

三峡库区不同消落带下中华蚊母树群落特征及其与土壤环境因子的关系

黄杰^{1,2} 李晓玲^{1,2*} 王雪松^{1,2} 杨进^{1,2} 黄成名³

¹三峡大学生物与制药学院, 湖北宜昌 443002; ²三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北宜昌 443002; ³三峡植物园, 湖北宜昌 443111

摘要 中华蚊母树(*Distylium chinense*)是华中地区特有种, 在三峡库区局部地段占优势形成群落。对三峡库区不同生境下中华蚊母树群落特征及其与土壤环境因子的关系进行研究可为其保护及消落带植被恢复提供科学依据。运用数据分类和排序等方法, 对中华蚊母树群落物种组成、植物区系、物种多样性及其与土壤环境因子的关系进行研究。结果表明, 共发现维管植物56种, 隶属于36科54属, 植物区系以世界分布、泛热带和北温带分布为主, 生活型谱以草本和灌木为主。自然消落带灌木层重要值最大的是中华蚊母树, 草本层重要值最大的是藤本植物地果(*Ficus tikoua*), 主要伴生种为具有一定水淹耐受性的灌木和多年生草本, 如小栎木(*Swida paucinervis*)、地果、白茅(*Imperata cylindrica*)等; 反季节消落带灌木层仅中华蚊母树一种, 草本层重要值最大的物种是狗牙根(*Cynodon dactylon*), 主要伴生种为苍耳(*Xanthium sibiricum*)、苘麻(*Abutilon theophras-tic*)等一年生草本。双向聚类分析将调查的6个样地分为四大类群: 中华蚊母树+小栎木群落(ASS. *Distylium chinense* + *Swida paucinervis*)、中华蚊母树+地果群落(ASS. *Distylium chinense* + *Ficus tikoua*)、中华蚊母树+细叶水团花群落(ASS. *Distylium chinense* + *Adina rubella*)、中华蚊母树+狗牙根群落(ASS. *Distylium chinense* + *Cynodon dactylon*)。典范对应分析表明, 海拔高度和土壤pH是影响中华蚊母树群落物种分布的主要环境因子, 土壤有机质、全氮、全磷和速效钾含量是次要因素, 但它们是影响群落物种多样性指数的主要因子, 其中土壤氮是群落的限制因子。因此, 在反季节消落带植被重建中, 对中华蚊母树群落进行构建时, 除考虑细叶水团花、小栎木等作为高海拔消落带伴生物种外, 还应增加土壤氮和钾的供给, 使中华蚊母树群落保持较高的物种多样性, 维持消落带生态系统稳定。

关键词 三峡库区; 中华蚊母树; 群落特征; 土壤环境因子; 典范对应分析

黄杰, 李晓玲, 王雪松, 杨进, 黄成名 (2021). 三峡库区不同消落带下中华蚊母树群落特征及其与土壤环境因子的关系. 植物生态学报, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0311

Characteristics of *Distylium chinense* communities and their relationships with soil environmental factors in different intertidal zones of the Three Gorges Reservoir, China

HUANG Jie^{1,2}, LI Xiao-Ling^{1,2*}, WANG Xue-Song^{1,2}, YANG Jin^{1,2}, and HUANG Cheng-Ming³

¹College of Biological and Pharmaceutical Science of China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; ²Engineering Research Center of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Hubei International Scientific and Technological Center of Ecological Conservation and Management in the Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China; and ³Three Gorges Botanical Garden, Yichang, Hubei 443111, China

Abstract

Aims *Distylium chinense* is endemic to central China, and can be dominant species in parts of the Three Gorges Reservoir area. Studying the characteristics of *D. chinense* communities and their relationships with soil environmental factors under different habitat conditions could help gain knowledge assisting the community protection and vegetation restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir.

Methods Measurements were made on species composition, floristic characteristics, and plant diversity in *D. chinense* communities in 24 plots (4 m × 4 m) covering six study sites across the riparian zone of the Three Gorges Reservoir. The relationships of varying community traits with soil environmental factors were determined by quantitative classification and ordination methods.

Important findings A total of 56 plant species were recorded across the 24 sampling plots, belonging to 36 families and 54 genera. The plant communities mainly composed of the cosmopolitan species, pantropical and

收稿日期Received: 2020-09-17 接受日期Accepted: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51209122和51779127)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (51209122 and 51779127).

* 通信作者Corresponding author (lixiaolinggz@126.com)

north temperate of *D. chinense* community, predominantly as herbs and shrubs. In the natural riparian zone, *D. chinense* scored the highest importance value in the shrub layer, and *Ficus tikoua* in the herb layer. The companion species of *D. chinense* were shrubs and perennial herbs with flooding tolerance, such as *Swida paucinervis*, *F. tikoua*, *Imperata cylindrica*, etc. However, in the off-season intertidal zone, *D. chinense* was the only plant in the shrub layer, with dominance of *Cynodon dactylon* in the herb layer and other companion species as annual herbs, such as *Xanthium sibiricum*, *Abutilon theophrasti*, etc. Two-way cluster analysis divided the six sites into four community types: ASS. *D. chinense* + *S. paucinervis*, ASS. *D. chinense* + *F. tikoua*, ASS. *D. chinense* + *Adina rubella*, and ASS. *D. chinense* + *C. dactylon*. Canonical correspondence analyses showed that altitude and soil pH were the main environmental factors affecting the species distribution of *D. chinense* community, followed by the content of soil organic matter, total phosphorus, total nitrogen, and available potassium, which were the main influencing factors of species diversity index with nitrogen being the limiting factor of soil. In rehabilitation of the off-season intertidal zones of the Three Gorges Reservoir, small shrubs such as *A. rubella* and *S. paucinervis* should be used as the companion species of the upper slopes with increased supply of soil nitrogen and potassium, in order to promote higher species diversity of the *D. chinense* community and to maintain the stability of intertidal ecosystems.

