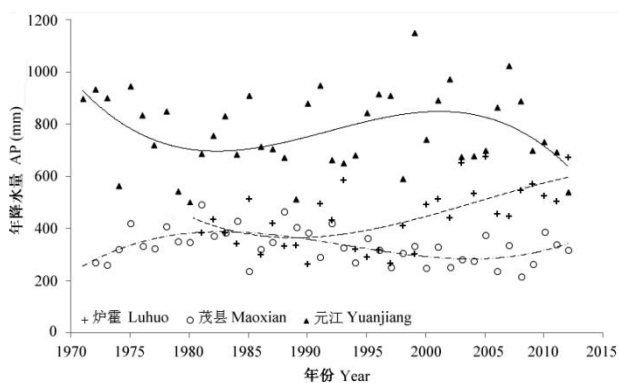


图3 干旱河谷典型台站过去42年(1971–2012年)降水量的变化趋势。炉霍(3,250 m a.s.l.)、茂县(1,590 m a.s.l.)、元江(400 m a.s.l.)站分别代表了“干温”、“干暖”、“干热”河谷类型。(数据来源: 国家气象信息中心)

Fig. 3 The trend of decadal dynamics of annual precipitation (AP) records in three meteorological stations of different dry valley types. Luhuo, Dry-temperate type; Maoxian, Dry-warm type; Yuanjiang, Dry-hot type. (Data source: the Chinese Meteorological Information Center)

河上游来水量大,加上干旱河谷段地形落差大,水能资源十分丰富。例如,金沙江径流年际变化小,多年平均流量 $4,920\text{ m}^3/\text{s}$,年径流量 $1,550\text{ 亿m}^3$,水能蕴藏量达 1.124 亿千瓦 ,约占全国的 16.7% ,是全国最大的水电能源基地,也是世界上少有的水能资源富集的河流。目前金沙江上游川藏段共规划了8个梯级水电站,初步规划装机容量 898 万千瓦 ;中游有8座巨型梯级水电站,总装机容量为 $2,058\text{ 万千瓦}$;下游则有溪洛渡、向家坝等4座世界级巨型梯级水电站,规划的总装机容量为 $4,210\text{ 万千瓦}$,年发电量为 $1,843\text{ 亿度}$,规模相当于两个长江三峡电站(周家骢, 2011)。在澜沧江云南省境内干流河段也规划了14座水电站,包括功果桥、漫湾等8座梯级电站。随着这些水电工程的逐步实施,干旱河谷敏感脆弱的生态系统将面临更为强烈的干扰。

水电工程对当地环境有一定的正面影响,主要表现为建成后库区水流变缓,水库周边形成大面积消落区湿地,可改善局地气候条件,特别是增加空气湿度和降雨量,有利于河谷地带植被的生长(周家骢, 2011)。但负面影响也很显著,主要包括: (1) 水库建成后形成大面积永久性水域,对于干旱河谷生态系统及其特有物种的生境造成巨大损失。(2) 河流转变为静止水面,对适应河流生境的水生生物将带来灾难性影响,这种负面效应因西南诸大河流都有丰富的特有鱼类资源尤显突出。(3) 在降水和水库水位周期性涨落的作用下,消落带坡面植被和土壤结构将被破坏,水土流失加剧,常常导致局部地质灾害的发生(杨慎勤, 2003; 王勇等, 2009)。(4) 由于原来适应陆生环境的植物种被淹没而消亡,而水生物种大多又不适应消落带周期性淹没的生境,导致消落带往往大面积裸露,生态系统结构简单化,稳定性差,再加上垃圾、废水污染而难以利用和恢复(刁承泰, 1999; 穆军等, 2008)。(5) 水库建设产生大量移民,在干旱河谷区内的移民安置区建设和后期不可避免的二次土地开发对脆弱的生态系统也会带来严重威胁(林霖, 2011)。因此,保护干热河谷库区脆弱的生态环境,减少水土流失,恢复重建植被已成为促进水电开发与生态环境协调发展的当务之急(李少丽等, 2007)。

3.2.3 矿山开发

干旱河谷地区地质基础复杂,矿产资源丰富多样。如澜沧江流域兰坪金顶铅锌矿储量在1992年分

别占中国及云南省铅储量的 7.5% 和 47.35% ,锌储量的 13.9% 和 65% (童海京和曾广权, 1995)。怒江河谷贡山县茨开至丙中洛段富存高品位的钨、锡、羊脂玉等矿产。金沙江下游的攀西和三江巨型成矿带储藏着丰富的铅、锌、铁、铜、煤、磷等矿产。雅砻江河谷九龙段则储有铜、铅、锌、铍、钨、金、硫、铁、大理石、石棉、水晶石、花岗石、汉白玉、绿柱石等二十余种矿产资源,尤以铜、铅和锌储量多,品位高,具有较高的开采价值。岷江上游地区的矿产开发自20世纪初即已开始,除金矿外还有大量煤、锑、铜、硝等矿藏。

矿产资源开发对环境的影响主要是开采过程对地表的破坏,以及开采、加工过程产生的环境污染,特别是排放的废气、废水、废渣中所含重金属(镉、铅、砷)对土壤和水体的污染(李璇琼, 2013)。在干旱河谷地区,限于技术、资金等因素,矿产资源的开发缺乏统一规划和管理。由于未能严格执行国家有关法规,矿山盲目开发一方面导致资源浪费,另一方面由于尾矿废渣沿山坡倾泻、掩埋地表植被、污染河流的现象比较普遍,植被保护和恢复被忽视,致使矿区水土流失十分严重(刘刚等, 2007),甚至造成山体滑坡和泥石流。

3.2.4 城镇发展与土地覆盖变化

干旱河谷降水稀缺,地形陡峭,总体上地广人稀。在较长的时间尺度上,人类活动总体上呈加剧趋势,这在元江河谷过去500年的植被覆盖率变化中得到体现(许再富等, 1985)。但由于自然环境比较恶劣,人类活动强度在多数地区变化较为缓慢,景观的变化相应也因地制宜,总体上并不剧烈(Moseley和唐亚, 2006)。针对位于金沙江流域干旱河谷的宾川县(杨子生等, 2004)、得荣县(李苗裔等, 2012)、元谋盆地(何锦峰等, 2009)、滇藏公路沿线(Liang et al, 2014)等多个区段的土地利用/覆被变化研究得到了大体一致的结果。在过去40年里,建筑面积扩张在所有流域的干旱河谷区均为最显著的现象,尽管建筑区总面积的比例并不大,但也反映了城镇化过程的存在。由于城镇面积一般向耕地扩张,并推动新的土地开垦,林地、灌草丛、未利用地和耕地等几种类型之间常常出现相互转换,并引起景观格局破碎化程度的年际波动或空间上的异质变化(李苗裔等, 2012; Liang et al, 2014)。在澜沧江流域也观察到类似的土地利用变化特征(许建初

等, 2003)。另一方面, 天然森林普遍存在显著退化的现象, 如面积缩小、片断化程度加剧(欧晓昆, 1994; 杨万勤等, 2002; Liang et al, 2014)。但自2000年以来, 国家在天然林保护、生态修复工程和人工经济林发展等方面加大了投入, 因此林地总面积呈现先降后升或变化不大的动态特征(周旭等, 2010)。

4 生物多样性资源保护与可持续利用对策

4.1 建设干旱河谷自然保护区, 保护原生生态系统

干旱河谷典型植被类型包括干热的河谷型稀树灌丛和肉质灌丛、干暖的小叶灌丛和干温的近荒漠植被, 具有独特的群落特征和植物区系组成, 是我国西南河谷地区特有的植被类型, 也是全球萨王纳植被、地中海型马基植被在中国西南地区的残余和替代类型。在强盛的亚洲季风影响下, 中国热带亚热带陆地景观的基质为湿润森林。由季风气候与西南平行岭谷地貌相互作用形成的这几种非地带性(或隐域)植被类型(吴征镒, 1980)是全球热带、亚热带半干旱气候与植被类型在中国的唯一代表, 分布狭窄且地理分异明显, 其中保存着大量的干旱河谷特有植物种(金振洲和欧晓昆, 2000)和一些特有动物种, 如金沙江上游白马雪山一带的矮岩羊(*Pseudois schaeferi*) (格玛嘉措, 2000), 具有不可替代的保护价值。然而, 这类生态系统虽因人类活动干扰而受到不同程度的威胁, 至今却基本处于我国现有的自然保护区体系之外。因此, 非常有必要选择干旱河谷景观完整和植被保存良好的区段, 针对这几种珍稀植被类型及其生物多样性建立自然保护区。

4.2 退化植被修复与生态重建

西南干旱河谷的现存植被普遍具有次生特征(许再富等, 1985)。多数研究认为, 该区域存在随着移民迁入垦殖和砍伐林木, 森林覆盖率急剧降低和逐渐旱化的过程, 如四川西昌与云南元谋“土林”的形成。尽管如此, 干旱河谷的典型现状植被例如半稀树草原, 已具有较长的历史和相当的稳定性, 被称为偏途顶极群落(欧晓昆, 1994)。因此植被恢复的指导思想应以绿化荒山、恢复生境为主, 宜林则林、宜灌则灌、宜草则草(陈国阶, 2000)。植被恢复的主要措施包括封山育草, 改变小生境; 优先选用乡土树种; 改进造林技术和整地方法; 营造混交林为主等(张有富, 1998; 张信宝等, 2003; 李昆等, 2004)。

另一方面, 针对不合理的土地开垦, 应结合植被恢复, 继续加强土地利用方式调整, 缓坡耕地进行“坡改梯”, 陡坡地退耕还林, 以减轻水土流失和土地退化(李昆等, 2011)。

4.3 开发因地制宜的立体农业模式

立体农业是一种利用垂直空间资源的生产方式, 通过建立多层次配置、多种生物共栖的立体种植或种植、养殖结合形式, 充分利用光热资源的时空分异和不同物种的需求, 以提高单位面积生产力(范明, 1992; 孙亚明, 2013)。干旱河谷区丰富的光热资源和沿海拔气候梯度为发展立体农业提供了有利条件。因地制宜, 将农业开发、植被恢复和水土保持有机结合是干旱河谷土地开发的核心战略(于丽娟和杜长江, 2008)。

(1)应根据热量条件的差异, 将干旱河谷区按海拔高度划分成干热、干暖、干温、干凉等类型, 分别制定相应的农业种植养殖模式(杨勤业等, 1988)。(2)由于水资源是限制干旱河谷区农业发展的关键, 应按水源条件规划不同的农业发展模式和水源保障体系(纪中华等, 2003)。由于地形坡度决定水分和土壤养分条件, 应将 $<15^\circ$ 的沿河低平地、有灌溉条件的高台地和缓坡地建成高产农业区; $<25^\circ$ 的谷坡地建设为经济林果用地; $>25^\circ$ 的部分土层较厚、条件较好的坡地作为经济林和放牧用地; 对坡度 $>25^\circ$ 、海拔 $>3,000\text{ m}$ 的部分坡地退耕还林还草, 形成干旱河谷的土地利用立体格局(鲍文, 2011)。(3)在相同地点, 农业系统模式设计和作物选择要考虑作物之间的需求差异和光热水土资源的竞争与互补, 同时兼顾市场需求(陈利顶等, 2001)。如针对元谋干热河谷区, 张建平和王道杰(2000)提出在海拔 $900\text{--}1,100\text{ m}$ 平坝区发展粮食和蔬菜基地的复合模式; 在 $1,100\text{--}1,350\text{ m}$ 低山丘陵区发展种植业-畜牧业复合农业生态系统模式; 在 $1,350\text{--}1,600\text{ m}$ 中低山发展粮-经-果-畜复合农林系统; 在 $1,600\text{ m}$ 以上中高山区发展森林-林副产品系统为主的模式。实践证明, 旱坡地复合农业立体种植模式能有效地减少高强度降雨引起的水土流失, 降低土壤侵蚀强度和径流含沙量, 提高旱季土壤含水量, 改善局地小气候, 产生良好的经济和社会效益(杨艳鲜等, 2005, 2006; 何璐等, 2006)。

4.4 开发利用与推广特色资源植物

干旱河谷区的植物物种资源具有很强的地域

性特征,并且适应于光热资源充足和水分限制的特殊生境条件;同时西南少数民族具有丰富的药用植物和经济植物开发利用历史。因此,结合生物资源分布的特点以及民族居住和文化的相关性,深入挖掘和研究,必定会丰富其生物多样性价值的内涵(彭华,2001)。

目前,本地区特色植物资源的开发普遍受到3个因素的制约。(1)使用价值没有得到深入研究。只有通过科学研究,充分认识相关资源植物的食用、药用或其他开发价值,才可能获得投资吸引力。(2)缺乏深度开发利用技术和高效扩大繁殖技术。只有达到足够的产品附加值,才可能调动市场生产的积极性。(3)缺乏合理配置不同植物资源开发、提高土地利用效率、降低开发成本、减轻市场和环境风险的科学规划。一些很有潜力的资源植物的开发在市场短期行为的驱使下,往往一哄而上又一哄而散,不能形成可持续的发展。三七、玛咖、葡萄种植都出现过类似的情况。

4.5 保护与开发干旱河谷风景旅游资源

干旱河谷作为西南地区的一种奇异景观早在一个世纪以前即引起世人的关注,并吸引了西方探险家的目光(Moseley和唐亚,2006)。事实上,这一独特的景观和文化资源蕴藏着巨大的开发潜力,为保护其生物多样性与生态系统稳定性提供了一个可持续的替代选择。

首先,这一区域内的自然风光独特、无可替代。以三江并流世界遗产地为代表,蓝天白云之下的高山峡谷气势磅礴,喷涌奔流的大江与稀树草地形成强烈对比。更有如“怒江第一湾”、“金沙江第一湾”、虎跳峡、金沙江畔的元谋土林、攀枝花苏铁(*Cycas panzhihuaensis*)林等景点举世闻名;滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)、白马鸡(*Crossoptilon crossoptilon*)等珍稀物种和成片的秃杉(*Taiwania cryptomerioides*)林、红豆杉(*Taxus chinensis*)林独具特色。在人文方面,干旱河谷区同时也是多民族聚居区,灿烂多姿的民族文化是另一笔重要的旅游资源。各式各样的民居建筑、民族服饰、特色饮食、民族节庆活动和风土人情汇聚这一区域,并且沿海拔梯度形成格局分化。如在滇西北,从河谷到高山依次分布着傈僳族、怒族、彝族、藏族等少数民族。汉民族的历史文化在整个横断山区干旱河谷也同样丰富多彩、历史悠久,茶马古道即是其中的代表。

不仅如此,现代文明同样增添新的特色,如澜沧江梯级水电站形成高峡平湖和高坝风光,钻洞架桥的高速公路穿越天然植被的五彩画廊(杨兰英和王珏,2000)。尤为重要的是,干旱河谷是横断山区交通网络的必经之地,具有独特优越的交通条件;沿线城镇也是区内各种特色产品的集散地。因此,干旱河谷地区的生态旅游已经具备十分全面、理想的发展条件和基础。生态旅游不仅可以带来区域发展亟需的资金、技术和信息,也有助于自然保护意识的培养和推广,为社会-经济-生态可持续发展增加新的活力。

为了解决旅游业经济利益与环境及传统文化保护需求之间的矛盾,协调开发与保护的平衡,旅游发展需要注意:(1)进行全面系统的环境承载力和环境影响评估;(2)建立完善生态旅游规划体系,并依照自然景观进行合理布局;(3)旅游业者的监管与旅游者自然保护意识的双重强化(吕永龙,1998;牛亚菲,1999)。

5 政策支撑

党的“十八大”将“生态文明”正式确立为“五个文明建设”的国家发展战略目标之一,为生物多样性与生态系统的保护与利用提供了国家制度保障和实践纲领。因此,应当针对西南干旱河谷独特的资源和环境,总结和保护人类在适应这种独特环境中长期积累的认知和生存策略,并通过科学规划,确立干旱河谷地区的生态文明建设战略。主要应当包括:(1)建立干旱河谷生物多样性保护区(地)体系,以保护干旱河谷景观的完整性和代表性生物群落和典型生境,以及干旱河谷动植物区系;(2)保护当地居民(特别是少数民族)长期积累的生态文化,特别是生物多样性资源可持续利用知识体系和技术模式,并加以总结推广;(3)在人类活动驱动的气候干暖化和景观破碎化现状之下,科学规划土地利用类型与布局,加强干旱河谷退化植被的生态修复与重建。