Key words the Three Gorges Reservoir area; *Distylium chinense*; community characteristics; soil environmental factors; canonical correspondence analysis

Huang J, Li XL, Wang XS, Yang J, Huang CM (2021). Characteristics of *Distylium chinense* communities and their relationships with soil environmental factors in different intertidal zones of the Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0311

生态系统的物种多样性和结构特征是生态学研究中的热点之一(Langer *et al.*, 2008), 其中植被的退化导致了严重的环境问题和生态服务功能的丧失, 因此消落带植被的恢复日益引起了政府和生态学家的关注(Ye *et al.*, 2013)。消落带是指季节性水位涨落或者水库周期性蓄洪或行洪使得被淹没土地周期性地出露于水面的区域, 而植被是消落带生态系统的重要组成部分, 在保护水域生态安全、保护水质、稳定堤岸、保持生境连通性和维持生物多样性等生态功能方面发挥重要作用(Gundersen *et al.*, 2010)。许多研究表明, 消落带植物群落特征在很大程度上受到环境因素的影响(如海拔高度、水淹深度、水淹时间以及土壤营养等)(Aerts *et al.*, 2003; Ye *et al.*, 2013; 郭燕等, 2019)。因此, 明确植物群落特征与环境因子的相关关系对于消落带植物群落构建和生物多样性保护具有重要的科学意义。

植被群落特征及多样性与生境密切相关, 是诸多环境因子及生物因子共同作用的结果(Soliveres & Maestre, 2014)。已有研究表明, 三峡水库消落带植被特征如物种组成、生活型及物种多样性除了受到水淹时间和水淹深度的影响外, 还受到了土壤环境因子如总磷、速效磷、速效钾及硝态氮含量等的综合影响(Ye *et al.*, 2013)。同样, Zhang等(2013)的研究也表明三峡水库消落带的植物群落组成受海拔高

度、坡度、pH以及土壤速效磷含量的综合影响。黎杨等(2017)对红枫湖水库消落带进行研究发现, 消落带植被分布格局受自身海拔、河边距等自然环境以及消落带物种的生物学特征的双重影响。此外, 临近物种间的相互作用也会改变植物个体及群落对水淹的响应(Edge *et al.*, 2019)。Mc Conigley等(2015)研究了爱尔兰6种土壤类型上86个不同植物群落组成, 表明在同一个土壤类型的不同消落带植物群落组成和结构没有显著差异, 不同土壤类型上的消落带植物群落显著不同。由此可见, 除水淹时间和水淹深度外, 消落带植物群落特征还受其他环境因素的共同影响。

三峡水库自2010年完成175 m水位蓄水后, 三峡库区形成了消涨幅度为30 m、面积达348.9 km²、水淹时间可长达237天(海拔146 m水位处)的反季节消落带, 同时在水库支流的上游还保留了未受水库冬蓄夏排影响的自然消落带, 水淹时间平均3个月左右, 淹没深度在15 m以下(樊大勇等, 2015)。近10年三峡水库完全蓄水后, 消落带植被除少数灌木和乔木外, 绝大部分植物是一、二年生和多年生草本植物(孙荣等, 2010; 付娟等, 2015; 郭燕等, 2019)。新消落带反季节、长时间水淹使部分本地物种生长较差, 甚至死亡, 从而导致了库区内生物多样性降低、群落结构单一化、土壤侵蚀严重及生态系统脆

弱等一系列严重的生态学问题(樊大勇等, 2015)。物种多样性的提高有利于生态系统在功能上的优化并提高生态系统稳定性, 从而提升对极端气候事件的抵抗力(Isbell *et al.*, 2015), 三峡库区消落带生物多样性丧失会对生态系统稳定性产生影响(樊大勇等, 2015)。因此, 关于三峡库区自然消落带和反季节消落带的植物群落特征及多样性的研究对消落带生态系统稳定及植被的恢复和重建具有重要意义。

中华蚊母树(*Distylium chinense*)是三峡库区消落带常绿灌木树种, 俗称水浆柯子, 是金缕梅科蚊母树属植物(Zhang *et al.*, 2003), 该树种根系发达、盘根错节, 能在水下生存数月, 是一种耐淹性能较强的土著小灌木(李晓玲等, 2011; Liu *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2020), 也是三峡库区河岸带固土护岸的良好树种和上好的观赏盆景树种(Xiang *et al.*, 2020), 同时中华蚊母树也是分布区较窄的华中地区特有种, 为库区表征种之一(王勇等, 2002)。然而, 随着水电工程的兴建, 乌江流域和长江流域大部分野生中华蚊母树群落的原生境被淹没, 再加上人类的过度采伐, 导致野生资源数量和遗传多样性遭到破坏, 大面积的中华蚊母树群落已经很少见, 现存的野生中华蚊母树仅零星分布在长江及乌江两岸的河谷及溪流两侧(Sun *et al.*, 2020)。因此, 研究中华蚊母树群落对其保护具有重要科学意义。本课题组前期研究表明中华蚊母树通过改变形态学特征及代谢等方式来提高耐淹能力(Li *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2020), 可以增强在不同水文节律异质生境中的适合度(李晓玲等, 2018)。因此, 中华蚊母树被认为是三峡库区消落带上部具有较强水淹耐受性的物种。然而, 关于中华蚊母树在不同生境(自然消落带和反季节消落带)下群落的物种组成和多样性以及对环境因子响应的研究尚未见报道, 而有研究表明生境异质性与物种多样性之间存在正相关关系(Lundholm, 2009), 小尺度生境异质性是导致群落物种组成不同和物种共存的重要因素(Bergholz *et al.*, 2017; 陈林等, 2019)。此外, 阐明植物群落组成对生境异质性的响应是群落生态学研究的核心议题(徐远杰等, 2017)。

本研究通过野外调查中华蚊母树群落在三峡库区蓄水后的分布情况, 探明中华蚊母树群落生存所依赖的生态条件和群落特征, 了解其分布格局和物种多样性, 同时了解影响中华蚊母树群落结构和物

种多样性的主要土壤环境因子, 拟解决以下两个科学问题: (1)在三峡库区自然消落带和反季节消落带的中华蚊母树群落物种组成、分布格局有何特征和差异? (2)中华蚊母树群落物种分布与土壤环境因子之间有什么关系? 主要影响因子有哪些? 两问题的解决, 可进一步揭示中华蚊母树群落对环境因子的响应及生态适应机制并丰富对中华蚊母树群落分布的了解, 为在三峡库区反季节消落带人工构建中华蚊母树群落提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

调查研究区域包括湖北省宜昌市秭归县香溪河(31.02° N, 111.75° E), 黄花乡古龙溪(30.88° N, 111.38° E), 重庆市巫溪县大宁河(31.33° N, 109.62° E), 武隆区乌江(29.32° N, 107.80° E)和芙蓉江(29.03° N, 107.82° E)。研究区域属于亚热带湿润季风气候区, 气候温和湿润, 水热条件充足, 年降水量1 100–1 500 mm, 年平均气温15–19 °C, 活动积温5 000–6 000 °C, 无霜期290–340天(王勇等, 2002), 可满足大多数喜温植物的生长。在三峡水库蓄水前消落带有维管植物405种, 其中122个中国特有种, 它们为库区进行植被恢复与重建提供了丰富的物种资源(王勇等, 2002)。中华蚊母树群落每年会因汛期河水上漲或者三峡库区蓄水而出现水位涨落扰动所带来的影响, 生境严酷, 群落生活型谱主要以矮高位芽植物和一年生植物为主, 主要伴生物种有: 小桉木(*Swida paucinervis*)、地果(*Ficus tikoua*)、节节草(*Equisetum ramosissimum*)和白茅(*Imperata cylindrica*)等(李晓玲等, 2018)。

1.2 样点设置及群落调查

调查于2014年6–8月进行, 选取6个中华蚊母树群落, 发育在三峡库区两种不同水文节律下: (1)自然消落带(NRZ), 不受三峡库区现行水文节律的影响, 受夏季洪汛的影响, 是中华蚊母树自然生长区, 5个样点分别位于重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪北岸、重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪南岸、重庆市武隆区巷口乡乌江三道拐、重庆市巫溪县峰灵镇大宁河和宜昌市黄花镇古龙溪; (2)反季节消落带(ASWLFZ), 受现行三峡水库冬蓄夏排的影响, 在宜昌市秭归县归州镇万古寺村香溪河, 该样点的中华蚊母树种群属于迁地恢复, 是三峡水库消落带

植被恢复与重建物种, 于2009–2011年陆续在三峡水库香溪河消落带170–175 m移栽了一年生中华蚊母树幼苗, 已经过三峡水库5年运行蓄水节律的影响(图1; 表1)。采用样方法对植物群落进行调查。每个区域随机布设4个样方, 每个样方面积为4 m × 4 m, 共计调查24个样方。记录样地的地理坐标、海拔, 以及样方内乔木、灌木和草本植物的物种名称、

数量及各物种平均高度、盖度。

1.3 土壤环境因子的测定

用环刀在调查过植被的样方取表层(0–20 cm)土壤, 采用梅花形布点混合取样法, 并装袋编号, 带回实验室分析。土壤理化性质分析方法参照《土壤农业化学分析方法》(鲍士旦, 2000), 测定指标有: 土壤pH、土壤有机质(OM)、土壤全氮(TN)、土壤全

表1 取样点基本信息
Table 1 Information of sampling sites

水文节律 Hydrological regime	样地编号 Number of sites	采样点 Sampling site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)
自然消落带 Natural intertidal zone	Site 1	重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪北岸 North Bank of Zhuzi Stream of Furong River in Haokou Town, Wulong District, Chongqing	107.82°	29.03°	349
	Site 2	重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪南岸 South Bank of Zhuzi Stream of Furong River in Haokou Town, Wulong District, Chongqing	107.82°	29.03°	335
	Site 3	重庆市武隆区巷口乡乌江三道拐 Sandaoguai, Wujiang in Xiangkou Town, Wulong District, Chongqing	107.80°	29.32°	262
	Site 4	重庆市巫溪县峰灵镇大宁河 Daning River in Fengling Town, Wuxi County, Chongqing	109.62°	31.33°	643
	Site 5	宜昌市黄花镇古龙溪 Gulong Stream in Huanghua Town, Yichang City, Hubei	111.38°	30.88°	348
反季节消落带 Anti-season intertidal zone	Site 6	宜昌市秭归县归州镇万古寺村香溪河 Wangusi, Xiangxi River in Zigui County, Yichang City, Hubei	111.75°	31.02°	175

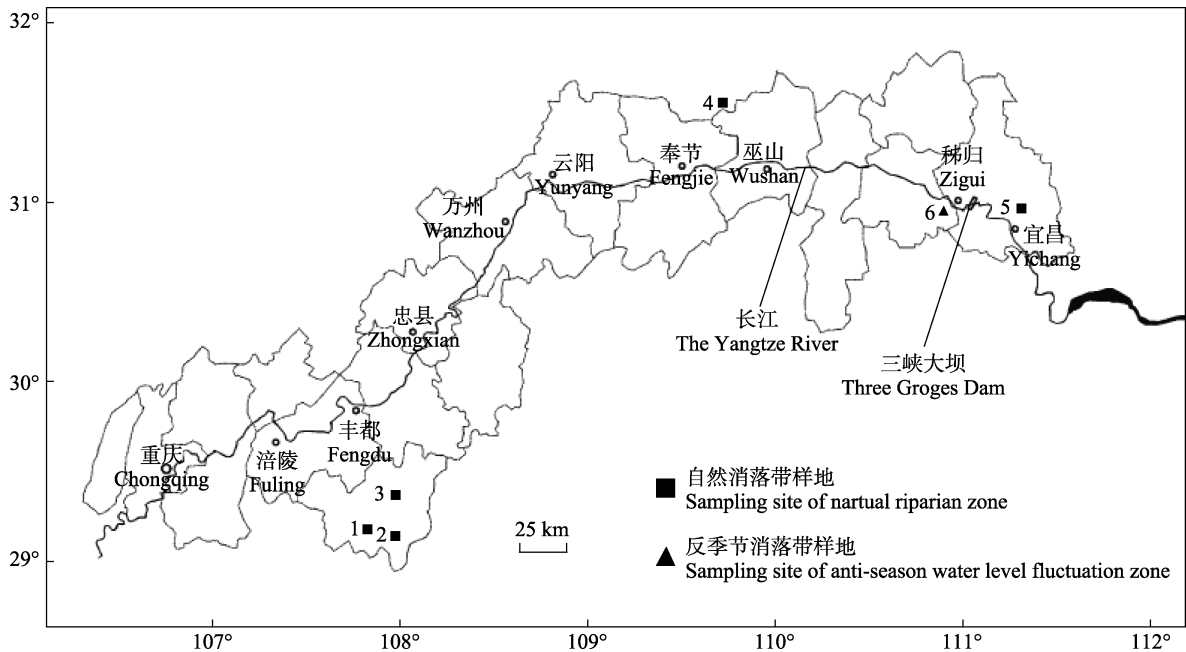


图1 三峡库区中华蚊母树群落调查样地的分布。1, 重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪北岸; 2, 重庆市武隆区浩口乡芙蓉江竹子溪南岸; 3, 重庆市武隆区巷口乡乌江三道拐; 4, 重庆市巫溪县峰灵镇大宁河; 5, 宜昌市黄花镇古龙溪; 6, 宜昌市秭归县归州镇万古寺村香溪河。

Fig. 1 Geographic distribution of the *Distylium chinense* communities investigated in the Three Gorges Reservoir Region. 1, North Bank of Zhuzi Stream of Furong River in Haokou Town, Wulong District, Chongqing; 2, South Bank of Zhuzi Stream of Furong River in Haokou Town, Wulong District, Chongqing; 3, Sandaoguai, Wujiang in Xiangkou Town, Wulong District, Chongqing; 4, Daning River in Fengling Town, Wuxi County, Chongqing; 5, Gulong Stream in Huanghua Town, Yichang City, Hubei; 6, Xiangxi River in Zigui County, Yichang City, Hubei.