这些战略目标的达成,需要充分合理利用国家相关政策提供的制度保障。

5.1 生态功能区划与生态红线政策

2015年11月,国家环境保护部进行了全国生态功能区划修编,将西南干旱河谷区划归生物多样性保护、水源涵养和土壤保持区,明确指出川滇干热河谷为全国和区域生态安全重要作用的土壤保持

生态功能区(环境保护部, 2015)。尤其是云南省, 其2/3的面积划为生物多样性保护区(环境保护部, 2015)。据此, 云南省生态功能区划将主要干旱河谷划分为水土保持区(即土壤保持区)和生物多样性保护区, 如I4-1红河下游低山河谷生物多样性生态功能区、II3-1澜沧江干流中山峡谷水土保持生态功能区、II4-2元江干热河谷水土保持与林业生态功能区、III2-5金沙江、小江高山峡谷水土保持生态功能区、III3-1香格里拉金沙江峡谷生物多样性保护生态功能区、III4-1牛栏江、金沙江高山峡谷水土保持生态功能区、III5-1澜沧江高山峡谷水土保持生态功能区、III7-3澜沧江中游水土保持生态功能区等(李东梅等, 2010; 云南省环境保护厅, 2014)。

为加强生态保护, 构建区域生态安全格局, 2011年《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》(国发[2011]35号)中明确提出, 在重要生态功能区、陆地和海洋生态环境敏感区、脆弱区等区域划定生态红线(高吉喜, 2015)。2015年党的十八届三中全会把划定生态保护红线作为改革生态环境管理体制、推进生态文明制度建设的重要举措之一。生态保护红线划定工作又被列入我国生态文明建设的纲领性文件和实施方案之中, 已进入各级政府实质性推进阶段(高吉喜, 2015)。在省级主体功能区规划的基础上, 建立生态红线管控制度, 截至2015年底该项工作还在进行中。建议政府在划定生态红线的过程中依据全国生态功能区划, 对干旱河谷区流域生态系统功能、生态敏感性等进行定量评估, 将重要且敏感的区域及当前保护空缺区纳入生态保护红线区。

5.2 生态补偿政策

随着我国经济近30年的快速发展, 生态环境问题越来越突出, 生态补偿作为平衡保护与发展的一个政策工具日益受到重视(李碧洁等, 2013)。1998年以来, 我国政府先后在《森林法》、《水污染防治法》和《水土保持法》中明确提出相关的国家生态效益补偿制度。2010年, 由国家发改委牵头组织的我国首部《生态补偿条例》草案成型, 共提出湿地、生态功能区等七大补偿范围。目前, 我国首部《生态补偿法》正在酝酿之中。与此同时, 全国各地正在推进生态补偿的实践试点, 也相继出台了流域、自然保护区和矿产资源开发等方面的生态补偿政策

性文件, 但受政策法规建设的局限, 我国生态补偿机制还存在着范围不明确、标准不科学、模式比较单一、资金来源缺乏等问题。

西南干旱河谷属于对全国和区域生态安全具有重要作用的土壤保持生态功能区。针对这一生态功能区, 提出的保护措施有“继续实施退耕还林还草; 对已遭受破坏的生态系统, 实施生态恢复与建设工程”(环境保护部, 2015), 该工程是我国实施生态补偿的重要措施之一(李碧洁等, 2013)。西南干旱河谷区多为少数民族聚居, 生产、生活、教育及医疗等方面的条件比较落后。尽管当前实施的退耕还林和天然林保护工程的生态补偿对该区域居民生活和生态恢复起到了积极作用, 但补偿力度和效果都非常有限, 各种无序开发带来的生态和环境问题仍然十分突出。因此有必要针对性地建立更加完善的生态补偿机制(乔旭宁等, 2012; 王军锋和侯超波, 2013), 如李晓冰(2009)建议建立金沙江流域生态补偿机制, 由长江下游经济发达区域对上游经济欠发达的金沙江流域进行生态补偿, 协调发展, 提出了资金、实物和政策3种补偿方式, 等等。

针对西南干旱河谷这一特殊区域的生态补偿, 需要明确以下几个方面: (1)确定区域或者流域生态补偿的各利益攸关方, 即责任主体; (2)明确谁来补偿, 如从利用流域水资源、土地资源及生物资源中大量受益并对生态系统和环境产生影响的实体; (3)确定补偿的客体, 该客体应该是执行区域或流域生态保护工作, 对保障生态系统健康和水资源可持续利用做出贡献的实体, 如上游及周边区域的社区居民, 以及相关的企事业单位等等; (4)补偿方式和途径, 如资金、实物、政策补偿等, 实行征收或者减免生态补偿税机制、建立补偿基金、实行信贷优惠政策及国际合作补偿机制; (5)补偿标准的核算, 主要包括两个方面: 一是为维持区域和流域生态系统健康与服务的直接投入, 如修复植被、保护生物多样性、减少和治理污染、改良土壤、修建水利设施等等; 二是为了维护区域和流域生态系统健康与服务而丧失发展机会的损失, 即间接投入。总体而言, 如何很好地解决生态补偿的3个主要问题即“谁来补偿、补偿多少、如何补偿”是非常复杂的系统工程, 需要综合生态、社会、经济、法律等方面一起研究、协调和执行来完成。

5.3 生态移民政策

生态移民(ecomigration)亦称环境移民,系指为了保护一个地区特殊的生态环境,或让一个地区受损退化的生态系统得到修复而进行的移民(孟琳琳和包智明,2004)。生态移民是我国西部大开发战略之一,以实现恢复生态、扶贫开发双重目标(张云雁,2011)。移民是当前干旱河谷区发展中难以避免的问题。首先,干旱河谷区地质灾害多发,灾害发生及发生的风险可产生移民;其次,城镇化过程需大量建设用地,必然产生失地的农村移民;第三,干旱河谷区是我国重要的水电开发基地,干流大型梯级水电开发已经并将继续产生大量水电移民。如金沙江流域向家坝水电站建成即产生库区移民约9万人。移民安置将影响移民的长远生计、社会的稳定以及当地生态环境的保护。

我国从2000年开始实施生态移民,并颁布了全国《易地扶贫搬迁“十一五”规划》。除相关领域的政策法规外,国家已针对生态移民制定了《退耕还林条例》和《关于易地扶贫搬迁试点工程的实施意见》等管理规范,地方各级政府也在十多年生态移民实践中陆续制定了一些政策和管理条例,但目前仍缺乏专门针对生态移民的法律,包括生态补偿法。干旱河谷区的生态容量有限而环境脆弱,由于水电梯级开发、城镇和道路工程建设造成大量生态移民,并可导致后续二次土地开发,由此给干旱河谷生态系统带来的胁迫形势十分严峻。因此,生态移民相关的政策法规对于干旱河谷生物多样性保护与可持续发展是意义重大、亟待建设的管理工具。

参考文献

- Bai DZ, Pan ZX, Ji ZH, Yang YX, Fang HD, Liao CF (2006) The problem and the countermeasures of ecological environment in Jinsha River dry valley. *Territory & Natural Resources Study*, (4), 50–51. (in Chinese with English abstract) [拜得珍, 潘志贤, 纪中华, 杨艳鲜, 方海东, 廖承飞 (2006) 浅议金沙江干热河谷生态环境问题及治理措施. *国土与自然资源研究*, (4), 50–51.]
- Bao W (2011) Impact of climate change on agriculture on dry valley in the dry upper reaches valley of Minjiang River and its adaptive countermeasures. *Guangdong Agricultural Sciences*, 38, 162–165. (in Chinese with English abstract) [鲍文 (2011) 岷江上游干旱河谷气候变化对农业发展的影响及适应性对策. *广东农业科学*, 38, 162–165.]
- Chen GJ (2000) Thoughts on ecologic construction in the upper reaches of the Changjiang River. *Science & Technology Review*, (7), 59–61. (in Chinese) [陈国阶 (2000) 关于长江上游生态建设的几点思考. *科技导报*, (7), 59–61.]
- Chen JH (2007) Reflection on the problems of rural road construction in the village. *Science Information*, (3), 231–237. (in Chinese) [陈建华 (2007) 农村公路“村村通”建设中存在问题的思考. *科技信息*, (3), 231–237.]
- Chen LD, Wang J, Fu BJ (2001) Strategy on sustainable development of eco-fragile area of xerothermic valley in Southwest China. *China Soft Science*, (6), 95–99. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 王军, 傅伯杰 (2001) 我国西南干热河谷脆弱生态区可持续发展策略. *中国软科学*, (6), 95–99.]
- Chen YD, Zhang ZJ, Hui YW, Zheng DR, Tan BB, Ding WA (1990) Study on the full use of plant resources of dry-hot valley in Yunnan. *Forest Research*, 3, 638–641. (in Chinese with English abstract) [陈玉德, 张志钧, 惠雅雯, 郑德蓉, 谭保邦, 丁维安 (1990) 云南干热河谷的植物资源及开发利用研究. *林业科学研究*, 3, 638–641.]
- Department of Nature Conservation, Ministry of Environmental Protection (1999) Report on the Ecological Problems in China. *China Environmental Science Press*, Beijing. (in Chinese) [环境保护部自然保护司 (1999) 中国生态问题报告. *中国环境科学出版社*, 北京.]
- Diao CT (1999) Preliminary study on land resource of water level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 8, 75–79. (in Chinese with English abstract) [刁承泰 (1999) 三峡水库水位消落带土地资源的初步研究. *长江流域资源与环境*, 8, 75–79.]
- Ding WR (2013) Trend of the climate changes in dry valleys of Hengduan Mountains, China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 29, 681–687. (in Chinese with English abstract) [丁文荣 (2013) 横断山区干旱河谷气候变化趋势研究. *生态与农村环境学报*, 29, 681–687.]
- Forman RTT, Alexander LE (1998) Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207–231.
- Forman RTT, Deblinger RD (2000) The ecological road-effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway. *Conservation Biology*, 14, 36–46.
- Fan M (1992) On the comprehensive multi-story and dimension agriculture. *Journal of Natural Resources*, 2, 180–188. (in Chinese) [范明 (1992) 试论立体农业. *自然资源学报*, 2, 180–188.]
- Gao JX (2015) Exploring the delineation and supervision of ecological protection redlines in China. *Biodiversity Science*, 23, 705–707. (in Chinese with English abstract) [高吉喜 (2015) 探索我国生态保护红线划定与监管. *生物多样性*, 23, 705–707.]
- Gemajiacuo (2000) The *Pseudois schaeferi* in the Baima Snow Mountain. *Chinese Wildlife*, (4), 41. (in Chinese) [格玛嘉措 (2000) 白马雪山的矮岩羊. *野生动物学报*, (4), 41.]
- Guo XM (2001) The main problems and countermeasures of ecological construction in arid valley area of Sichuan Province. *Social Science Research*, 5, 33–36. (in Chinese) [郭晓

- 鸣 (2001) 四川干旱河谷地区生态建设的主要问题与对策建议. 社会科学研究, 5, 33–36.]
- He JF, Su CJ, Shu L, Yang Z (2009) A 3S-based study on land use and land cover change in the Jinshajiang xerothermic valley: a case of Yuanmou County, Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 3, 341–348. (in Chinese with English abstract) [何锦峰, 苏春江, 舒兰, 杨忠 (2009) 基于3S技术的金沙江干热河谷区LUCC研究: 以云南省元谋县为例. 山地学报, 3, 341–348.]
- He L, Duan YT, Sha YC, Luo JP, Qu WL, Ma KH, Zhang D (2006) Study on ecology and economy benefit of eco-economic forestry composite planting mode in Jinsha River hot and dry valley. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(5), 16–19. (in Chinese with English abstract) [何璐, 段曰汤, 沙毓沧, 罗敬萍, 瞿文林, 马开华, 张德 (2006) 金沙江干热河谷区生态经济林复合种植模式的生态经济效益研究. 水土保持学报, 20(5), 16–19.]
- He L, Yuan LC, Duan YT, Sha SC, Yang SL, Huang WY, Gou P, Wu K, Chen XY (2008) Exploitation and utilization of energy plants in the dry-hot valley in Yunnan. *China Tropical Agriculture*, (1), 33–35. (in Chinese) [何璐, 袁理春, 段曰汤, 沙毓沧, 杨顺林, 黄文英, 苟平, 武逵, 陈新元 (2008) 云南干热河谷能源植物的开发利用. 中国热带农业, (1), 33–35.]
- He YB, Lu PZ, Zhu T (2000) Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain–Yunnan Plateau. *Resources Science*, 22, 69–72. (in Chinese with English abstract) [何永彬, 卢培泽, 朱彤 (2000) 横断山—云南高原干热河谷形成原因研究. 资源科学, 22, 69–72.]
- Ji ZH, Liu GY, Duan YT, Sha YC, Li JZ (2003) Model of plantation restoration and ecological agriculture in fragile ecological environment in arid hot valley of Jinsha River. *Journal of Soil Water Conservation*, 17(5), 19–22. (in Chinese with English abstract) [纪中华, 刘光华, 段曰汤, 沙毓沧, 李建增 (2003) 金沙江干热河谷脆弱生态系统植被恢复及可持续生态农业模式. 水土保持学报, 17(5), 19–22.]
- Ji ZH (2009) *Ecological Agriculture in the Dry Hot Valleys: Research and Practice*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [纪中华 (2009) 干热河谷生态农业: 研究与实践. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jiang CY (2010) On the policy of rural road construction and advices for improvement. *Journal of Science and Education*, (4), 41. (in Chinese) [蒋春燕 (2010) 论我国农村“村村通公路”政策及改进建议. 科教导刊, (4), 41.]
- Jiang R, Fang R, Chen XP, Shen ZH (2012) Study on the influence and countermeasures of highway construction on biodiversity in the Three Parallel Rivers Region. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, 12, 341–345. (in Chinese with English abstract) [姜睿, 房锐, 陈学平, 沈泽昊 (2013) 三江并流区公路建设对生物多样性的影响分析及对策研究. 公路交通科技 (应用技术版), 12, 341–345.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) *The Vegetation of Dry Hot Valley of Yuanjiang River, Nujiang River, Jinsha River and Lancang River*. Yunnan University Press & Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社和云南科技出版社, 昆明.]
- Jin ZZ (2002) *Floristic Features of Dry-hot and Dry-warm Valleys, Yunnan and Sichuan*. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲 (2002) 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征. 云南科技出版社, 昆明.]
- Jing R, Zhong XH, Liu SZ, Sha YC, Zhu HY, Yang SL (2000) Discussion on agricultural development in Yuanmou dry hot valley. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, (2), 56–61. (in Chinese with English abstract) [景锐, 钟祥浩, 刘淑珍, 沙毓沧, 朱红业, 杨顺林 (2000) 元谋干热河谷区农业发展若干问题的探讨. 西南农业学报, (2), 56–61.]
- Li BJ, Zhang SL, Hou CC (2013) Review on the research progress of ecological compensation. *World Agriculture*, (2), 11–21. (in Chinese with English abstract) [李碧洁, 张松林, 侯成成 (2013) 国内外生态补偿研究进展评述. 世界农业, (2), 11–21.]
- Li DM, Gao ZW, Fu X, Wu XQ, Wu G (2010) Ecological sensitivity of ecological functional area in Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 138–145. (in Chinese with English abstract) [李东梅, 高正文, 付晓, 吴晓青, 吴钢 (2010) 云南省生态功能类型区的生态敏感性. 生态学报, 30, 138–145.]
- Li K, Liu FY, Yang ZY, Sun YY (2011) Study status and trends of vegetation restoration of dry-hot valley in Southwest China. *World Forestry Research*, 24(4), 56–60. (in Chinese with English abstract) [李昆, 刘方炎, 杨振寅, 孙永玉 (2011) 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发展趋势. 世界林业研究, 24(4), 55–60.]
- Li K, Zhang CH, Cui YZ, Zhao YH, Shi YZ (2004) A study on the fitting afforestation tree species during converting the land for forestry in hot and arid valley of Jinsha River. *Forest Research*, 17, 555–563. (in Chinese with English abstract) [李昆, 张春华, 崔永忠, 赵一鹤, 施永泽 (2004) 金沙江干热河谷区退耕还林适宜造林树种筛选研究. 林业科学研究, 17, 555–563.]
- Li MY, Wang SY, Jiang R, Zhang W (2012) Analysis of land use/cover and landscape pattern change in the dry-hot valley (DHV) area: a case study in Derong County. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 30(1), 60–66. (in Chinese with English abstract) [李苗裔, 王石英, 蒋容, 张伟 (2012) 干热河谷区土地利用/覆被和景观格局变化分析: 以得荣县为例. 四川农业大学学报, 30(1), 60–66.]
- Li SL, Feng Z, Wang Y (2007) Application of restoration ecology theory in ecological restoration of major hydropower project in Southwest China. *Journal of Disasters and Prevention*, (2), 74–80. (in Chinese with English abstract) [李少丽, 丰瞻, 王宇 (2007) 恢复生态学理论在西南重