磷(TP)、土壤全钾(TPO)、水解氮(HN)、速效磷(AP)、速效钾(APO)含量及土壤含水量(WFS)等, 土壤pH用电位法测定, OM含量测定采用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法, TN含量测定采用凯氏定氮法, TP含量测定采用 $HClO_4-H_2SO_4$ 消煮法(钼锑抗比色法), TPO含量测定采用 $HF-HClO_4$ 消煮法(火焰光度法), WFS测定采用MP-406 I型土壤水分测定仪(南通中天精密仪器有限公司, 南通, 中国), HN含量的测定采用碱解扩散法, AP含量的测定采用 $NaHCO_3$ 提取法(钼锑抗比色法), APO含量的测定采用乙酸铵提取法(火焰光度法)。

1.4 植物区系及生活型分析

参照吴征镒等(2011)对种子植物属分布区类型的划分方法, 对样方内所有维管束植物属的分布区类型进行分析。根据《中国植物志》对样方内所有维管束植物的生活型谱进行分析。

1.5 数据处理

(1)重要值: 参照陈忠礼等(2012)的方法, 选取重要值作为评价群落中各物种相对重要性的综合数量指标。以样方为单位, 分灌木层和草本层进行样方调查并计算物种的重要值(IV):

相对密度=某个种的株数/所有种的总株数

相对频度=某个种频度/所有种频度之和

相对盖度=某个种的盖度/所有种盖度之和

灌木层及草本层重要值=(相对密度+相对盖度+相对频度)/3

由于本次调查发现的5种乔木植物高度在0.2–1.5 m之间, 因此, 将其按照灌木重要值的计算方法计算其重要值, 并归为灌木层, 匍地生长的木质藤本植物归为草本层。

(2)物种多样性指数: 群落 α 多样性采用Margalef丰富度指数(R)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(E)、Simpson优势度指数(D) 4类指数表征, 根据重要值计算各物种多样性指数, 其计算公式(方精云等, 2009; 陈忠礼等, 2012)如下:

$$R = \frac{S-1}{\ln N}$$

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

$$E = H / \ln S$$

$$D = -\sum P_i^2$$

式中, S 为样方内物种总数, N 为样方内所有物种数量之和, P_i 为第 i 种的重要值。所得各个多样性指数值采用SPSS 17.0中的单因素方差分析对不同样点

的数据进行差异显著性检验。若差异显著, 采用最小显著极差(LSD)法进行多重比较, 显著性水平取 $p < 0.05$ 。

以物种重要值为基础, 构建物种-样方矩阵, 选取重要值大于5%的优势物种进行双向聚类分析, 划分群落类型。运用典范对应分析(CCA)排序方法分析物种、样方与土壤环境因子的关系。双向聚类分析来自PC-ORD v5.0生态学软件包, CCA分析由CANOCO 5.0完成。

2 结果和分析

2.1 物种种类组成及生活型

经调查统计, 6个中华蚊母树群落内共发现维管植物56种, 隶属36科54属(表2)。以禾本科、菊科、豆科、蔷薇科、茜草科、荨麻科、莎草科、蓼科等为主。伴生植物以禾本科、菊科和豆科最为丰富, 均占本次调查总物种数的8.77%。不同群落的物种组成不同。本次调查灌木层19属20种(其中乔木5属5种), 草本层36属36种, 因此草本层对物种多样性贡献最大。

根据《中国植物志》对中华蚊母树群落中56种植物的生活型谱进行分析(表2)。在56种植物中, 一年生草本植物11种, 占比19.64%; 二年生草本植物2种, 占比3.57%; 二年生或多年生草本植物1种, 占比1.79%; 多年生草本植物17种, 占比30.36%; 藤本5种, 占比8.93%; 灌木15种, 占比26.79%; 乔木5种, 占比8.93%。该生活型谱基本反映出, 在中华蚊母树群落所处的河流两岸低海拔地区, 受自然汛期河水涨落淹没的影响, 中华蚊母树群落中的植物以具有一定耐水淹能力的小灌木和草本植物为主。

2.2 中华蚊母树群落的植物区系组成

根据吴征镒等(2011)对中国种子植物属的分布区类型划分方法, 对本次调查的中华蚊母树群落中的蕨类植物1属和种子植物53属分布区类型进行了分析(表3)。可以看出, 中华蚊母树群落的区系组成以世界分布、泛热带以及北温带分布为主, 分别占本次调查的种属的26.79%、19.64%和19.64%, 表明中华蚊母树群落中的植物具有广幅适应性, 能够适应广大地区的环境, 有较强的环境适应能力, 三峡库区属于亚热带湿润季风气候区域, 气候温和湿润, 水热条件充足, 区系性质与本研究区域所处的地理位置较吻合。

表2 三峡库区中华蚊母树群落物种组成

Table 2 List of all species in the *Distylium chinense* communities of the study sites in the Three Gorges Reservoir Region