- 大水电工程区生态修复中的应用探讨. 灾害与防治工程, (2), 74–80.]
- Li XB (2009) Thinking on building an ecological compensation mechanism in Jinsha River watershed in China. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, (2), 132–138. (in Chinese with English abstract) [李晓冰 (2009) 关于建立我国金沙江流域生态补偿机制的思考. 云南财经大学学报, (2), 132–138.]
- Li XQ (2013) The Impacts of Mineral Research Exploitation on Ecology and Environment: A Case Study about the Jiulong Section of Yalong River Basin. PhD Dissertation, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu. [李璇琼 (2013) 矿产资源开发对生态环境的影响研究: 以雅砻江流域九龙段为例. 博士学位论文, 成都理工大学, 成都.]
- Li YH, Hu YM, Li XZ (2003) Research on the progress of road ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 447–452. (in Chinese with English abstract) [李月辉, 胡远满, 李秀珍 (2003) 道路生态研究进展. 应用生态学报, 14, 447–452.]
- Liang J, Liu Y, Ying LX, Li P, Xu Y, Shen ZH (2014) Do higher level roads have larger impacts on the mountain landscape? A case study of the Three Parallel Rivers region. *Chinese Geographic Sciences*, 24, 15–27.
- Lin L (2011) The recovery and development of post disaster economy in post placement area of reservoir: a case in Yingpan County. *Economic Research*, (1), 148–150. (in Chinese with English abstract) [林霖 (2011) 水库后靠安置地区灾后经济恢复与发展: 以青川县营盘乡为例. 经济研究导刊, (1), 148–150.]
- Liu G, Shen L, Sun SZ, Zhang FF (2007) Resource exploitation and industry sustainability development in the affected area of step hydro-power stations alongside the lower Jinshajiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 16, 565–570. (in Chinese with English abstract) [刘刚, 沈镭, 孙尚志, 张菲菲 (2007) 金沙江下游梯级电站开发影响区域资源开发与产业可持续发展. 长江流域资源与环境, 16, 565–570.]
- Liu LH, Zhang JH (1988) A study on the dry valleys in Yunnan. *Tropical Geography*, 8, 355–362. (in Chinese with English abstract) [刘伦辉, 张建华 (1988) 云南干旱河谷特点与治理途径. 热带地理, 8, 355–362.]
- Liu Y, Shen LF, Wang T, Fang R, Jiang R, Shen ZH (2013) The intrusion pattern and influence factors of *Eupatorium adenophorum* along the roads in the Three Parallel Rivers Region, Northwest Yunnan. *Highway Traffic Science and Technology (Application Technology Edition)*, 5, 284–288. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 沈利峰, 王韬, 房锐, 姜睿, 沈泽昊 (2013) 滇西北三江并流地区公路沿线紫茎泽兰的入侵格局及影响因素. 公路交通科技 (应用技术版), 5, 284–288.]
- Liu Y, Zhu XX, Shen ZH, Sun H (2016) Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China. *Biodiversity Science*, 24, 367–377. (in Chinese with English abstract) [刘晔, 朱鑫鑫, 沈泽昊, 孙航 (2016) 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异. 生物多样性, 24, 367–377.]
- Lü YL (1998) Development and planning of ecotourism. *Journal of Natural Resources*, 13, 1–6. (in Chinese with English abstract) [吕永龙 (1998) 生态旅游的发展与规划. 自然资源学报, 13, 1–6.]
- Meng LL, Bao ZM (2004) Summarization of the study of migration for the reason of zoological environment. *Journal of the Central University for Nationalities (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 31, 48–52. (in Chinese with English abstract) [孟琳琳, 包智明 (2004) 生态移民研究综述. 中央民族大学学报(哲学社会科学版), 31, 48–52.]
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2015) The National Ecological Function Regionalization by the Chinese Academy of Sciences (Revised edition). [环境保护部 (2015) 中国科学院全国生态功能区划 (修编版). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm. (accessed 2016-04-20)]
- Moseley RK, Tang Y (2006) Vegetation dynamics in the dry valleys of Yunnan, China, during the last 150 years: implications for ecological restoration. *Journal of Plant Ecology*, 30, 713–722. (in Chinese with English abstract) [Moseley RK, 唐亚 (2006) 云南干旱河谷 150 年来的植被变化研究及其对生态恢复的意义. 植物生态学报, 30, 713–722.]
- Mu J, Li ZB, Li P, Li Q, Hu L (2008) Study on ecological reconstruction technology of water dissipation zone in the reservoir area of the hydropower station in Jinsha dry-hot valley. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 28, 172–176. (in Chinese with English abstract) [穆军, 李占斌, 李鹏, 李强, 胡琳 (2008) 金沙江干热河谷水电站库区消落带的生态重建技术初探. 水土保持通报, 28, 172–176.]
- Niu YF (1999) Sustainable tourism, ecotourism and implementation. *Geographic Research*, 18(2), 1–6. (in Chinese with English abstract) [牛亚菲 (1999) 可持续旅游、生态旅游及实施方案. 地理研究, 18(2), 1–6.]
- Ou XK (1994) Ecological condition and ecological construction in dry-hot valley of Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 3, 271–276. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆 (1994) 云南省干热河谷地区的生态现状与生态建设. 长江流域资源与环境, 3, 271–276.]
- Ou XK, Zhang ZM, Wang CY, Wu YC (2006) Vegetation of Meri Snow Mountain. Science Press, Beijing. (in Chinese) [欧晓昆, 张志明, 王崇云, 吴玉成 (2006) 梅里雪山植被研究. 科学出版社, 北京.]
- Peng H (2001) Plant resources and agricultural biodiversity in the southwest of China. *Acta Botanica Yunnanica*, 8(Suppl. XIII), 28–36. (in Chinese with English abstract) [彭华 (2001) 中国西南地区植物资源与农业生物多样性. 云南植物研究, 8(增刊XIII), 28–36.]
- Qiao XN, Yang YJ, Yang DG (2012) Research status of ecological compensation in river basin and key problem analysis. *Progress in Geographical Science*, 31, 395–402. (in Chinese with English abstract) [乔旭宁, 杨永菊, 杨德纲

- (2012) 流域生态补偿研究现状及关键问题剖析. 地理科学进展, 31, 395–402.]
- Sha YC, Ji ZH, Li JZ, Fang HD, Yang YX, Liao CF, Huang XQ (2006) The ecological environment of dry hot valley in Southwest China. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 19(Suppl.), 312–318. (in Chinese with English abstract) [沙毓沧, 纪中华, 李建增, 方海东, 杨艳鲜, 廖承飞, 黄兴奇 (2006) 西南地区干热河谷生态环境问题. 西南农业学报, 19(增刊), 312–318.]
- Shen ZH, Zhang XS (2000) A quantitative analysis on the floristic elements of the Chinese subtropical region and their spatial patterns. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 38, 366–380. (in Chinese with English abstract) [沈泽昊, 张新时 (2000) 中国亚热带地区植物区系地理成分及其空间格局的数量分析. 植物分类学报, 38, 366–380.]
- Shi CC, Yong GW (2001) Present situation of the ecological environment and the countermeasures for reconstruction of the ecological environment of xerothermic and dry river valley areas in the upper reach of the Yangtze River. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 14(4), 114–118. (in Chinese with English abstract) [石承苍, 雍国玮 (2001) 长江上游干热干旱河谷生态环境现状及生态环境重建的对策. 西南农业学报, 14(4), 114–118.]
- Sun H, Tang Y, Huang XJ, Huang CM (2005) Research status and development trend of dry river valley in Hengduan area. *World Science and Technology Research and Development*, 27(3), 54–61. (in Chinese with English abstract) [孙辉, 唐亚, 黄雪菊, 黄成敏 (2005) 横断山区干旱河谷研究现状和发展方向. 世界科技研究与发展, 27(3), 54–61.]
- Sun XW, Du F, Wang J (2008) Study on community features of monsoon forest in the dry-hot valleys in Yuanjiang County. *Journal of Southwest Forestry College*, 28(1), 6–11. (in Chinese with English abstract) [孙玺雯, 杜凡, 王娟 (2008) 元江县干热河谷季雨林群落特征研究. 西南林学院学报, 28(1), 6–11.]
- Sun YM (2013) Study on the development of three-dimensional agriculture in Panzhihua City. *China Agricultural Resources and Regional Planning*, 6, 145–149. (in Chinese with English abstract) [孙亚明 (2013) 攀枝花市立体农业发展研究. 中国农业资源与区划, 6, 145–149.]
- Tikka PM, Hogmander H, Koski PS (2001) Road and railway verges sever as dispersal corridors for grassland plants. *Landscape Ecology*, 16, 659–666.
- Tong HJ, Zeng GQ (1995) Environmental protection for developing mineral resources in Lan Cang Jiang Catchment. *Yunnan Environmental Science*, (3), 32–35. (in Chinese with English abstract) [童海京, 曾广权 (1995) 澜沧江流域矿产资源开发的环境保护对策. 云南环境科学, (3), 32–35.]
- Trombulak SC, Frissell C (2000) Review of the ecological effects of roads on terrestrial and aquatic ecosystem. *Conservation Biology*, 14, 18–30.
- Wang JF, Hou CB (2013) Research on implementation framework and compensation model of ecological compensation mechanism in China: based on the perspective of the source of compensation funds. *China's Population, Resources and Environment*, 23(2), 23–29. (in Chinese with English abstract) [王军峰, 侯超波 (2013) 中国流域生态补偿机制实施框架与补偿模式研究: 基于补偿资金来源的视角. 中国人口、资源与环境, 23(2), 23–29.]
- Wang Y, Li P, Mu J, Bai D (2009) Study on countermeasures of ecological restoration of riparian zone of hydropower station reservoir area in Jinsha dry hot valley. *Research on Soil and Water Conservation*, 16, 141–144. (in Chinese with English abstract) [王勇, 李鹏, 穆军, 白丹 (2009) 金沙江干热河谷水电站库区消落带生态修复对策研究. 水土保持研究, 16, 141–144.]
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu JC, Zhang PF, Wang YH (2003) Land use and land cover in Lancang watershed of Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 145–154. (in Chinese with English abstract) [许建初, 张佩芳, 王雨华 (2003) 云南澜沧江流域土地利用和覆盖变化. 云南植物研究, 25, 145–154.]
- Xu ZF, Tao GD, Yu PH, Wang YY (1985) An approach to the vegetational changes from Yuanjiang dry-hot valley of Yunnan in the last 500 years. *Acta Botanica Yunnanica*, 7, 403–412. (in Chinese with English abstract) [许再富, 陶国达, 禹平华, 王耀尤 (1985) 元江干热河谷山地五百年来植被变迁探讨. 云南植物研究, 7, 403–412.]
- Yang LY, Wang J (2000) The development of tourism resources in the northwest of Yunnan Province. *Ecological Economy*, (12), 36–41. (in Chinese) [杨兰英, 王珏 (2000) 滇西北旅游资源及其开发. 生态经济, (12), 36–41.]
- Yang QZ (2007) Study on the arid-valley scrubs in the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 25, 1–32. (in Chinese with English abstract) [杨钦周 (2007) 岷江上游干旱河谷灌丛研究. 山地学报, 25, 1–32.]
- Yang QY, Zheng D, Liu YH (1988) Physico-geographic feature and economic development of the dry valleys in the Hengduan Mountains, Southwest China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2(2), 17–24. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 郑度, 刘燕华 (1988) 横断山地区干旱河谷的自然特点及其开发利用. 干旱区资源与环境, 2(2), 17–24.]
- Yang SQ (2003) Jinsha River: the prospect of giant hydropower base in China. *China Electric Power Enterprise Management*, 9, 20–25. (in Chinese) [杨慎勤 (2003) 金沙江: 我国巨型水电基地展望. 中国电力企业管理, 9, 20–25.]
- Yang WQ, Wang KY, Song GY, Gong AD, He YR (2002) Analysis of ecological security in the typical area of Jinsha dry-hot valley. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 10(3), 116–119. (in Chinese with English abstract) [杨万勤, 王开运, 宋光煜, 宫阿都, 何毓蓉 (2002) 金沙江干热河谷典型区生态安全问题探析. 中国生态农业学报, 10(3), 116–119.]

- Yang YX, Ji ZH, Fang DH, Bai DZ, Liao CF (2005) Study and preliminary evaluation on the benefit of models of compound eco-agriculture on dry slope land in Yuanmou dry hot valley. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(4), 88–89, 99. (in Chinese with English abstract) [杨艳鲜, 纪中华, 方海东, 拜得珍, 廖承飞 (2005) 元谋干热河谷旱坡地复合生态农业模式效益研究初评. *水土保持研究*, 12(4), 88–89, 99.]
- Yang YX, Ji ZH, Sha YC, Pan ZX, Fang DH, Bai DZ, Liao CF (2006) Study on benefits of soil and water conservation in the dry hot valley of dry land ecological agriculture model in Yuanmou. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(3), 70–73. (in Chinese with English abstract) [杨艳鲜, 纪中华, 沙毓沧, 潘志贤, 方海东, 拜得珍, 廖承飞 (2006) 元谋干热河谷区旱坡地生态农业模式的水土保持效益研究. *水土保持学报*, 20(3), 70–73.]
- Yang ZS, He YM, Li YH, Zhang YL, Wang YP (2004) Land use change and soil erosion control in dry-hot valley zone in the middle reaches of Jinsha River during 1960–2000: a case study in Binchuan County, Yunnan Province. *Progress in Geography*, 23(2), 16–25. (in Chinese with English abstract) [杨子生, 贺一梅, 李云辉, 张义琳, 王云鹏 (2004) 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究: 以云南宾川县为例. *地理科学进展*, 23(2), 16–26.]
- Yang Y, Shen ZH, Han J, Zhongyong C (2016) Elevational gradients of plant species diversity along east and west slopes of Baima Snow Mountain in Southwest China. *Forests*, 7, doi: 10.3390/f7040089.
- Ye YQ, Chen GJ, Fan H (2002) Research on the fragile ecological environment on resources and environment in the upper of the Minjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 4, 383–387. (in Chinese with English abstract) [叶延琼, 陈国阶, 樊宏 (2002) 岷江上游脆弱生态环境刍论. *长江流域资源与环境*, 4, 383–387.]
- Ying LX, Shen ZH, Chen JD, Fang R, Chen XP, Jiang R (2014) Spatiotemporal patterns of road network and road development priority in Three Parallel Rivers Region in Yunnan, China: an evaluation based on modified kernel distance estimate. *Chinese Geographical Science*, 24, 39–49.
- Yu LJ, Du CJ (2008) Study on the sustainable development of agriculture in dry hot valley region. *Rural Economy*, (7), 67–68. (in Chinese with English abstract) [于丽娟, 杜长江 (2008) 干热河谷地区农业可持续发展研究. *农村经济*, (7), 67–68.]
- Zhang JP, Wang DJ (2000) The optimization strategy of agricultural ecological system in the dry hot valley of Yuanmou. *Journal of Mountain Science*, 18(2), 134–138. (in Chinese with English abstract) [张建平, 王道杰 (2000) 元谋干热河谷区农业生态系统的优化对策. *山地学报*, 18(2), 134–138.]
- Zhang RZ (1992) *The Dry Valleys of the Hengduan Mountains Region*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhang XB, Yang Z, Zhang JP (2003) Lithologic types on hill slopes and evegetation zoning in the Yuanmou hot-dry valley. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(4), 16–22. (in Chinese with English abstract) [张信宝, 杨忠, 张建平 (2003) 元谋干热河谷坡地岩土类型与植被恢复分区. *林业科学*, 39(4), 16–22.]
- Zhang YF (1998) Study on biological control technology in dry hot valley. *Mountain Research*, 16, 248–251. (in Chinese with English abstract) [张有富 (1998) 干热河谷气候区荒坡生物治理技术. *山地研究*, 16, 248–251.]
- Zhang YG, Chen JW, Xu YJ (1989) Classification and optimal utilization of agricultural climate resources in the dry-hot valleys of southwestern China. *Resources Science*, (3), 1–6. (in Chinese) [张谊光, 陈纪卫, 徐渝江 (1989) 我国西南干旱河谷农业气候资源的分类与合理利用. *资源科学*, (3), 1–6.]
- Zhang YY (2011) A study on the policies and laws on the ecological migration in western China. *Forward Position*, (20), 197–200. (in Chinese) [张云雁 (2011) 西部生态移民的相关政策法律研究. *前沿*, (20), 197–200.]
- Zhang ZJ, Liu SQ, Cheng BX, Fan Y, Li Y (2006) Characteristics of land resources and characteristic ecological agricultural construction of dry-hot valley along Jinsha River. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 24, 77–82. (in Chinese with English abstract) [张宗锦, 刘世全, 成本喜, 范宇, 李怡 (2006) 金沙江干热河谷土地资源特点与特色生态农业建设途径探讨. *四川农业大学学报*, 24, 77–82.]
- Zhou JC (2011) Promote terrestrial ecological restoration in the dry hot valley of Jinsha River by means of hydropower development. *Northwest Hydropower*, (3), 1–3. (in Chinese) [周家骢 (2011) 以金沙江干流水电开发促进金沙江流域干热河谷陆生生态修复. *西北水电*, (3), 1–3.]
- Zhou L (1996) Vegetation evolution in Yuanmou dry-hot valley since Quaternary period. *Mountain Research*, 14, 239–243. (in Chinese with English abstract) [周麟 (1996) 云南省元谋干热河谷的第四纪植被演化. *山地研究*, 14, 239–243.]
- Zhou X, Zhang B, Liu G (2010) Monitoring of vegetation change in Yuanmou dry-hot valley based on remote sensing. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 19, 1309–1313. (in Chinese with English abstract) [周旭, 张斌, 刘刚才 (2010) 元谋干热河谷近30年植被变化的遥感监测. *长江流域植被与环境*, 19, 1309–1313.]
- Zhu H (2008) Distribution patterns of genera of Yunnan seed plants with references to their biogeographical significances. *Advances in Earth Science*, 23, 831–839. (in Chinese with English abstract) [朱华 (2008) 云南种子植物区系地理成分分布格局及其意义. *地球科学进展*, 23, 831–839.]

(责任编辑: 薛达元 责任编辑: 周玉荣)

•生物编目•

金沙江上游干旱河谷植被

李云琴¹ 杜凡^{2*} 汪健² 李瑞年² 刘洋²¹ (云南省林业科学院, 昆明 650201)² (西南林业大学林学院, 昆明 650224)

摘要: 为了解金沙江上游奔子栏到羊拉约130 km河段范围内干旱河谷的植被特征, 作者采用样带与典型样方相结合的方法, 对该河段进行了植物群落调查。结果显示: (1)研究区域记录到野生维管植物51科95属111种(含种下等级), 其中, 蕨类植物4科4属6种; 无裸子植物; 被子植物中双子叶植物40科71属84种; 单子叶植物7科20属21种。(2)群落物种以草本为主, 达67种, 占总物种数的60.36%; 生活型以地面芽植物为主, 占总物种数的32.43%, 矮高位芽次之, 占27.93%; 叶型以微型和小型叶为主, 微型叶有30种, 占统计总数(50种)的60%, 小型叶有11种, 占总数的22%。(3)用双向指示种分析方法可将93个样方分为5个群系。分布最广、物种丰富度最高的是小叶荆 + 小叶野丁香(Form. *Vitex microphylla* + *Leptodermis pilosa* var. *microphylla*)群系。(4)根据对该河谷区域的气候特点、干旱程度、植被特征(植株矮化、叶片小、植物毛被发达、植株具刺、部分植物有吸湿反应性特征等)的分析, 综合植物群落的外貌、结构、物种构成和植物形态, 可以确认金沙江上游干旱河谷植被具有亚热带荒漠植被类型的特征。

关键词: 金沙江上游; 干旱河谷; 亚热带荒漠植被; 生活型; 群落外貌

Desert vegetation in dry valleys of the upstream of Jinsha River

Yunqin Li¹, Fan Du^{2*}, Jian Wang², Ruinian Li², Yang Liu²¹ Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201² Faculty of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224

Abstract: In order to understand the vegetation characteristics of dry valleys in the upstream of Jinsha River, a field survey was conducted by using transect and sampling surveys with 93 plots from September to October of 2011. Results showed that: (1) There were 111 vascular plant species belonging to 95 genera in 51 families, including 6 ferns belonging to 4 genera in 4 families, and 84 species of dicotyledon belonging to 71 genera in 40 families, 21 species of monocotyledon belonging to 20 genera in 7 families. (2) Five main life forms: Nanophanerophyte, Hemicryptophyte, Chamaephyte, Therophyte and Geophyte, can be recognized, of which Hemicryptophyte was the most dominant, occupying 32.43% and Nanophanerophyte accounted for 27.93% of the total. The dominant leaf size belonged to nanophyll and microphyll, accounted for 60% and 22%, respectively. (3) 93 sampling plots can be classified into 5 community types using a two-way Indicators Species Analysis. The species richness of herbs were higher than shrubs, and the richness of the Formation *Vitex microphylla*+*Leptodermis pilosa* var. *microphylla* was the greatest and also distributed most widely. (4) The vegetation in the dry valleys of the upstream of Jinsha River can be regarded as subtropical desert.

Key words: upstream of Jinsha River; dry valley; desert vegetation; life form; community physiognomy

金沙江上游是我国西南地区最为典型的干旱河谷区之一, 由于早年不通公路, 该区域一直是植

被调查的薄弱区域。《中国植被》中曾指出四川、云南、贵州一带受焚风作用的干旱河谷, 为非地带

收稿日期: 2015-09-11; 接受日期: 2016-04-26

基金项目: 云南省重点学科“野生动植物保护与利用”(XKZ200904)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: kmdufan@163.com

性的河谷性荒漠植被类型的出现创造了局部的生境(吴征镒, 1980), 但其资料并未覆盖金沙江上游干旱河谷区域。《四川植被》中将干旱河谷植被分为干旱灌丛(北部)和稀疏灌木草丛(南部)(四川植被协作组, 1980)。1987年出版的《云南植被》(吴征镒等, 1987)中将河谷旱生植被作为稀疏灌木草丛的1个类型, 也没有关注本区域干旱河谷植被。云南大学金振洲教授团队于20世纪80年代开始研究云南的干热干暖河谷植被(金振洲等, 1987, 1994; 金振洲, 1999; 金振洲和欧晓昆, 2000)。但迄今为止, 对金沙江河谷的研究均未涉及奔子栏以上极度干旱的区域。

本文根据实地调查, 力求揭示金沙江上游干旱河谷的植被特征, 以期为进一步更加全面地研究横断山三江并流区植被提供数据参考。

1 研究区概况

金沙江上游滇西北德钦县奔子栏(交界河汇口)到羊拉河段, 地处28°11'–28°58' N, 99°01'–99°12' E, 位于滇、川、藏3省交界区, 长约130 km。研究区海拔2,000–3,020 m, 河谷深陷, 谷深多在2,000 m以上, 谷壁陡峭, 坡度总体大于50°, 河谷呈“V”字型。奔子栏(海拔2,020 m)最高气温37°C, 最低气温–4°C(骆银辉等, 2008), 降水量286 mm。其附近的上桥头水文站年平均降水量仅203 mm, 年干燥度3.5–5.0(张荣祖, 1992)。同样是附近的得荣县城(海拔2,422 m)年平均降水量347.1 mm, 年蒸发量2,368.8 mm, 蒸发量是降水量的6倍以上(黄云辉, 2013)。

金沙江奔子栏–交界河汇口段为中国29° N以南降水量最少的地方, 是名副其实的“干谷”(黄英和李自顺, 2006)。本研究区奔子栏(交界河汇口)以上河谷至今未设水文及气候观测点, 缺少相关气象数据。但比奔子栏镇所在地更干旱, 降水更稀少。实地访问得知, 研究区雨季短暂, 降雨集中在7–9月且降雨量极少, 其他季节基本不下雨, 极为干燥。

2 方法

2.1 样方调查

从奔子栏镇附近上游的交界河汇口沿奔子栏–羊拉公路, 顺金沙江边逐渐向上游的德钦县羊拉方向, 选择约130 km长的河段。通过踏查, 选择6条垂直典型样带, 样带间隔约20 km, 海拔范围约2,000–

3,000 m, 在样带上共设置100个10 m × 10 m的样方。相邻样方间的垂直高差约100 m。于2011年9月底至10月初, 调查每个样方中植物的种类、高度、盖度、株数、叶面积大小等; 并记录生境因子。选择其中典型的93个样方作研究。

2.2 数据分析

由于样方中没有乔木成分, 故计算样方中灌木的重要值, 作为确定植物群落类型的重要依据, 利用双向指示种分析方法(two-way indicators species analysis, TWINSpan)进行群落的聚类(张金屯, 2004)。草本/灌木层重要值 = (相对频度 + 相对盖度 + 相对多度)/3。

采用 Raunkiaer 系统(曲仲湘等, 1983)划分生活型和叶级谱。

选用物种丰富度测度群落内的物种多样性。

3 结果

3.1 群落外貌

研究区内植被的群落盖度介于3–25%, 高度3–200 cm, 灌木层盖度为2–20%, 草本层盖度为0.5–25%。以抗旱能力较强、分布稀疏的超旱生灌木、半灌木和小半灌木为主, 几乎都是落叶种类, 有刺的种类也较多; 分枝低矮, 丛状; 叶小、革质, 毛被发达, 外貌灰绿色。

3.2 群落物种组成

样方中记录到维管植物51科95属111种(含种下等级)(附录1), 包括蕨类植物4科4属6种, 被子植物中双子叶植物40科71属84种, 单子叶植物7科20属21种。其中, 草本67种, 占总种数的60.36%; 灌木44种, 占总种数的39.64%。每个样方中物种数为5–24种, 平均12.8种。

优势科为禾本科(13属14种)和菊科(9属14种), 占总科数的3.92%。优势属为蒿属(*Artemisia*, 4种)和卷柏属(*Selaginella*, 3种); 含2种的属有9属, 占总属数的9.47%, 如鹅绒藤属(*Cynanchum*)、雀梅藤属(*Sageretia*)、石莲属(*Sinocrassula*)等; 含1种的属有84属, 占总属数的88.42%, 如羊蹄甲属(*Bauhinia*)、香茶菜属(*Rabdosia*)、醉鱼草属(*Buddleja*)、槐属(*Sophora*)等。

3.3 群落生活型谱及叶型

3.3.1 生活型谱

植物生活型以地面芽种类最多, 达36种, 占总

种数的32.43% (图1), 如环根芹(*Cyclorhiza waltonii*)、芸香草(*Cymbopogon distans*)、康定翠雀花(*Delphinium tatsienense*)等。高位芽植物均为矮高位芽类型, 计31种, 占27.93%, 如架棚(*Ceratostigma minus*)、小叶灰毛茛(*Caryopteris forrestii* var. *minor*)、小叶荆(*Vitex microphylla*)等, 主要是耐旱落叶灌木。一年生草本17种, 占15.32%, 如直立点地梅(*Androsace erecta*)、杂配轴藜(*Axyris hybrida*)、德钦画眉草(*Eragrostis deqinensis*)等。地上芽植物14种, 占12.61%, 主要有云南蒿(*Artemisia yunnanensis*)、小叶鹅绒藤(*Cynanchum anthonyanum*)、灰岩木蓝(*Indigofera calcicola*)等。地下芽植物13种, 占11.71%, 如卷叶黄精(*Polygonatum cirrhifolium*)、曲序南星(*Arisaema tortuosum*)、独尾草(*Eremurus chinensis*)等。

3.3.2 叶型

研究区植物的叶片较小, 以硬叶、毛叶、狭叶、刺叶、肉质叶为特征。硬叶植物如德钦画眉草, 毛叶植物如芸香草、茅叶荩草(*Arthraxon prionodes*)、短穗冠芒草(*Enneapogon brachystachyus*)等, 狭叶植物如白草(*Pennisetum flaccidum*)、刺叶植物如多刺天门冬(*Asparagus myriacanthus*)、肉质叶植物如长萼石莲(*Sinocrassula ambigua*)、德钦景天(*Sedum wangii*)等。这些特征是对该区极度干旱气候的适应。

根据Raunkiaer创建的叶型分类系统, 将金沙江干热河谷的植物叶级进行分类。由于气候干旱, 大部分草本植物叶片卷缩、枯黄, 因而只对灌木层植物及部分草本植物进行了叶型分类, 共50种。其中以微型叶和小型叶为主, 微型叶有30种, 占统计总数的60%, 小型叶有11种, 占总数的22% (图2)。从叶型的分布可以看出当地生境的干和热, 适应干旱生境的小型叶植物能够生长良好。

3.3.3 有刺植物

有刺植物共12种, 占总物种数的10.81%。其中, 有刺草本是猪毛菜(*Salsola collina*)、刺花莲子草(*Alternanthera pungens*)、千针苋(*Acroglachin persicarioides*)、灌木有单刺仙人掌(*Opuntia monacanta*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、对节刺(*Sageretia pycnophylla*)、白刺花(*Sophora davidii*)、西南蔷薇(*Rosa muiriellae*)、多刺天门冬、刺铁线莲(*Clematis delavayi* var. *spinescens*)、凹叶雀梅藤

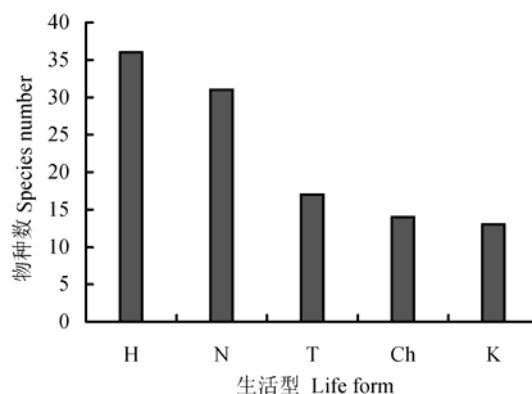


图1 金沙江上游干旱河谷植物生活型统计。H: 地面芽; N: 矮高位芽; T: 一年生; Ch: 地上芽; K: 地下芽。

Fig. 1 Plant life form in dry valleys of the upstream of Jinsha River. H, Hemicryptophyte; N, Nanophanerophyte; T, Therophyte; Ch, Chamaephyte; K, Geophyte.

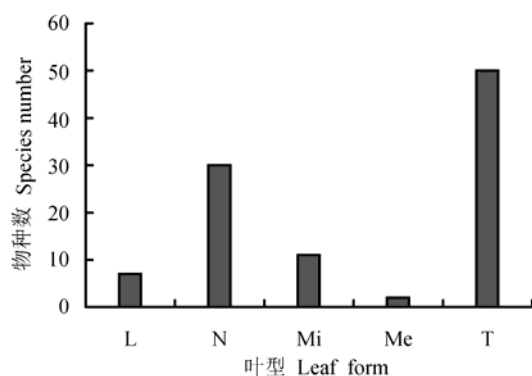


图2 金沙江上游干旱河谷植物叶型分类。L: 鳞型叶; N: 微型叶; Mi: 小型叶; Me: 中型叶; T: 总计。

Fig. 2 Plant leaf form in dry valleys of the upstream of Jinsha River. L, Leptophyll; N, Nanophyll; Mi, Microphyll; Me, Mesophyll; T, Total.