科 Family	属 Genus	物种 Species	生活型 Life form
禾本科 Gramineae	狗牙根属 <i>Cynodon</i>	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	多年生草本 Perennial herb
	芒属 <i>Miscanthus</i>	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	多年生草本 Perennial herb
	白茅属 <i>Imperata</i>	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	多年生草本 Perennial herb
	狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	一年生草本 Annual herb
	野黍属 <i>Eriochloa</i>	野黍 <i>Eriochloa villosa</i>	一年生草本 Annual herb
菊科 Compositae	白酒草属 <i>Conyza</i>	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	一年生草本 Annual herb
	蒿属 <i>Artemisia</i>	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	多年生草本 Perennial herb
	苍耳属 <i>Xanthium</i>	苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	一年生草本 Annual herb
	鬼针草属 <i>Bidens</i>	狼把草 <i>Bidens tripartita</i>	一年生草本 Annual herb
	鼠麴草属 <i>Gnaphalium</i>	鼠麴草 <i>Gnaphalium affine</i>	一年生草本 Annual herb
豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	灌木 Shrub
	黄耆属 <i>Astragalus</i>	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i>	二年生草本 Biennial herb
	野豌豆属 <i>Vicia</i>	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	多年生草本 Perennial herb
	崖豆藤属 <i>Millettia</i>	美丽崖豆藤 <i>Millettia speciosa</i>	藤本 Vine
	葛属 <i>Pueraria</i>	葛 <i>Pueraria lobata</i>	藤本 Vine
蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	野蔷薇 <i>Rosa multiflora</i>	灌木 Shrub
	蛇莓属 <i>Duchesnea</i>	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	多年生草本 Perennial herb
	火棘属 <i>Pyracantha</i>	火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i>	灌木 Shrub
蓼科 Polygonaceae	酸模属 <i>Rumex</i>	酸模 <i>Rumex acetosa</i>	多年生草本 Perennial herb
	蓼属 <i>Polygonum</i>	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	一年生草本 Annual herb
茜草科 Rubiaceae	水团花属 <i>Adina</i>	细叶水团花 <i>Adina rubella</i>	灌木 Shrub
	鸡矢藤属 <i>Paederia</i>	鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>	藤本 Vine
荨麻科 Urticaceae	水麻属 <i>Debregeasia</i>	水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>	灌木 Shrub
	苎麻属 <i>Boehmeria</i>	序叶苎麻 <i>Boehmeria clidemioides</i> var. <i>diffusa</i>	多年生草本 Perennial herb
桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	长柄竹叶榕 <i>Ficus stenophylla</i>	灌木 Shrub
		地果 <i>Ficus tikoua</i>	藤本 Vine
莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	羊须草 <i>Carex callitrichos</i>	多年生草本 Perennial herb
	莎草属 <i>Cyperus</i>	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	多年生草本 Perennial herb
山茱萸科 Cornaceae	楸木属 <i>Swida</i>	小楸木 <i>Swida paucinervis</i>	灌木 Shrub
		楸木 <i>Swida macrophylla</i>	乔木 Tree
三白草科 Saururaceae	蕺菜属 <i>Houttuynia</i>	蕺菜 <i>Houttuynia cordata</i>	多年生草本 Perennial herb
杨柳科 Salicaceae	柳属 <i>Salix</i>	水柳 <i>Salix warburgii</i>	乔木 Tree
大戟科 Euphorbiaceae	守宫木属 <i>Sauropus</i>	守宫木 <i>Sauropus androgynus</i>	灌木 Shrub
樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	川桂 <i>Cinnamomum wilsonii</i>	乔木 Tree
胡桃科 Juglandaceae	枫杨属 <i>Pterocarya</i>	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	乔木 Tree
木犀科 Oleaceae	女贞属 <i>Ligustrum</i>	小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>	灌木 Shrub
马鞭草科 Verbenaceae	牡荆属 <i>Vitex</i>	黄荆 <i>Vitex negundo</i>	灌木 Shrub
马钱科 Loganiaceae	醉鱼草属 <i>Buddleja</i>	密蒙花 <i>Buddleja officinalis</i>	灌木 Shrub
金缕梅科 Hamamelidaceae	蚊母树属 <i>Distylium</i>	中华蚊母树 <i>Distylium chinense</i>	灌木 Shrub
马桑科 Coriariaceae	马桑属 <i>Coriaria</i>	马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	灌木 Shrub
胡颓子科 Elaeagnaceae	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	余山羊奶子 <i>Elaeagnus argyi</i>	灌木 Shrub
木兰科 Magnoliaceae	木兰属 <i>Magnolia</i>	多花木兰 <i>Magnolia multiflora</i>	乔木 Tree
忍冬科 Caprifoliaceae	荚蒾属 <i>Viburnum</i>	球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i>	灌木 Shrub
木通科 Lardizabalaceae	木通属 <i>Akebia</i>	三叶木通 <i>Akebia trifoliata</i>	藤本 Vine
车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	车前 <i>Plantago asiatica</i>	二年或多年生草本 Biennial or perennial herb

表2 (续) Table 2 (Continued)

科 Family	属 Genus	物种 Species	生活型 Life form
木贼科 Equisetaceae	木贼属 <i>Equisetum</i>	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	多年生草本 Perennial herb
蕨科 Pteridiaceae	蕨属 <i>Pteridium</i>	蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	多年生草本 Perennial herb
商陆科 Phytolaccaceae	商陆属 <i>Phytolacca</i>	商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>	多年生草本 Perennial herb
伞形科 Umbelliferae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	二年生草本 Biennial herb
兰科 Orchidaceae	白及属 <i>Bletilla</i>	白及 <i>Bletilla striata</i>	多年生草本 Perennial herb
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	刺果毛茛 <i>Ranunculus muricatus</i>	一年生草本 Annual herb
藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	藜 <i>Chenopodium album</i>	一年生草本 Annual herb
茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	一年生草本 Annual herb
锦葵科 Malvaceae	苘麻属 <i>Abutilon</i>	苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>	一年生草本 Annual herb
苋科 Amaranthaceae	莲子草属 <i>Alternanthera</i> Forsk	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	多年生草本 Perennial herb
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	多年生草本 Perennial herb

表3 中华蚊母树群落植物属的分布区类型

Table 3 Floristic composition of the genera in the *Distylium chinense* communities

分布类型 Type of distribution	属数 Number of genus	比例 Ratio (%)
世界分布 Cosmopolitan	15	26.79
泛热带分布 Pantropic	11	19.64
热带亚洲和热带美洲洲际间断分布 Trop. Asia & Trop. Amer. disjuncted	2	3.57
热带亚洲至热带大洋洲分布 Tropical Asia & Trop. Australian	3	5.36
热带亚洲至热带非洲分布 Trop. Asia to Trop. Africa	2	3.57
热带亚洲(印度-马来西亚)分布 Trop. Asia (Indo - Malesia)	4	7.14
北温带分布 North Temperate	11	19.64
东亚-和北美间断分布 E. Asia & N. Amer. disjuncted	4	7.14
旧世界温带分布 Old World Temperate	1	1.79
温带亚洲分布 Temp. Asia	1	1.79
东亚分布 E. Asia	2	3.57

2.3 中华蚊母树群落物种多样性分析

重要值和多样性是植物群落特征的重要参数。通过计算中华蚊母树群落中灌木层和草本层中各物种的重要值,分析该物种在群落中的地位和对该物种多样性的贡献。结果(表4)显示,在不受三峡库区现行水文节律影响的自然消落带的灌木层结构比较简单,中华蚊母树的重要值高达40.77%,为群落中的优势种,而其他伴生种如小栎木、细叶水团花(*Adina rubella*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)等在群落中分布较少;反季节消落带的灌木层仅有中华蚊母树一种植物,反季节消落带恶劣的水淹环境导致其他灌木物种死亡。自然消落带中华蚊母树群落草本层物种丰富,地果、白茅、蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)的重要值较大,为群落草本层的主要物种;反季节消落带中华蚊母树群落草本层物种也比较丰富,其中狗牙根的重要值高达

36.42%,其他物种重要值均较低,表明狗牙根在该群落草本层中占优势地位。

对6个中华蚊母树群落24个样方的物种多样性指数分析如表5所示,各样地群落多样性指数存在较大差异。万古寺样地仅有中华蚊母树一种灌木,因此未计算灌木层多样性指数。古龙溪样地灌木层的物种多样性指数和丰富度指数最大,显著高于其他样地,表明古龙溪群落灌木层物种丰富;大宁河和古龙溪样地灌木层的均匀度指数显著高于竹子溪北岸、南岸和乌江三道拐样地;竹子溪南岸和乌江三道拐样地灌木层的优势度指数显著高于大宁河和古龙溪样地,且竹子溪南岸样地优势度指数最大,表明中华蚊母树在竹子溪南岸群落中的优势种地位最突出。古龙溪和万古寺样地草本层的丰富度指数和多样性指数显著高于大宁河,竹子溪南岸、北岸和乌江三道拐样地,且古龙溪样地丰富度指数和多样性指数最大,表明古龙溪样地草本层复杂;大宁

表4 两种生境下中华蚊母树群落灌木层、草本层物种重要值

Table 4 Important value of species in shrub layer and herbaceous layer in the *Distylium chinense* communities under the two habitats

生境 Habitat	层片 Layer	物种 Species	重要值 Important value (%)
自然消落带 Natural intertidal zone	灌木层 Shrub layer	中华蚊母树 <i>Distylium chinense</i>	40.77
		小楸木 <i>Swida paucinervis</i>	10.04
		细叶水团花 <i>Adina rubella</i>	5.73
		马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	5.81
		余山羊奶子 <i>Elaeagnus argyi</i>	5.66
		长柄竹叶榕 <i>Ficus stenophylla</i>	5.46
		楝木 <i>Swida macrophylla</i>	4.83
		水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>	4.44
		枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	3.61
		球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i>	2.31
		川桂 <i>Cinnamomum wilsonii</i>	2.20
		水柳 <i>Salix warburgii</i>	1.88
		野蔷薇 <i>Rosa multiflora</i>	1.27
		其余7种之和 Sum of other 7 species	5.99
	草本层 Herbaceous layer	地果 <i>Ficus tikoua</i>	13.94
		白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	7.90
		蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	7.73
		狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	7.58
		五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	7.13
		羊须草 <i>Carex callitrichos</i>	6.98
		喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	5.72
		节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	4.29
		戴菜 <i>Houttuynia cordata</i>	4.19
		水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	3.48
		蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	2.79
		紫云英 <i>Astragalus sinicus</i>	2.27
		车前 <i>Plantago asiatica</i>	2.16
		野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	2.00
		三叶木通 <i>Akebia trifoliata</i>	1.90
		序叶苎麻 <i>Boehmeria clidemioides</i> var. <i>diffusa</i>	1.80
		刺果毛茛 <i>Ranunculus muricatus</i>	1.65
		野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	1.55
		其余14种之和 Sum of other 14 species	14.94
反季节消落带 Anti-season intertidal zone	灌木层 Shrub layer	中华蚊母树 <i>Distylium chinense</i>	100.00
	草本层 Herbaceous layer	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	36.42
		苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	8.51
		鼠麴草 <i>Gnaphalium affine</i>	7.85
		狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	7.27
		狼把草 <i>Bidens tripartite</i>	7.30
		苘麻 <i>Abutilon theophrastic</i>	6.78
		商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>	5.61
		野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	3.53
		酸模 <i>Rumex acetosa</i>	3.05
		水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	2.84
		藜 <i>Chenopodium album</i>	2.66
		香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	2.49
		其余5种之和 Sum of other 5 species	5.69

表5 6个中华蚊母树群落的多样性指数比较

Table 5 Comparison of diversity index in *Distylium chinense* communities among the six study sites

层片 Layer	样地 Site	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>R</i>
灌木层 Shrub layer	Site 1	1.300 ± 0.060 ^{bc}	0.338 ± 0.024 ^{bc}	0.763 ± 0.019 ^b	1.162 ± 0.057 ^b
	Site 2	0.973 ± 0.146 ^d	0.518 ± 0.063 ^a	0.634 ± 0.053 ^c	0.975 ± 0.154 ^b
	Site 3	1.132 ± 0.114 ^{cd}	0.449 ± 0.048 ^{ab}	0.654 ± 0.044 ^c	1.195 ± 0.137 ^b
	Site 4	1.521 ± 0.058 ^b	0.279 ± 0.020 ^{cd}	0.830 ± 0.014 ^a	1.323 ± 0.108 ^b
	Site 5	1.808 ± 0.092 ^a	0.203 ± 0.016 ^d	0.853 ± 0.020 ^a	1.896 ± 0.136 ^a
	Site 6	—	—	—	—
草本层 Herbaceous layer	Site 1	1.543 ± 0.033 ^{bc}	0.234 ± 0.009 ^{ab}	0.933 ± 0.019 ^a	1.153 ± 0.085 ^b
	Site 2	1.677 ± 0.160 ^b	0.227 ± 0.037 ^{ab}	0.904 ± 0.044 ^a	1.264 ± 0.214 ^b
	Site 3	1.583 ± 0.059 ^{bc}	0.234 ± 0.010 ^{ab}	0.911 ± 0.010 ^a	1.198 ± 0.109 ^b
	Site 4	1.267 ± 0.206 ^c	0.326 ± 0.077 ^a	0.844 ± 0.085 ^a	0.921 ± 0.144 ^b
	Site 5	2.147 ± 0.114 ^a	0.135 ± 0.016 ^b	0.940 ± 0.004 ^a	2.135 ± 0.204 ^a
	Site 6	2.064 ± 0.040 ^a	0.188 ± 0.012 ^b	0.828 ± 0.022 ^a	2.045 ± 0.137 ^a

不同小写字母表示不同群落样地间的多样性指数差异显著($p < 0.05$)。D, Simpson优势度指数; E, Pielou均匀度指数; H, Shannon-Wiener多样性指数; R, Margalef丰富度指数。

Different lowercase letters in different plant layers indicate significant differences at $p < 0.05$. D, Simpson dominance index; E, Pielou evenness index; H, Shannon-Wiener diversity index; R, Margalef richness index.

河样地草本层优势度指数显著高于古龙溪和万古寺样地, 除大宁河样地外, 其他5个样地优势度指数无显著性差异, 此外, 各样地草本层均匀度指数也无显著性差异。

2.4 双向聚类分析

本研究对6个中华蚊母树群落24个样方重要值大于5%的植物进行双向聚类分析。以25%为阈值, 24个小样方被分为两大类, 一类是自然消落带群落, 另一类是反季节消落带群落。以50%为阈值, 被分为四大类(图2), 第一类为中华蚊母树+小栎木群落, 第二类为中华蚊母树+地果群落, 第三类为中华蚊母树+细叶水团花群落, 第四类为中华蚊母树+狗牙根群落。这四个类群均为中华蚊母树群落, 但每个类群所包含的物种各不相同。以75%为阈值, 43个物种可以分为六类, 第一类: 中华蚊母树; 第二类: 小栎木、地果; 第三类: 长柄竹叶榕(*Ficus stenophylla*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、节节草、蕨、羊须草(*Carex callitrichos*)、白茅; 第四类: 紫云英(*Astragalus sinicus*)、三叶木通(*Akebia trifoliata*)、川桂(*Cinnamomum wilsonii*)、龙葵(*Solanum nigrum*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、守宫木(*Sauropus androgynus*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、刺果毛茛(*Ranunculus muricatus*)、酸模(*Rumex acetosa*)、野豌豆(*Vicia sepium*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、蛇莓