(*Sageretia horrida*)、淡黄鼠李(*Rhamnus flavesces*)等。频度最大的是白刺花, 出现于43个样方, 频度达46.24%。有刺植物比例高同样是干旱植被的显著特征。

3.4 群落类型划分

应用双向指示种分析(TWINSPAN)方法, 将93个样方划分为5组, 对应于5个群系(表1)。这一分类结果与野外观察的群落实际情况相符, 表明采用TWINSPAN方法进行植物群落划分是可行的。

3.5 物种丰富度

物种丰富度(图3, 附录2)最高的是小叶荆 + 小叶野丁香群系(Form. *Vitex microphylla* + *Leptodermis pilosa* var. *microphylla*) ($S = 72$), 最低的是小

表1 金沙江上游干旱河谷植被型
Table 1 Vegetation types in dry valleys of the upstream of Jinsha River

| 植被型 Vegetation type | 植被亚型 Vegetation subtype | 群系 Formation |
|------------------------|---------------------------------|---|
| 荒漠 Desert | 干旱河谷荒漠 Dry valley vegetation | 1. 小叶荆+小叶野丁香群系 Form. <i>Vitex microphylla</i> + <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> |
| | | 2. 白刺花+小叶荆群系 Form. <i>Sophora davidii</i> + <i>Vitex microphylla</i> |
| | | 3. 灰岩木蓝+胶粘香茶菜群系 Form. <i>Indigofera calcicola</i> + <i>Rabdosia glutinosa</i> |
| | | 4. 小叶荆+小叶杭子梢群系 Form. <i>Vitex microphylla</i> + <i>Campylotropis wilsonii</i> |
| | | 5. 小叶灰毛莸+胶粘香茶菜群系 Form. <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> + <i>Rabdosia glutinosa</i> |

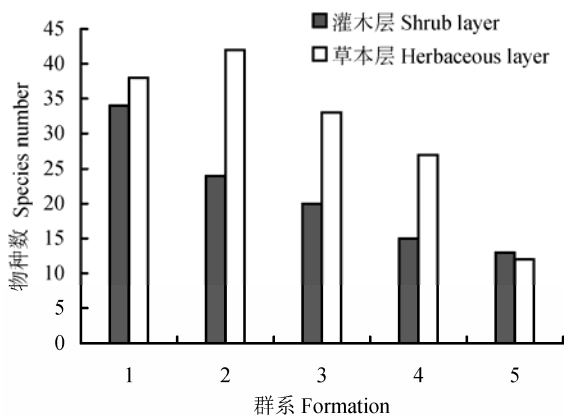


图3 金沙江上游干旱河谷荒漠植物群落物种丰富度。1: 小叶荆+小叶野丁香群系; 2: 白刺花+小叶荆群系; 3: 灰岩木蓝+胶粘香茶菜群系; 4: 小叶荆+小叶杭子梢群系; 5: 小叶灰毛莸+胶粘香茶菜群系
Fig. 3 The species richness of plant communities in dry valleys of the upstream of Jinsha River. 1, Form. *Vitex microphylla* + *Leptodermis pilosa* var. *microphylla*; 2, Form. *Sophora davidii* + *Vitex microphylla*; 3, Form. *Indigofera calcicola* + *Rabdosia glutinosa*; 4, Form. *Vitex microphylla* + *Campylotropis wilsonii*; 5, Form. *Caryopteris forrestii* var. *minor* + *Rabdosia glutinosa*

叶灰毛莸 + 胶粘香茶菜群系(Form. *Caryopteris forrestii* var. *minor* + *Rabdosia glutinosa*) ($S = 25$)。灌木层的物种丰富度低于草本层, 较为明显的是白刺花 + 小叶荆群系(Form. *Sophora davidii* + *Vitex microphylla*)和灰岩木蓝 + 胶粘香茶菜群系(Form. *Indigofera calcicola* + *Rabdosia glutinosa*)。草本丰富度远大于灌木, 说明群落生境严酷, 高蒸发、低降水的干旱河谷更适合耐旱的草本植物生长。

4 讨论

内蒙古阿拉善高原荒漠是我国温带荒漠植被的典型类型。何明珠等(2010)的研究结果表明, 在阿拉善高原荒漠70种植物中, 高位芽占35.7%, 地上

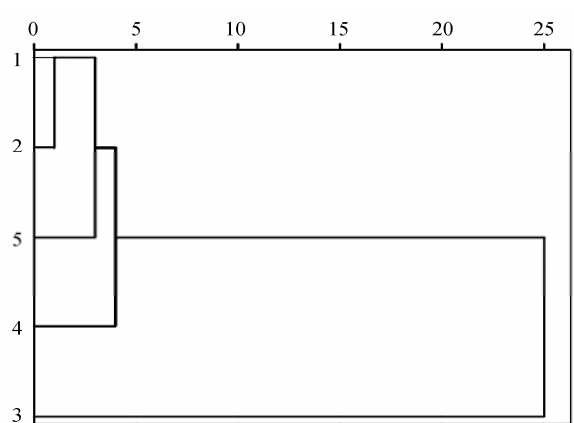


图4 相似地区的植物生活型聚类分析结果。1: 金沙江上游; 2: 阿拉善(何明珠等, 2010); 3: 金沙江中下游(欧晓昆和金振洲, 1996); 4: 元江干热河谷(金振洲, 1999); 5: 怒江中游(庄翠珍等, 2011)
Fig. 4 The cluster analysis of plant community life form in five areas. 1, Upstream the Jinsha River; 2, Alxa Plateau (He et al, 2010); 3, Middle and lower Jinsha River (Ou & Jin, 1996); 4, Dry-hot valley of Yuanjiang River (Jin, 1999); 5, Middle reaches of Nujiang River (Zhuang et al, 2011)

芽占17.2%, 地面芽占32.9%, 一年生草本占7.1%。欧晓昆和金振洲(1996)对金沙江中下游河谷灌丛植被的研究结果表明, 在1,004种植物中, 高位芽占39.6%, 地上芽占29.4%, 地面芽占9%, 地下芽占7.3%, 一年生草本占22.8%; 金振洲(1999)对元江干热河谷半萨王纳植被的300种植物的研究结果表明, 高位芽占36.0%, 地上芽占12.0%, 地面芽占26.7%, 地下芽占2.7%, 一年生植物占22.6%。庄翠珍等(2011)对怒江中游西藏境内的干旱河谷荒漠植被的85种植物的研究结果表明, 高位芽占41.2%, 地上芽占8.2%, 地面芽占40%, 一年生植物占10.6%。5个区域植物生活型聚类分析结果表明(图4), 本研究区干旱河谷植被的生活型谱与阿拉善及怒江中游的荒漠植被更接近, 即高位芽和地面芽是主要的生

活型,这是荒漠植被生活型谱的重要特征(何明珠等,2010)。

本研究区域干旱、少雨、气温高,有较长旱季,蒸发量极大;生境坡度大、石砾多、土壤基质为典型的干燥剥蚀岩漠类型,缺乏土壤、保水困难,更加剧了气候的干旱效应。植被盖度很低,研究区的干旱河谷植被存在于河谷底部垂直范围500–800 m的区域。所调查的93个样方的群落盖度仅3–15%。在河谷底部相对湿润的沟箐处植被盖度可达到30%左右,但是这样的沟箐生境在研究区只占极少数,大面积生境极为干燥,形成广泛的干旱、稀疏、低矮的旱生植被(附录3),植株矮化、叶片小型化、植物毛被发达、植株多具刺、部分植物有吸湿反应特征(张荣祖,1992)。

植被外貌及生活型谱与我国西北地区的灌木型温带荒漠植被较接近,即均为由超旱生、中温、叶退化或特化的落叶半灌木、灌木组成的稀疏植被(吴征镒,1980;何明珠等,2010);与怒江中游西藏境内的干旱河谷荒漠植被也较一致(庄翠珍等,2011):植被稀疏矮小,盖度极低,地表大面积裸露,整体外貌呈灰绿色。

本文所研究的植被具有非地带性、局部性以及变化性的特点。该区域植物种类组成、群落结构与外貌以及生态条件等方面均与滇西北反映大气候的地带性植被类型——寒温性针叶林完全不同,它是在河谷深陷、焚风效应显著的干旱河谷气候条件下形成的特殊植被类型。此类特殊植被仅存在于河谷底部垂直高程500–800 m的区域。随两岸山地海拔上升,生境逐渐湿润,其植被逐渐被盖度更大的鼠李(*Rhamnus davurica*)灌丛、高山松(*Pinus densata*)林、云杉(*Picea asperata*)和冷杉(*Abies fabri*)林等类型所取代。

本研究在金沙江上游的奔子栏到羊拉河段做了干旱河谷的植被调查,调查资料是对前人的研究进行的补充。根据金沙江上游干旱河谷的气候和环境特点、植被特征等方面的分析,并结合《中国植被》对荒漠的划分,金沙江上游干旱河谷的植被类型可能是滇西北地区特定生境下产生的非地带性的干旱河谷型荒漠植被,有待进一步研究。

参考文献

He MZ, Zhang ZS, Li XJ, Jia RL, Zhang JG, Zheng JG (2010)

- Environmental effects on distribution and composition of desert vegetations in Alxa Plateau. I. Environmental effects on the distribution patterns of vegetation in Alxa Plateau. *Journal of Desert Research*, 30, 46–56. (in Chinese with English abstract) [何明珠, 张志山, 李小军, 贾荣亮, 张景光, 郑敬刚 (2010) 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释. I. 典型荒漠植被分布格局的环境解释. *中国沙漠*, 30, 46–56.]
- Huang Y, Li ZS (2006) Rainfall change in logitudinal valley areas of northwestern Yunnan. *Journal of China Hydrology*, 26(6), 68–70. (in Chinese) [黄英, 李自顺 (2006) 低纬地区的“干谷”: 滇西北纵向岭谷区雨量之变化分析. *水文*, 26(6), 68–70.]
- Huang YH (2013) Analysis on the characteristics and causes of drought in Derong. *China Science & Technology*, (17), 224. (in Chinese with English abstract) [黄云辉 (2013) 得荣干旱特点及成因浅析. *中国科技纵横*, (17), 224.]
- Jin ZZ, Ou XK, Zhou Y (1987) The general situation of natural vegetation in dry-hot river valley of Yuanmou, Yunnan Province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 11, 308–317. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆, 周跃 (1987) 云南元谋干热河谷植被概况. *植物生态学与地植物学学报*, 11, 308–317.]
- Jin ZZ, Ou XK, Ou PD, Chen J (1994) A preliminary study on the floristic characteristics of seed plants in the dry-hot river valley of Jinshajiang. *Acta Botanica Yunnanica*, 16, 1–16. (in Chinese with English abstract) [金振洲, 欧晓昆, 区普定, 陈洁 (1994) 金沙江干热河谷种子植物区系特征的初探. *云南植物研究*, 16, 1–16.]
- Jin ZZ (1999) A phytosociological study on the semi-savanna vegetation in the dry-hot valleys of Yuanjiang River, Yunnan. *Guihaia*, 19, 289–302. (in Chinese with English abstract) [金振洲 (1999) 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究. *广西植物*, 19, 289–302.]
- Jin ZZ, Ou XK (2000) Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang, Lancangjiang Vegetation of Dry-Hot Valley. Yunnan University Press, Yunnan Science & Technology Press, Kunming. (in Chinese) [金振洲, 欧晓昆 (2000) 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被. 云南大学出版社, 云南科技出版社, 昆明.]
- Luo YH, Zhou DY, Zhu RH, He Y (2008) Primary study on environment of geology and bionomics in the area of world natural inheritance: the three rivers juxtaposition. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 19(2), 94–97. (in Chinese with English abstract) [骆银辉, 周道银, 朱荣华, 和勇 (2008) 世界自然遗产: “三江”并流区地质生态环境特征及其成因初探. *地质灾害与环境保护*, 19(2), 94–97.]
- Ou XK, Jin ZZ (1996) A preliminary study on the flora and ecological diversity in Jinsha River dry-hot valley. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 14, 318–322. (in Chinese with English abstract) [欧晓昆, 金振洲 (1996) 金沙江干热河谷植物区系和生态多样性的初步研究. *武汉植物学*

- 研究, 14, 318–322.]
- Qu ZX, Wu YS, Wang HX, Jiang HQ, Tang TG (1983) *Plant Ecology*, 2nd edn. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [曲仲湘, 吴玉树, 王焕校, 姜汉桥, 唐廷贵 (1983) 植物生态学(第二版). 高等教育出版社, 北京.]
- Sichuan Vegetation Group (1980) *Sichuan Vegetation*. Sichuan People's Publishing House, Chengdu. (in Chinese) [四川植被协作组 (1980) 四川植被. 四川人民出版社, 成都.]
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Wu ZY, Zhu YC, Jiang HQ (1987) *Yunnan Vegetation*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒, 朱彦丞, 江汉桥 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Zhang JT (2004) *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2004) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang RZ (1992) *Scientific Investigation Series in Hengduan Mountains of Tibetan Plateau: Dry Valleys in the Hengduan Mountains*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1992) 青藏高原横断山区科学考察丛书: 横断山区干旱河谷. 科学出版社, 北京.]
- Zhuang CZ, Du F, Liu N, Zhang H, Chen Y, Du XL (2011) Vegetative characteristics in the dry valley of the middle reaches of Nujiang River in Tibet, China. *Plant Diversity and Resources*, 33, 433–442. (in Chinese with English abstract) [庄翠珍, 杜凡, 刘宁, 张辉, 陈勇, 杜小浪 (2011) 怒江中游西藏境内干旱河谷荒漠植被特征. 植物分类与资源学报, 33, 433–442.]

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 金沙江上游干旱河谷植物物种统计表

Appendix 1 Plant species checklist in dry valleys of the upstream of Jinsha River

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015238-1.pdf>

附录2 金沙江上游干旱河谷5个群系植物物种组成

Appendix 2 Species composition of 5 plant formations in dry valleys of the upstream of Jinsha River

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015238-2.pdf>

附录3 金沙江上游干旱河谷区部分生境及群系照片

Appendix 3 The photos of habitat and plant formations in dry valleys of the upstream of Jinsha River

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015238-3.pdf>

附录1 金沙江上游干旱河谷植物物种统计表

Appendix 1 Plant species checklist in dry valleys of the upstream of Jinsha River

| 序号 Number | 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样 方数 Number | 频度 Frequency (%) | 生活型 Life form |
|--------------|---------------------|--|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| 1 | 小叶荆 | <i>Vitex microphylla</i> | 灌木 Shrub | 66 | 70.97 | N |
| 2 | 折叶白前 | <i>Cynanchum forrestii</i> var. <i>conduplicatum</i> | 灌木 Shrub | 60 | 64.52 | Ch |
| 3 | 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 Shrub | 62 | 66.67 | Ch |
| 4 | 德钦画眉草 | <i>Eragrostis deqinensis</i> | 草本 Herb | 62 | 66.67 | T |
| 5 | 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 Shrub | 43 | 46.24 | N |
| 6 | 小叶野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 Shrub | 45 | 48.39 | N |
| 7 | 小叶灰毛茛 | <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> | 灌木 Shrub | 46 | 49.46 | N |
| 8 | 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 Shrub | 51 | 54.84 | N |
| 9 | 短穗冠芒草 | <i>Enneapogon brachystachyus</i> | 草本 Herb | 42 | 45.16 | H |
| 10 | 垫状卷柏 | <i>Selaginella pulvinata</i> | 草本 Herb | 49 | 52.69 | H |
| 11 | 粗毛狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> var. <i>hirsutus</i> | 草本 Herb | 48 | 51.61 | K |
| 12 | 架棚 | <i>Ceratostigma minus</i> | 灌木 Shrub | 22 | 23.66 | N |
| 13 | 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 Shrub | 24 | 25.81 | N |
| 14 | 皱叶腺花醉鱼草 | <i>Buddleja agathosma</i> var. <i>glandulifera</i> | 灌木 Shrub | 29 | 31.18 | N |
| 15 | 四川草沙蚕 | <i>Tripogon sichuanicus</i> | 草本 Herb | 20 | 21.51 | H |
| 16 | 白边卷柏 | <i>Selaginella albocincta</i> | 草本 Herb | 20 | 21.51 | H |
| 17 | 芸香草 | <i>Cymbopogon distans</i> | 草本 Herb | 22 | 23.66 | H |
| 18 | 茅叶荩草 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 Herb | 26 | 27.96 | H |
| 19 | 小叶鹅绒藤 | <i>Cynanchum anthonyanum</i> | 灌木 Shrub | 20 | 21.51 | Ch |
| 20 | 怒江蒿 | <i>Artemisia nujianensis</i> | 灌木 Shrub | 36 | 38.71 | Ch |
| 21 | 雪白粉背蕨 | <i>Aleuritopteris niphobola</i> | 草本 Herb | 21 | 22.58 | K |
| 22 | 疏穗小野芥麦 | <i>Fagopyrum leptopodum</i> var. <i>grossii</i> | 草本 Herb | 20 | 21.51 | T |
| 23 | 复芒菊 | <i>Formania mekongensis</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 24 | 小叶栒子 | <i>Cotoneaster nitidus</i> var. <i>parvifolius</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 25 | 川滇野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 26 | 清香木 | <i>Pistacia weinmannifolia</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 27 | 西南蔷薇 | <i>Rosa muirielae</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 28 | 峨眉蔷薇 | <i>Rosa omeiensis</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 29 | 陕西绣线菊 | <i>Spiraea wilsonii</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | N |
| 30 | 尖齿蛇葡萄 | <i>Ampelopsis acutidentata</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 31 | 川康栒子 | <i>Cotoneaster ambiguus</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 32 | 迎春花 | <i>Jasminum nudiflorum</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 33 | 单刺仙人掌 | <i>Opuntia monacanta</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 34 | 沙针 | <i>Osyris wightiana</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 35 | 少花豆腐柴 | <i>Premna oligantha</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 36 | 淡黄鼠李 | <i>Rhamnus flavescens</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 37 | 凹叶雀梅藤 | <i>Sageretia horrida</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | N |
| 38 | 云南土沉香 | <i>Excoecaria acerifolia</i> | 灌木 Shrub | 3 | 3.23 | N |
| 39 | 错枝榄仁 | <i>Terminalia intricata</i> | 灌木 Shrub | 3 | 3.23 | N |
| 40 | 对节刺 | <i>Sageretia pycnophylla</i> | 灌木 Shrub | 4 | 4.30 | N |
| 41 | 革叶茺花 | <i>Wikstroemia scytophylla</i> | 灌木 Shrub | 4 | 4.30 | N |
| 42 | 华西小石积 | <i>Osteomeles schwerinae</i> | 灌木 Shrub | 12 | 12.90 | N |
| 43 | 刺铁线莲 | <i>Clematis delavayi</i> var. <i>spinescens</i> | 灌木 Shrub | 14 | 15.05 | N |
| 44 | 小叶杭子梢 | <i>Campylotropis wilsonii</i> | 灌木 Shrub | 16 | 17.20 | N |
| 45 | 雅致山蚂蝗 | <i>Desmodium elegans</i> | 灌木 Shrub | 17 | 18.28 | N |
| 46 | 竹叶柴胡 | <i>Bupleurum marginatum</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 47 | 细柄草 | <i>Capillipedium parviflorum</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 48 | 菊科一种 | Compositae sp. | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 49 | 中华野葵 | <i>Malva verticillata</i> var. <i>chinensis</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 50 | 二歧马先蒿 | <i>Pedicularis dichotoma</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 51 | 二叶舌唇兰 | <i>Platanthera chlorantha</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |

| 序号 Number | 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样 方数 Number | 频度 Frequency (%) | 生活型 Life form |
|--------------|---------------------|---|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| 52 | 巴塘报春 | <i>Primula bathangensis</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 53 | 戟叶酸模 | <i>Rumex hastatus</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 54 | 长萼石莲 | <i>Sinocrassula ambigua</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 55 | 蒺藜 | <i>Tribulus terrester</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | H |
| 56 | 中华粘腺果 | <i>Commicarpus chinensis</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | H |
| 57 | 环根芹 | <i>Cyclorhiza waltonii</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | H |
| 59 | 云南百部 | <i>Stemona mairei</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | H |
| 60 | 多花亚菊 | <i>Ajania myriantha</i> | 灌木 Shrub | 3 | 3.23 | H |
| 61 | 马尔康糙果芹 | <i>Trachyspermum triradiatum</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | H |
| 62 | 康定翠雀花 | <i>Delphinium tatsienense</i> | 草本 Herb | 4 | 4.30 | H |
| 63 | 矮龙葵 | <i>Solanum nigrum</i> var. <i>humile</i> | 草本 Herb | 4 | 4.30 | H |
| 64 | 西南莨菪 | <i>Themedra hookeri</i> | 草本 Herb | 4 | 4.30 | H |
| 65 | 马唐属一种 | <i>Digitaria</i> sp. | 草本 Herb | 5 | 5.38 | H |
| 66 | 纺锤根蝇子草 | <i>Silene napuligera</i> | 草本 Herb | 7 | 7.53 | H |
| 67 | 白草 | <i>Pennisetum flaccidum</i> | 草本 Herb | 8 | 8.60 | H |
| 68 | 岷江景天 | <i>Sedum balfouri</i> | 草本 Herb | 8 | 8.60 | H |
| 69 | 黄细心 | <i>Boerhavia diffusa</i> | 草本 Herb | 9 | 9.68 | H |
| 70 | 扭黄茅 | <i>Heteropogon contortus</i> | 草本 Herb | 9 | 9.68 | H |
| 71 | 禾本科一种 | Poaceae sp. | 草本 Herb | 9 | 9.68 | H |
| 72 | 石胆草 | <i>Corallodiscus flabellatus</i> | 草本 Herb | 10 | 10.75 | H |
| 73 | 多枝滇紫草 | <i>Onosma multiramosum</i> | 草本 Herb | 11 | 11.83 | H |
| 74 | 石莲 | <i>Sinocrassula indica</i> | 草本 Herb | 12 | 12.90 | H |
| 75 | 细瘦卷柏 | <i>Selaginella vardei</i> | 草本 Herb | 15 | 16.13 | H |
| 76 | 横断山铁马鞭 | <i>Lespedeza fasciculiflora</i> var. <i>hengduanshanensis</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | Ch |
| 77 | 两头毛 | <i>Incarvillea arguta</i> | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | Ch |
| 78 | 胡枝子一种 | <i>Lespedeza</i> sp. | 灌木 Shrub | 1 | 1.08 | Ch |
| 79 | 腺毛唐松草 | <i>Thalictrum foetidum</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | Ch |
| 80 | 云南蒿 | <i>Artemisia yunnanensis</i> | 灌木 Shrub | 2 | 2.15 | Ch |
| 81 | 云南栉叶蒿 | <i>Neopallasia yunnanensis</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | Ch |
| 82 | 缺刻千里光 | <i>Senecio scandens</i> var. <i>incisus</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | Ch |
| 83 | 头花香薷 | <i>Elsholtzia capituligera</i> | 灌木 Shrub | 5 | 5.38 | Ch |
| 84 | 灰苞蒿 | <i>Artemisia roxburghiana</i> | 灌木 Shrub | 6 | 6.45 | Ch |
| 85 | 黄花蒿 | <i>Artemisia annua</i> | 灌木 Shrub | 13 | 13.98 | Ch |
| 86 | 德钦景天 | <i>Sedum wangii</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | K |
| 87 | 蜈蚣蕨 | <i>Pteris vittata</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | K |
| 88 | 西南风铃草 | <i>Campanula pallida</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | K |
| 89 | 三角金毛裸蕨 | <i>Paragymnopteris sargentii</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | K |
| 90 | 卷叶黄精 | <i>Polygonatum cirrhifolium</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | K |
| 91 | 纤细五爪金龙 | <i>Ipomoea cairca</i> var. <i>gracillima</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | K |
| 92 | 菟丝子 | <i>Cuscuta chinensis</i> | 草本 Herb | 4 | 4.30 | K |
| 93 | 多刺天门冬 | <i>Asparagus myriacanthus</i> | 灌木 Shrub | 5 | 5.38 | K |
| 94 | 曲序南星 | <i>Arisaema tortuosum</i> | 草本 Herb | 8 | 8.60 | K |
| 95 | 真籽韭 | <i>Allium eusperma</i> | 草本 Herb | 9 | 9.68 | K |
| 96 | 独尾草 | <i>Eremurus chinensis</i> | 草本 Herb | 14 | 15.05 | K |
| 97 | 狗尾草 | <i>Setaria viridis</i> | 草本 Herb | 9 | 9.68 | T |
| 98 | 千针苋 | <i>Acroglchin persicarioides</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 99 | 刺花莲子草 | <i>Alternanthera pungens</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 100 | 白花鬼针草 | <i>Bidens pilosa</i> var. <i>radiata</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 101 | 小白酒草 | <i>Conyza canadensis</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 102 | 酢浆草 | <i>Oxalis corniculata</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 103 | 猪毛菜 | <i>Salsola collina</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 104 | 川西獐牙菜 | <i>Swertia mussotii</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |
| 105 | 虱子草 | <i>Tragus berteronianus</i> | 草本 Herb | 1 | 1.08 | T |

| 序号 Number | 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样 方数 Number | 频度 Frequency (%) | 生活型 Life form |
|--------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| 106 | 细裂叶松蒿 | <i>Phtheirospermum tenuisectum</i> | 草本 Herb | 2 | 2.15 | T |
| 107 | 虎尾草 | <i>Chloris virgata</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | T |
| 108 | 腺梗豨莠 | <i>Siegesbeckia pubescens</i> | 草本 Herb | 3 | 3.23 | T |
| 109 | 杂配轴藜 | <i>Axyris hybrida</i> | 草本 Herb | 9 | 9.68 | T |
| 110 | 藜 | <i>Chenopodium album</i> | 草本 Herb | 12 | 12.90 | T |
| 111 | 直立点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 Herb | 13 | 13.98 | T |

H: 地面芽; N: 矮高位芽; T: 一年生; Ch: 地上芽; K: 地下芽
H, Hemicryptophyte; N, Nanophanerophyte; T, Therophyte; Ch, Chamaephyte; K, Geophyte

附录 2 金沙江上游干旱河谷 5 个群系植物物种组成
Appendix 2 Species composition of 5 plant formations in dry valleys of the upstream of Jinsha River

1 小叶荆+小叶野丁香群系 Form. *Vitex microphylla*+*Leptodermis pilosa* var. *microphylla*

| 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样方 数 Number | 相对盖度 Relative cover | 相对频度 Relative frequency | 相对多度 Relative abundance | 重要值 Important value |
|---------------------|---|--------------------|------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 钝瓣景天 | <i>Sedum obtusipetalum</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0002 | 0.0015 |
| 矮龙葵 | <i>Solanum nigrum</i> var. <i>humile</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0006 | 0.0018 |
| 白花鬼针草 | <i>Bidens pilosa</i> var. <i>radiata</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0003 | 0.0017 |
| 虎尾草 | <i>Chloris virgata</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0008 | 0.0019 |
| 马尔康糙果芹 | <i>Trachyspermum triradiatum</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0003 | 0.0017 |
| 缺刻千里光 | <i>Senecio scandens</i> var. <i>incisus</i> | 草本 | 1 | 0.0007 | 0.0041 | 0.0002 | 0.0017 |
| 多刺天门冬 | <i>Asparagus myriacanthus</i> | 草本 | 2 | 0.0008 | 0.0083 | 0.0008 | 0.0033 |
| 曲序南星 | <i>Arisaema tortuosum</i> | 草本 | 2 | 0.0014 | 0.0083 | 0.0003 | 0.0033 |
| 纤细五爪金龙 | <i>Ipomoea cairca</i> var. <i>gracillima</i> | 草本 | 2 | 0.0014 | 0.0083 | 0.0023 | 0.0040 |
| 云南百部 | <i>Stemona mairei</i> | 草本 | 2 | 0.0014 | 0.0083 | 0.0022 | 0.0040 |
| 云南栉叶蒿 | <i>Neopallasia yunnanensis</i> | 草本 | 2 | 0.0014 | 0.0083 | 0.0012 | 0.0036 |
| 纺锤根蝇子草 | <i>Silene napuligera</i> | 草本 | 3 | 0.0021 | 0.0124 | 0.0026 | 0.0057 |
| 真籽韭 | <i>Allium eusperma</i> | 草本 | 3 | 0.0021 | 0.0124 | 0.0028 | 0.0058 |
| 黄细心 | <i>Boerhavia diffusa</i> | 草本 | 5 | 0.0022 | 0.0207 | 0.0012 | 0.0081 |
| 直茎点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 | 5 | 0.0022 | 0.0207 | 0.0059 | 0.0096 |
| 中华粘腺果 | <i>Commicarpus chinensis</i> | 草本 | 1 | 0.0035 | 0.0041 | 0.0012 | 0.0029 |
| 独尾草 | <i>Eremurus chinensis</i> | 草本 | 5 | 0.0035 | 0.0207 | 0.0056 | 0.0100 |
| 丛毛羊胡子草 | <i>Eriophorum comosum</i> | 草本 | 4 | 0.0042 | 0.0166 | 0.0056 | 0.0088 |
| 藜 | <i>Chenopodium album</i> | 草本 | 3 | 0.0042 | 0.0124 | 0.0054 | 0.0073 |
| 马唐属一种 | <i>Digitaria</i> sp. | 草本 | 2 | 0.0042 | 0.0083 | 0.0025 | 0.0050 |
| 禾本科一种 | Poaceae sp. | 草本 | 3 | 0.0042 | 0.0124 | 0.0053 | 0.0073 |
| 小野荞麦 | <i>Fagopyrum leptopodum</i> | 草本 | 8 | 0.0046 | 0.0332 | 0.0084 | 0.0154 |
| 多枝滇紫草 | <i>Onosma multiramum</i> | 草本 | 7 | 0.0049 | 0.0290 | 0.0054 | 0.0131 |
| 岷江景天 | <i>Sedum balfouri</i> | 草本 | 4 | 0.0055 | 0.0166 | 0.0071 | 0.0098 |
| 杂配轴藜 | <i>Axyris hybrida</i> | 草本 | 3 | 0.0055 | 0.0124 | 0.0048 | 0.0076 |
| 石胆草 | <i>Corallodiscus flabellatus</i> | 草本 | 6 | 0.0076 | 0.0249 | 0.0082 | 0.0136 |
| 石莲 | <i>Sinocrassula indica</i> | 草本 | 8 | 0.0077 | 0.0332 | 0.0132 | 0.0180 |
| 白草 | <i>Pennisetum flaccidum</i> | 草本 | 4 | 0.0091 | 0.0166 | 0.0053 | 0.0103 |
| 扭黄茅 | <i>Heteropogon contortus</i> | 草本 | 6 | 0.0104 | 0.0249 | 0.0127 | 0.0160 |
| 雪白粉背蕨 | <i>Aleuritopteris niphobola</i> | 草本 | 11 | 0.0104 | 0.0456 | 0.0174 | 0.0245 |
| 粗毛狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> var. <i>hirsutus</i> | 草本 | 16 | 0.0177 | 0.0664 | 0.0313 | 0.0385 |
| 中华草沙蚕 | <i>Tripogon chinensis</i> | 草本 | 10 | 0.0194 | 0.0415 | 0.0620 | 0.0410 |
| 茅叶荩草 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 | 13 | 0.0361 | 0.0539 | 0.0254 | 0.0385 |
| 短穗冠芒草 | <i>Enneapogon brachystachyus</i> | 草本 | 11 | 0.0396 | 0.0456 | 0.0398 | 0.0417 |
| 德钦画眉草 | <i>Eragrostis deqinensis</i> | 草本 | 22 | 0.0445 | 0.0913 | 0.0936 | 0.0765 |
| 白边卷柏 | <i>Selaginella albocincta</i> | 草本 | 14 | 0.0560 | 0.0581 | 0.1178 | 0.0773 |
| 细瘦卷柏 | <i>Selaginella vardei</i> | 草本 | 7 | 0.1107 | 0.0290 | 0.2852 | 0.1416 |
| 芸香草 | <i>Cymbopogon distans</i> | 草本 | 13 | 0.1135 | 0.0539 | 0.0578 | 0.0751 |
| 狗尾草 | <i>Setaria viridis</i> | 草本 | 3 | 0.1335 | 0.0124 | 0.0313 | 0.0591 |
| 垫状卷柏 | <i>Selaginella pulvinata</i> | 草本 | 25 | 0.3211 | 0.1037 | 0.1260 | 0.1836 |
| 淡黄鼠李 | <i>Rhamnus flavescons</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0008 | 0.0015 |
| 对节刺 | <i>Sagerretia pycnophylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0004 | 0.0013 |