(*Duchesnea indica*)、香附子(*Cyperus rotundus*)、水柳(*Salix warburgii*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、球核荚蒾(*Viburnum propinquum*)、葳菜(*Houttuynia cordata*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、水麻(*Debregeasia orientalis*)、细叶水团花、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、狼把草(*Bidens tripartita*)、苘麻(*Abutilon theophrasti*)、商陆(*Phytolacca acinosa*)、鼠麴草(*Gnaphalium affine*); 第五类: 马桑、余山羊奶子(*Elaeagnus argyi*); 第六类: 狗牙根。

2.6 中华蚊母树群落特征与环境因子的关系

对中华蚊母树群落物种多样性指数与土壤环境因子进行CCA排序分析, 如图3A所示, 箭头表征了土壤环境因子, 向量长短代表了其在主轴中的作用强度, 箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正负以及相关性的的大小(Guisan *et al.*, 1999)。APO、TP、TPO、OM含量等与第1排序轴的相关性更为密切, 相关系数分别为0.848 8、0.727 5、0.715 9、0.702 0。说明第1轴反映了土壤中的营养元素; 而影响第2轴的主要因子为pH、WFS和海拔, 相关系数分别为0.611 6、0.532 9、0.490 8, 反映了所处土壤pH、海拔和WFS。

对各样地中华蚊母树群落中不同物种组成与各样地土壤环境因子进行CCA排序分析(图3B)。前两个排序轴的特征值分别为0.612和0.388, 前两个环境因子轴与物种轴之间相关系数分别为0.989、0.986, 相关性很高, 物种-环境变量累积百分数分别为

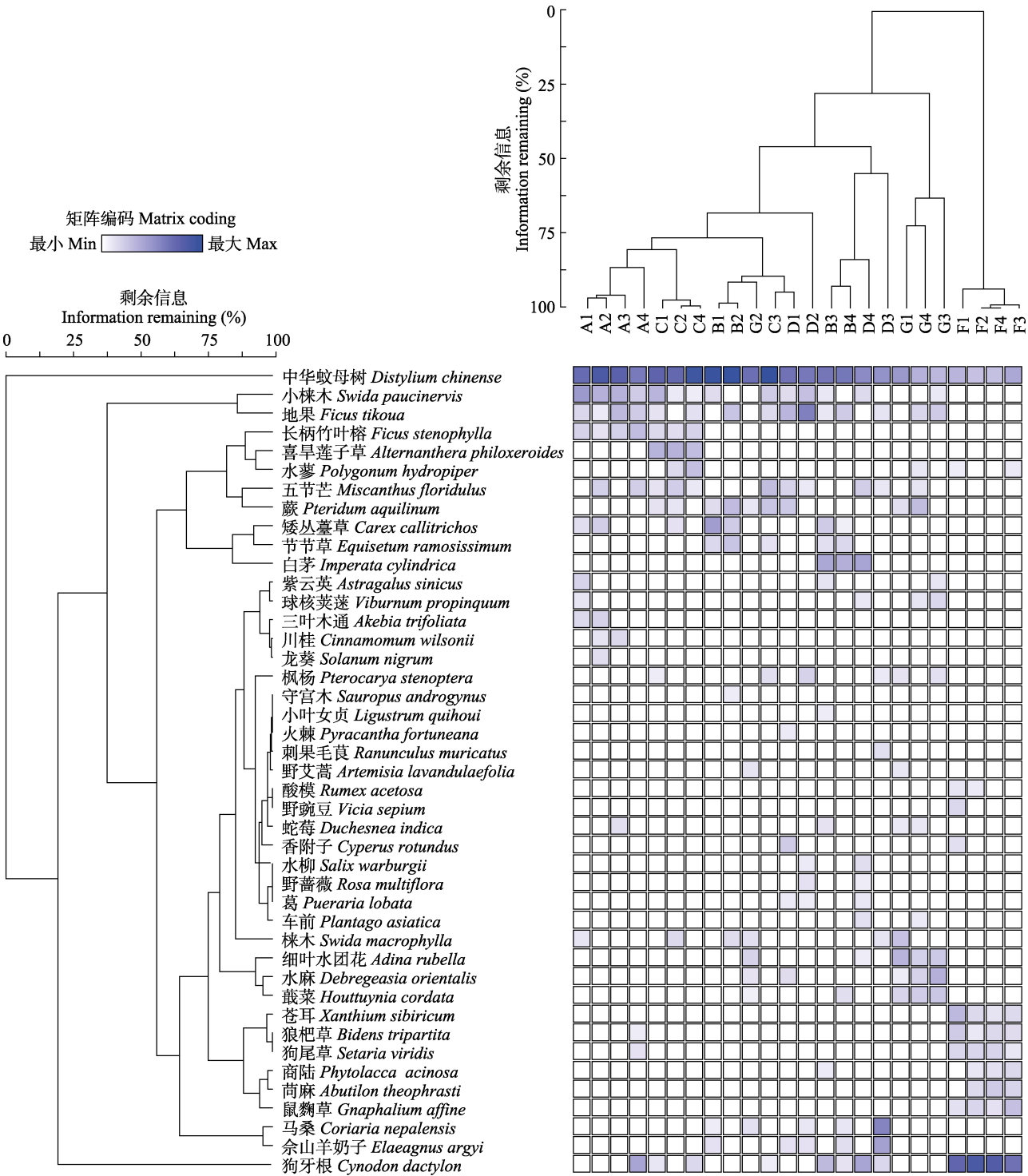


图2 中华蚊母树群落与主要物种的双向聚类分析。A1–A4为竹子溪北岸样地的4个样方，B1–B4为竹子溪南岸样地的4个样方，C1–C4为乌江三道拐样地的4个样方，D1–D4为大宁河样地的4个样方，E1–E4为古龙溪样地的4个样方，F1–F4为万古寺样地的4个样方。

Fig. 2 Two-way clustering analysis of major species in *Distylium chinense* communities at six study sites. A1–A4 are the four quadrats of the North Bank of Zhuzi Stream; B1–B4 are the four quadrats of the South Bank of Zhuzi Stream; C1–C4 are the four quadrats of the Sandaoguai Wujiang; D1–D4 are the four quadrats of the Daning River; E1–E4 are the four quadrats of the Gulong Stream; F1–F4 are the four quadrats of the Wangusi.