| | | | | | | | |
|---------|--|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 革叶菟花 | <i>Wikstroemia scytophylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0004 | 0.0013 |
| 云南土沉香 | <i>Excoecaria acerifolia</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0004 | 0.0013 |
| 沙针 | <i>Osyris wightiana</i> | 灌木 | 1 | 0.0004 | 0.0034 | 0.0008 | 0.0015 |
| 清香木 | <i>Pistacia weinmannifolia</i> | 灌木 | 1 | 0.0010 | 0.0034 | 0.0012 | 0.0019 |
| 凹叶雀梅藤 | <i>Sageretia horrida</i> | 灌木 | 2 | 0.0014 | 0.0069 | 0.0020 | 0.0034 |
| 云南蒿 | <i>Artemisia yunnanensis</i> | 灌木 | 2 | 0.0014 | 0.0069 | 0.0080 | 0.0054 |
| 黄花蒿 | <i>Artemisia annua</i> | 灌木 | 5 | 0.0020 | 0.0172 | 0.0068 | 0.0087 |
| 头花香薷 | <i>Elsholtzia capituligera</i> | 灌木 | 2 | 0.0022 | 0.0069 | 0.0048 | 0.0046 |
| 小叶鹅绒藤 | <i>Cynanchum anthonyanum</i> | 灌木 | 11 | 0.0024 | 0.0379 | 0.0096 | 0.0167 |
| 多花亚菊 | <i>Ajania myriantha</i> | 灌木 | 2 | 0.0030 | 0.0069 | 0.0056 | 0.0052 |
| 迎春花 | <i>Jasminum nudiflorum</i> | 灌木 | 2 | 0.0042 | 0.0069 | 0.0064 | 0.0058 |
| 皱叶腺花醉鱼草 | <i>Buddleja agathosma</i> var. <i>glandulifera</i> | 灌木 | 8 | 0.0046 | 0.0276 | 0.0136 | 0.0153 |
| 小叶杭子梢 | <i>Campylotropis wilsonii</i> | 灌木 | 6 | 0.0050 | 0.0207 | 0.0088 | 0.0115 |
| 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 | 7 | 0.0071 | 0.0241 | 0.0157 | 0.0156 |
| 折叶白前 | <i>Cynanchum forrestii</i> var. <i>conduplicatum</i> | 灌木 | 22 | 0.0097 | 0.0759 | 0.0357 | 0.0404 |
| 西南仙人掌 | <i>Eremurus chinensis</i> | 灌木 | 1 | 0.0119 | 0.0034 | 0.0140 | 0.0098 |
| 华西小石积 | <i>Osteomeles schwerinae</i> | 灌木 | 6 | 0.0163 | 0.0207 | 0.0124 | 0.0165 |
| 尖齿蛇葡萄 | <i>Ampelopsis acutidentata</i> | 灌木 | 2 | 0.0218 | 0.0069 | 0.0036 | 0.0108 |
| 雅致山蚂蝗 | <i>Desmodium elegans</i> | 灌木 | 9 | 0.0270 | 0.0310 | 0.0281 | 0.0287 |
| 两头毛 | <i>Incarvillea arguta</i> | 灌木 | 1 | 0.0297 | 0.0034 | 0.0096 | 0.0143 |
| 刺铁线莲 | <i>Clematis delavayi</i> var. <i>spinescens</i> | 灌木 | 10 | 0.0371 | 0.0345 | 0.0405 | 0.0374 |
| 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 | 23 | 0.0527 | 0.0793 | 0.1168 | 0.0829 |
| 少花豆腐柴 | <i>Premna oligantha</i> | 灌木 | 2 | 0.0535 | 0.0069 | 0.0261 | 0.0288 |
| 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 | 8 | 0.0551 | 0.0276 | 0.0429 | 0.0419 |
| 小叶灰毛莸 | <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> | 灌木 | 24 | 0.0563 | 0.0828 | 0.0911 | 0.0767 |
| 怒江蒿 | <i>Artemisia nujianensis</i> | 灌木 | 21 | 0.0579 | 0.0724 | 0.0811 | 0.0705 |
| 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 22 | 0.0704 | 0.0759 | 0.0742 | 0.0735 |
| 架棚 | <i>Ceratostigma minus</i> | 灌木 | 12 | 0.1292 | 0.0414 | 0.1100 | 0.0935 |
| 小叶野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 37 | 0.1483 | 0.1276 | 0.0891 | 0.1217 |
| 小叶荆 | <i>Vitex microphylla</i> | 灌木 | 37 | 0.1877 | 0.1276 | 0.1392 | 0.1515 |

2 白刺花+小叶荆群系 Form. *Sophora davidii*+*Vitex microphylla*

| 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样方数 Number | 相对盖度 Relative cover | 相对频度 Relative frequency | 相对多度 Relative abundance | 重要值 Important value |
|------------------|--|-----------------|--------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 蜈蚣草 | <i>Pteris vittata</i> | 草本 | 1 | 0.0002 | 0.0057 | 0.0003 | 0.0021 |
| 中华粘腺果 | <i>Commicarpus chinensis</i> | 草本 | 1 | 0.0002 | 0.0057 | 0.0003 | 0.0021 |
| 千针苋 | <i>Acroglchin persicarioides</i> | 草本 | 1 | 0.0010 | 0.0057 | 0.0003 | 0.0023 |
| 戟叶酸模 | <i>Rumex hastatus</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0006 | 0.0028 |
| 刺花莲子草 | <i>Alternanthera pungens</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0009 | 0.0029 |
| 虱子草 | <i>Tragus berteronianus</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0015 | 0.0031 |
| 小白酒草 | <i>Conyza canadensis</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0006 | 0.0028 |
| 纤细五爪金龙 | <i>Ipomoea cairca</i> var. <i>gracillima</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0018 | 0.0032 |
| 酢浆草 | <i>Oxalis corniculata</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0006 | 0.0028 |
| 西南风铃草 | <i>Campanula pallida</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0009 | 0.0029 |
| 石莲 | <i>Sinocrassula indica</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0012 | 0.0030 |
| 钝瓣景天 | <i>Sedum obtusipetalum</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0015 | 0.0031 |

| | | | | | | | |
|---------|--|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 独尾草 | <i>Eremurus chinensis</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0021 | 0.0033 |
| 蒺藜 | <i>Tribulus terrester</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0009 | 0.0029 |
| 菊科一种 | Compositae sp. | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0006 | 0.0028 |
| 石胆草 | <i>Corallodiscus flabellatus</i> | 草本 | 1 | 0.0020 | 0.0057 | 0.0018 | 0.0032 |
| 矮龙葵 | <i>Solanum nigrum</i> var. <i>humile</i> | 草本 | 2 | 0.0021 | 0.0115 | 0.0015 | 0.0051 |
| 虎尾草 | <i>Chloris virgata</i> | 草本 | 2 | 0.0039 | 0.0115 | 0.0027 | 0.0060 |
| 多枝滇紫草 | <i>Onosma multiramsum</i> | 草本 | 2 | 0.0039 | 0.0115 | 0.0027 | 0.0060 |
| 黄细心 | <i>Boerhavia diffusa</i> | 草本 | 1 | 0.0039 | 0.0057 | 0.0012 | 0.0036 |
| 菟丝子 | <i>Cuscuta chinensis</i> | 草本 | 4 | 0.0043 | 0.0230 | 0.0018 | 0.0097 |
| 腺梗豨莶 | <i>Siegesbeckia pubescens</i> | 草本 | 3 | 0.0059 | 0.0172 | 0.0030 | 0.0087 |
| 马唐属一种 | <i>Digitaria</i> sp. | 草本 | 3 | 0.0059 | 0.0172 | 0.0037 | 0.0089 |
| 直茎点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 | 2 | 0.0059 | 0.0115 | 0.0091 | 0.0088 |
| 长萼石莲 | <i>Sinocrassula ambigua</i> | 草本 | 1 | 0.0059 | 0.0057 | 0.0061 | 0.0059 |
| 茅叶荩草 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 | 3 | 0.0078 | 0.0172 | 0.0049 | 0.0100 |
| 曲序南星 | <i>Arisaema tortuosum</i> | 草本 | 6 | 0.0100 | 0.0345 | 0.0030 | 0.0158 |
| 雪白粉背蕨 | <i>Aleuritopteris niphobola</i> | 草本 | 5 | 0.0119 | 0.0287 | 0.0107 | 0.0171 |
| 中华草沙蚕 | <i>Tripogon chinensis</i> | 草本 | 3 | 0.0137 | 0.0172 | 0.0265 | 0.0191 |
| 藜 | <i>Chenopodium album</i> | 草本 | 8 | 0.0176 | 0.0460 | 0.0186 | 0.0274 |
| 杂配轴藜 | <i>Axyris hybrida</i> | 草本 | 6 | 0.0186 | 0.0345 | 0.0155 | 0.0229 |
| 狗尾草 | <i>Setaria viridis</i> | 草本 | 5 | 0.0195 | 0.0287 | 0.0241 | 0.0241 |
| 缺刻千里光 | <i>Senecio scandens</i> var. <i>incisus</i> | 草本 | 1 | 0.0195 | 0.0057 | 0.0018 | 0.0090 |
| 小野荞麦 | <i>Fagopyrum leptopodum</i> | 草本 | 10 | 0.0256 | 0.0575 | 0.0311 | 0.0381 |
| 禾本科一种 | Poaceae sp. | 草本 | 4 | 0.0488 | 0.0230 | 0.0271 | 0.0330 |
| 扭黄茅 | <i>Heteropogon contortus</i> | 草本 | 2 | 0.0508 | 0.0115 | 0.0393 | 0.0339 |
| 粗毛狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> var. <i>hirsutus</i> | 草本 | 20 | 0.0557 | 0.1149 | 0.0732 | 0.0813 |
| 芸香草 | <i>Cymbopogon distans</i> | 草本 | 4 | 0.0879 | 0.0230 | 0.0274 | 0.0461 |
| 细瘦卷柏 | <i>Selaginella vardei</i> | 草本 | 3 | 0.0879 | 0.0172 | 0.2378 | 0.1143 |
| 垫状卷柏 | <i>Selaginella pulvinata</i> | 草本 | 10 | 0.1191 | 0.0575 | 0.0549 | 0.0772 |
| 德钦画眉草 | <i>Eragrostis deqinensis</i> | 草本 | 26 | 0.1240 | 0.1494 | 0.1988 | 0.1574 |
| 短穗冠芒草 | <i>Enneapogon brachystachyus</i> | 草本 | 22 | 0.2133 | 0.1264 | 0.1570 | 0.1656 |
| 灰苞蒿 | <i>Artemisia roxburghiana</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0046 | 0.0005 | 0.0018 |
| 头花香薷 | <i>Elsholtzia capituligera</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0046 | 0.0009 | 0.0019 |
| 胡枝子一种 | <i>Lespedeza</i> sp. | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0046 | 0.0009 | 0.0019 |
| 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 | 1 | 0.0002 | 0.0046 | 0.0005 | 0.0018 |
| 小叶杭子梢 | <i>Campylotropis wilsonii</i> | 灌木 | 2 | 0.0009 | 0.0092 | 0.0064 | 0.0055 |
| 小叶鹅绒藤 | <i>Cynanchum anthonyanum</i> | 灌木 | 3 | 0.0009 | 0.0138 | 0.0037 | 0.0061 |
| 云南土沉香 | <i>Excoecaria acerifolia</i> | 灌木 | 1 | 0.0009 | 0.0046 | 0.0046 | 0.0034 |
| 黄花蒿 | <i>Artemisia annua</i> | 灌木 | 6 | 0.0010 | 0.0276 | 0.0041 | 0.0109 |
| 怒江蒿 | <i>Artemisia nujianensis</i> | 灌木 | 4 | 0.0023 | 0.0184 | 0.0051 | 0.0086 |
| 对节刺 | <i>Sagerretia pycnophylla</i> | 灌木 | 2 | 0.0025 | 0.0092 | 0.0018 | 0.0045 |
| 淡黄鼠李 | <i>Rhamnus flavescens</i> | 灌木 | 1 | 0.0045 | 0.0046 | 0.0009 | 0.0034 |
| 小叶野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 9 | 0.0061 | 0.0415 | 0.0138 | 0.0205 |
| 雅致山蚂蝗 | <i>Desmodium elegans</i> | 灌木 | 6 | 0.0077 | 0.0276 | 0.0235 | 0.0196 |
| 华西小石积 | <i>Osteomeles schwerinae</i> | 灌木 | 4 | 0.0111 | 0.0184 | 0.0078 | 0.0125 |
| 小叶灰毛茛 | <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> | 灌木 | 10 | 0.0143 | 0.0461 | 0.0318 | 0.0307 |
| 皱叶腺花醉鱼草 | <i>Buddleja agathosma</i> var. <i>glandulifera</i> | 灌木 | 12 | 0.0154 | 0.0553 | 0.0221 | 0.0309 |
| 西南蔷薇 | <i>Rosa muiriellae</i> | 灌木 | 1 | 0.0159 | 0.0046 | 0.0097 | 0.0101 |
| 架棚 | <i>Ceratostigma</i> | 灌木 | 2 | 0.0159 | 0.0092 | 0.0184 | 0.0145 |
| 刺铁线莲 | <i>Clematis delavayi</i> var. <i>spinescens</i> | 灌木 | 3 | 0.0170 | 0.0138 | 0.0193 | 0.0167 |

| | | | | | | | |
|--------|--|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 折叶白前 | <i>Cynanchum forrestii</i> var. <i>conduplicatum</i> | 灌木 | 32 | 0.0384 | 0.1475 | 0.1035 | 0.0965 |
| 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 | 22 | 0.0538 | 0.1014 | 0.1017 | 0.0856 |
| 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 25 | 0.2115 | 0.1152 | 0.1675 | 0.1647 |
| 小叶荆 | <i>Vitex microphylla</i> | 灌木 | 34 | 0.2720 | 0.1567 | 0.1947 | 0.2078 |
| 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 | 34 | 0.3070 | 0.1567 | 0.2108 | 0.2248 |

3 灰岩木蓝+胶粘香茶菜群系 Form. *Indigofera calcicola*+*Rabdosia glutinosa*

| 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样方数 Number | 相对盖度 Relative cover | 相对频度 Relative frequency | 相对多度 Relative abundance | 重要值 Important value |
|---------------------|--|--------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 三角金毛裸蕨 | <i>Paragymnopteris sargentii</i> | 草本 | 1 | 0.0001 | 0.0109 | 0.0003 | 0.0038 |
| 猪毛菜 | <i>Salsola collina</i> | 草本 | 1 | 0.0001 | 0.0109 | 0.0003 | 0.0038 |
| 巴塘报春 | <i>Primula bathangensis</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0017 | 0.0045 |
| 钝瓣景天 | <i>Sedum obtusipetalum</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0024 | 0.0048 |
| 藜 | <i>Chenopodium album</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0024 | 0.0048 |
| 马尔康糙果芹 | <i>Trachyspermum triradiatum</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0017 | 0.0045 |
| 岷江景天 | <i>Sedum balfouri</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0020 | 0.0047 |
| 西南风铃草 | <i>Campanula pallida</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0014 | 0.0044 |
| 腺毛唐松草 | <i>Thalictrum foetidum</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0017 | 0.0045 |
| 小野荞麦 | <i>Fagopyrum leptopodum</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0027 | 0.0049 |
| 竹叶柴胡 | <i>Bupleurum marginatum</i> | 草本 | 1 | 0.0011 | 0.0109 | 0.0003 | 0.0041 |
| 环根芹 | <i>Cyclorhiza waltonii</i> | 草本 | 2 | 0.0012 | 0.0217 | 0.0017 | 0.0082 |
| 雪白粉背蕨 | <i>Aleuritopteris niphobola</i> | 草本 | 2 | 0.0012 | 0.0217 | 0.0027 | 0.0085 |
| 角蒿 | <i>Incarvillea sinensis</i> | 草本 | 2 | 0.0021 | 0.0217 | 0.0020 | 0.0086 |
| 纺锤根蝇子草 | <i>Silene napuligera</i> | 草本 | 3 | 0.0022 | 0.0326 | 0.0048 | 0.0132 |
| 康定翠雀花 | <i>Delphinium tatsienense</i> | 草本 | 3 | 0.0022 | 0.0326 | 0.0020 | 0.0123 |
| 石莲 | <i>Sinocrassula indica</i> | 草本 | 2 | 0.0022 | 0.0217 | 0.0037 | 0.0092 |
| 黄细心 | <i>Boerhavia diffusa</i> | 草本 | 2 | 0.0043 | 0.0217 | 0.0031 | 0.0097 |
| 白边卷柏 | <i>Selaginella albocincta</i> | 草本 | 2 | 0.0053 | 0.0217 | 0.0256 | 0.0175 |
| 直茎点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 | 4 | 0.0053 | 0.0435 | 0.0170 | 0.0219 |
| 细裂叶松蒿 | <i>Phtheirospermum tenuisectum</i> | 草本 | 2 | 0.0063 | 0.0217 | 0.0102 | 0.0128 |
| 西南莨菪 | <i>Themeda hookeri</i> | 草本 | 3 | 0.0064 | 0.0326 | 0.0119 | 0.0170 |
| 茅叶荳蔻 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 | 3 | 0.0074 | 0.0326 | 0.0075 | 0.0158 |
| 真籽韭 | <i>Allium eusperma</i> | 草本 | 3 | 0.0074 | 0.0326 | 0.0119 | 0.0173 |
| 粗毛狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> var. <i>hirsutus</i> | 草本 | 8 | 0.0137 | 0.0869 | 0.0358 | 0.0455 |
| 中华草沙蚕 | <i>Tripogon chinensis</i> | 草本 | 3 | 0.0212 | 0.0326 | 0.0613 | 0.0384 |
| 细瘦卷柏 | <i>Selaginella vardei</i> | 草本 | 4 | 0.0316 | 0.0435 | 0.2003 | 0.0918 |
| 禾本科一种 | Poaceae sp. | 草本 | 2 | 0.0496 | 0.0217 | 0.0467 | 0.0393 |
| 白草 | <i>Pennisetum flaccidum</i> | 草本 | 2 | 0.0580 | 0.0217 | 0.0239 | 0.0345 |
| 短穗冠芒草 | <i>Enneapogon brachystachyus</i> | 草本 | 9 | 0.1150 | 0.0978 | 0.1574 | 0.1234 |
| 德钦画眉草 | <i>Eragrostis deqinensis</i> | 草本 | 10 | 0.1160 | 0.1086 | 0.1823 | 0.1357 |
| 石胆草 | <i>Corallodiscus flabellatus</i> | 草本 | 2 | 0.2111 | 0.0217 | 0.0375 | 0.0901 |
| 垫状卷柏 | <i>Selaginella pulvinata</i> | 草本 | 8 | 0.3206 | 0.0869 | 0.1336 | 0.1804 |
| 对节刺 | <i>Sagerretia pycnophylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0006 | 0.0099 | 0.0021 | 0.0042 |
| 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0006 | 0.0099 | 0.0064 | 0.0056 |
| 灰苞蒿 | <i>Artemisia roxburghiana</i> | 灌木 | 2 | 0.0007 | 0.0198 | 0.0064 | 0.0090 |
| 黄花蒿 | <i>Artemisia annua</i> | 灌木 | 3 | 0.0019 | 0.0297 | 0.0128 | 0.0148 |
| 小叶鹅绒藤 | <i>Cynanchum anthonyanum</i> | 灌木 | 4 | 0.0020 | 0.0396 | 0.0192 | 0.0203 |
| 折叶白前 | <i>Cynanchum forrestii</i> var. <i>conduplicatum</i> | 灌木 | 5 | 0.0026 | 0.0495 | 0.0192 | 0.0238 |

| | | | | | | | |
|---------|--|----|----|--------|--------|--------|--------|
| 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 | 6 | 0.0044 | 0.0594 | 0.0235 | 0.0291 |
| 雅致山蚂蝗 | <i>Desmodium elegans</i> | 灌木 | 2 | 0.0044 | 0.0198 | 0.0192 | 0.0145 |
| 怒江蒿 | <i>Artemisia nujianensis</i> | 灌木 | 6 | 0.0057 | 0.0594 | 0.0684 | 0.0445 |
| 云南土沉香 | <i>Excoecaria acerifolia</i> | 灌木 | 1 | 0.0064 | 0.0099 | 0.0043 | 0.0068 |
| 小叶杭子梢 | <i>Campylotropis wilsonii</i> | 灌木 | 3 | 0.0083 | 0.0297 | 0.0385 | 0.0255 |
| 小叶野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 7 | 0.0134 | 0.0693 | 0.0449 | 0.0425 |
| 小叶灰毛菰 | <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> | 灌木 | 8 | 0.0337 | 0.0792 | 0.1303 | 0.0811 |
| 架棚 | <i>Ceratostigma minus</i> | 灌木 | 7 | 0.0457 | 0.0693 | 0.2393 | 0.1181 |
| 多花亚菊 | <i>Ajania myriantha</i> | 灌木 | 1 | 0.0635 | 0.0099 | 0.2778 | 0.1171 |
| 头花香薷 | <i>Elsholtzia capituligera</i> | 灌木 | 2 | 0.0794 | 0.0198 | 0.1816 | 0.0936 |
| 小叶荆 | <i>Vitex microphylla</i> | 灌木 | 8 | 0.0851 | 0.0792 | 0.1111 | 0.0918 |
| 皱叶腺花醉鱼草 | <i>Buddleja agathosma</i> var. <i>glandulifera</i> | 灌木 | 8 | 0.1601 | 0.0792 | 0.1453 | 0.1282 |
| 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 | 13 | 0.2236 | 0.1287 | 0.8226 | 0.3916 |
| 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 | 13 | 0.2579 | 0.1287 | 0.4444 | 0.2770 |

4 小叶荆+小叶杭子梢群系 Form. *Vitex microphylla* +*Campylotropis wilsonii*

| 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样方数 Number | 相对盖度 Relative cover | 相对频度 Relative frequency | 相对多度 Relative abundance | 重要值 Important value |
|---------------------|--|--------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 岷江景天 | <i>Sedum balfouri</i> | 草本 | 1 | 0.0002 | 0.0238 | 0.0009 | 0.0083 |
| 缺刻千里光 | <i>Senecio scandens</i> var. <i>incisus</i> | 草本 | 1 | 0.0002 | 0.0238 | 0.0009 | 0.0083 |
| 矮龙葵 | <i>Solanum nigrum</i> var. <i>humile</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0037 | 0.0099 |
| 川西獐牙菜 | <i>Swertia mussotii</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0028 | 0.0096 |
| 多枝滇紫草 | <i>Onosma multiramosum</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0046 | 0.0102 |
| 黄细心 | <i>Boerhavia diffusa</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0019 | 0.0093 |
| 卷叶黄精 | <i>Polygonatum cirrhifolium</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0028 | 0.0096 |
| 马尔康糙果芹 | <i>Trachyspermum triradiatum</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0028 | 0.0096 |
| 二叶舌唇兰 | <i>Platanthera chlorantha</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0009 | 0.0090 |
| 石莲 | <i>Sinocrassula indica</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0046 | 0.0102 |
| 小野荞麦 | <i>Fagopyrum leptopodum</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0074 | 0.0111 |
| 雪白粉背蕨 | <i>Aleuritopteris niphobola</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0056 | 0.0105 |
| 真籽韭 | <i>Allium eusperma</i> | 草本 | 1 | 0.0022 | 0.0238 | 0.0056 | 0.0105 |
| 丛毛羊胡子草 | <i>Eriophorum comosum</i> | 草本 | 2 | 0.0044 | 0.0476 | 0.0056 | 0.0192 |
| 多刺天门冬 | <i>Asparagus myriacanthus</i> | 草本 | 2 | 0.0044 | 0.0476 | 0.0028 | 0.0183 |
| 直茎点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 | 1 | 0.0065 | 0.0238 | 0.0260 | 0.0188 |
| 白边卷柏 | <i>Selaginella albocincta</i> | 草本 | 2 | 0.0131 | 0.0476 | 0.0696 | 0.0434 |
| 中华草沙蚕 | <i>Tripogon chinensis</i> | 草本 | 2 | 0.0131 | 0.0476 | 0.0678 | 0.0428 |
| 扭黄茅 | <i>Heteropogon contortus</i> | 草本 | 1 | 0.0218 | 0.0238 | 0.0483 | 0.0313 |
| 石胆草 | <i>Corallodiscus flabellatus</i> | 草本 | 1 | 0.0218 | 0.0238 | 0.0260 | 0.0239 |
| 二歧马先蒿 | <i>Pedicularis dichotoma</i> | 草本 | 1 | 0.0327 | 0.0238 | 0.0139 | 0.0235 |
| 狗尾草 | <i>Setaria viridis</i> | 草本 | 1 | 0.0327 | 0.0238 | 0.0650 | 0.0405 |
| 西南菅草 | <i>Themeda hookeri</i> | 草本 | 1 | 0.0435 | 0.0238 | 0.0743 | 0.0472 |
| 独尾草 | <i>Eremurus chinensis</i> | 草本 | 2 | 0.0566 | 0.0476 | 0.0576 | 0.0539 |
| 芸香草 | <i>Cymbopogon distans</i> | 草本 | 4 | 0.1219 | 0.0952 | 0.1244 | 0.1139 |
| 茅叶荩草 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 | 5 | 0.1831 | 0.1190 | 0.1532 | 0.1518 |
| 垫状卷柏 | <i>Selaginella pulvinata</i> | 草本 | 4 | 0.4202 | 0.0952 | 0.2210 | 0.2455 |
| 川滇野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>pilosa</i> | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0190 | 0.0203 |

| | | | | | | | |
|--------|---|----|---|--------|--------|--------|--------|
| 刺铁线莲 | <i>Clematis delavayi</i> var. <i>spinescens</i> | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0095 | 0.0171 |
| 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0190 | 0.0203 |
| 菊科一种 | Compositae sp. | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0095 | 0.0171 |
| 沙针 | <i>Osyris wightiana</i> | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0190 | 0.0203 |
| 陕西绣线菊 | <i>Spiraea wilsonii</i> | 灌木 | 1 | 0.0048 | 0.0370 | 0.0095 | 0.0171 |
| 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0096 | 0.0370 | 0.0286 | 0.0251 |
| 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 | 1 | 0.0143 | 0.0370 | 0.0476 | 0.0330 |
| 川康栲子 | <i>Cotoneaster ambiguus</i> | 灌木 | 2 | 0.0148 | 0.0741 | 0.0381 | 0.0423 |
| 错枝榄仁 | <i>Terminalia intricata</i> | 灌木 | 2 | 0.0335 | 0.0741 | 0.0381 | 0.0485 |
| 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 | 2 | 0.0717 | 0.0741 | 0.1429 | 0.0962 |
| 华西小石积 | <i>Osteomeles schwerinae</i> | 灌木 | 1 | 0.0717 | 0.0370 | 0.0857 | 0.0648 |
| 革叶薹花 | <i>Wikstroemia scytophylla</i> | 灌木 | 2 | 0.1196 | 0.0741 | 0.1429 | 0.1122 |
| 小叶杭子梢 | <i>Campylotropis wilsonii</i> | 灌木 | 5 | 0.2343 | 0.1852 | 0.1714 | 0.1970 |
| 小叶荆 | <i>Vitex microphylla</i> | 灌木 | 5 | 0.4017 | 0.1852 | 0.2190 | 0.2687 |

5 小叶灰毛茛+胶粘香茶菜群系 Form. *Caryopteris forrestii* var. *minor*+*Rabdosia glutinosa*

| 中文名 Chinese name | 拉丁名 Latin name | 生长型 Growth form | 出现样方 数 Number | 相对盖度 Relative cover | 相对频度 Relative frequency | 相对多度 Relative abundance | 重要值 Important value |
|---------------------|---|--------------------|---------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 康定翠雀花 | <i>Delphinium tatsienense</i> | 草本 | 1 | 0.0003 | 0.0476 | 0.0010 | 0.0163 |
| 滇韭 | <i>Allium mairei</i> | 草本 | 2 | 0.0057 | 0.0952 | 0.0207 | 0.0405 |
| 卷叶黄精 | <i>Polygonatum cirrhifolium</i> | 草本 | 1 | 0.0057 | 0.0476 | 0.0052 | 0.0195 |
| 直茎点地梅 | <i>Androsace erecta</i> | 草本 | 1 | 0.0057 | 0.0476 | 0.0207 | 0.0247 |
| 岷江景天 | <i>Sedum balfouri</i> | 草本 | 2 | 0.0085 | 0.0952 | 0.0207 | 0.0415 |
| 真籽韭 | <i>Allium eusperma</i> | 草本 | 2 | 0.0199 | 0.0952 | 0.0363 | 0.0505 |
| 独尾草 | <i>Eremurus chinensis</i> | 草本 | 3 | 0.0312 | 0.1429 | 0.0591 | 0.0777 |
| 粗毛狗娃花 | <i>Heteropappus altaicus</i> var. <i>hirsutus</i> | 草本 | 3 | 0.0852 | 0.1429 | 0.0487 | 0.0923 |
| 德钦画眉草 | <i>Eragrostis deqinensis</i> | 草本 | 2 | 0.0568 | 0.0952 | 0.1244 | 0.0921 |
| 白草 | <i>Pennisetum flaccidum</i> | 草本 | 2 | 0.0852 | 0.0952 | 0.0518 | 0.0774 |
| 茅叶荩草 | <i>Arthraxon prionodes</i> | 草本 | 1 | 0.2698 | 0.0476 | 0.2798 | 0.1991 |
| 细柄草 | <i>Capillipedium parviflorum</i> | 草本 | 1 | 0.4260 | 0.0476 | 0.3316 | 0.2684 |
| 白刺花 | <i>Sophora davidii</i> | 灌木 | 1 | 0.0018 | 0.0455 | 0.0067 | 0.0180 |
| 峨眉蔷薇 | <i>Rosa omeiensis</i> | 灌木 | 1 | 0.0018 | 0.0455 | 0.0033 | 0.0169 |
| 小叶野丁香 | <i>Leptodermis pilosa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0018 | 0.0455 | 0.0033 | 0.0169 |
| 怒江蒿 | <i>Artemisia nujianensis</i> | 灌木 | 1 | 0.0037 | 0.0455 | 0.0067 | 0.0186 |
| 小叶栲子 | <i>Cotoneaster microphyllus</i> | 灌木 | 1 | 0.0037 | 0.0455 | 0.0234 | 0.0242 |
| 灰苞蒿 | <i>Artemisia roxburghiana</i> | 灌木 | 3 | 0.0128 | 0.1364 | 0.0268 | 0.0586 |
| 小鞍叶羊蹄甲 | <i>Bauhinia brachycarpa</i> var. <i>microphylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0366 | 0.0455 | 0.0134 | 0.0318 |
| 小叶鹅绒藤 | <i>Cynanchum anthonyanum</i> | 灌木 | 2 | 0.0457 | 0.0909 | 0.0669 | 0.0678 |
| 束花铁马鞭 | <i>Lespedeza fasciculiflora</i> | 灌木 | 1 | 0.0731 | 0.0455 | 0.1003 | 0.0730 |
| 革叶薹花 | <i>Wikstroemia scytophylla</i> | 灌木 | 1 | 0.0731 | 0.0455 | 0.1070 | 0.0752 |
| 灰岩木蓝 | <i>Indigofera calcicola</i> | 灌木 | 3 | 0.0859 | 0.1364 | 0.1538 | 0.1254 |
| 胶粘香茶菜 | <i>Rabdosia glutinosa</i> | 灌木 | 3 | 0.2834 | 0.1364 | 0.1940 | 0.2046 |
| 小叶灰毛茛 | <i>Caryopteris forrestii</i> var. <i>minor</i> | 灌木 | 3 | 0.3766 | 0.1364 | 0.2943 | 0.2691 |



金沙江上游“V”型河谷 Dry valleys of the upstream of Jinsha River



金沙江上游干旱河谷荒漠植被 Desert vegetation in dry valleys



白刺花+小叶荆群系 Form. *Sophora davidii* + *Vitex microphylla*



灰岩木蓝+胶粘香茶菜群系 Form. *Indigofera calcicola*+*Rabdosia glutinosa*

附录3 金沙江上游干旱河谷区部分生境及群系照片
Appendix 3 The photos of habitat and plant formations in dry valleys of the upstream of Jinsha River