41.0%、67.1%。中华蚊母树群落内植物对环境因子的响应关系在第1和第2排序轴构成的双序图中得以

体现。结果表明，海拔和pH与第1排序轴的相关性较为密切，相关系数为−0.512 5和0.443 8，其他因子与

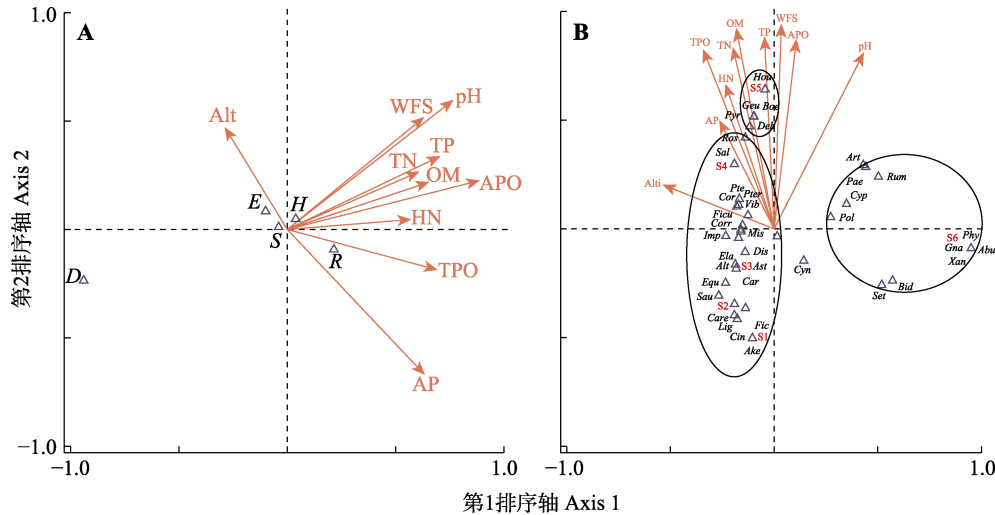


图3 中华蚊母树群落多样性指数(A)、物种分布(B)与环境因子典范对应分析排序图。Alt, 海拔; AP, 速效磷含量; APO, 速效钾含量; D, Simpson优势度指数; E, Pielou均匀度指数; H, Shannon-Wiener多样性指数; HN, 水解氮含量; OM, 土壤有机质含量; R, Margalef丰富度指数; S, 物种数; TN, 全氮含量; TP, 全磷含量; TPO, 全钾含量; WFS, 土壤含水量。Abu, 苘麻; Ake, 三叶木通; Alt, 喜旱莲子草; Ast, 紫云英; Bid, 狼把草; Boe, 序叶苎麻; Car, 小檗木; Care, 羊须草; Cin, 川桂; Cor, 马桑; Cyn, 狗牙根; Cyp, 香附子; Deb, 水麻; Dis, 中华蚊母树; Ela, 余山羊奶子; Equ, 节节草; Ficu, 长柄竹叶榕; Ficu, 地果; Geu, 细叶水团花; Gna, 鼠麴草; Hou, 蕺菜; Imp, 白茅; Lig, 小叶女贞; Mis, 五节芒; Pae, 鸡矢藤; Phy, 商陆; Plo, 水蓼; Pte, 枫杨; Pter, 蕨; Pyr, 火棘; Ran, 刺果毛茛; Ros, 野蔷薇; Rum, 酸模; Sal, 水柳; Sau, 守宫木; Set, 狗尾草; Vib, 球核荚蒾; Xan, 苍耳。

Fig. 3 Canonical correspondence analysis ordination diagram of diversity index and species distribution with soil environmental factors in *Distylium chinense* communities. Alt, altitude; AP, available phosphorus content; APO, available potassium content; D, Simpson dominance index; E, Pielou evenness index; H, Shannon-Wiener diversity index; HN, hydrolyzed nitrogen content; OM, soil organic matter content; R, Margalef richness index; S, number of species; TN, total nitrogen content; TP, total phosphorus content; TPO, total potassium content; WFS, soil moisture. Abu, *Abutilon theophrastic*; Ake, *Akebia trifoliata*; Alt, *Alternanthera philoxeroides*; Ast, *Astragalus sinicus*; Bid, *Bidens tripartita*; Boe, *Boehmeria clidemioides* var. *diffusa*; Car, *Swida paucinervis*; Care, *Carex callitrichos*; Cin, *Cinnamomum wilsonii*; Cor, *Coriaria nepalensis*; Cyn, *Cynodon dactylon*; Cyp, *Cyperus rotundus*; Deb, *Debregeasia orientalis*; Dis, *Distylium chinense*; Ela, *Elaeagnus argyi*; Equ, *Equisetum ramosissimum*; Ficu, *Ficus stenophylla*; Ficu, *Ficus tikoua*; Geu, *Adina rubella*; Gna, *Gnaphalium affine*; Hou, *Houttuynia cordata*; Imp, *Imperata cylindrica*; Lig, *Ligustrum quihouii*; Mis, *Miscanthus floridulus*; Pae, *Paederia scandens*; Phy, *Phytolacca acinosa*; Plo, *Polygonum hydropiper*; Pte, *Pterocarya stenoptera*; Pter, *Pteridium aquilinum*; Pyr, *Pyracantha fortuneana*; Ran, *Ranunculus muricatus*; Ros, *Rosa multiflora*; Rum, *Rumex acetosa*; Sal, *Salix warburgii* Seemen; Sau, *Sauropus androgynus*; Set, *Setaria viridis*; Vib, *Viburnum propinquum*; Xan, *Xanthium sibiricum*.

第一排序轴相关性不大, 也表明海拔和pH是影响群落物种分布的主要因素, 第二排序轴与土壤环境因子均呈正相关关系, 与WFS、pH、OM、TP、APO、TN、TPO和HN含量的相关性较为密切, 相关系数分别为0.946 1、0.907 5、0.897 9、0.878 2、0.858 7、0.847 7、0.832 1、0.687 7。在CCA排序图中, 沿第一排序轴从左至右, 海拔逐渐降低, pH逐渐升高, 沿第二排序轴由下往上, WFS、OM含量等逐渐增加。

3 讨论

3.1 中华蚊母树群落结构特征

三峡水库蓄水运行后, 与蓄水前的植物群落植被数据相比, 植被发生了显著的变化, 包括物种丰富度的降低、群落结构变化和优势种的交替等(Wang et al., 2012)。王强等(2011)对三峡库区水淹初

期的消落带进行了调查, 记录了175种植物, 占蓄水前物种数的43.8%, 一年生植物占比上升至49.7%。Ye等(2013)和Lu等(2010)调查三峡水库蓄水对消落带植物群落的影响发现, 植被以草本植物为主, 多年生向一年生耐受水淹植物演化, 以一年生植物为主要优势种, 木本植物较少。本研究表明, 中华蚊母树群落中伴生物种以禾本科、菊科和豆科最为丰富, 这与大多数三峡库区反季节消落带植物群落调查的结果(孙荣等, 2011; 付娟等, 2015)相似。此外, 自然消落带中华蚊母树群落植物区系以世界分布、泛热带以及北温带分布为主, 生活型谱以一年生或多年生草本以及小灌木为主。中华蚊母树群落物种均可生长在三峡库区河岸带或反季节消落带, 每年会遭受因汛期河水上涨或者三峡库区蓄水而出现的水位涨落扰动, 生境严酷, 不耐水淹且需要长时间完成整个生命周期的植物较难存活, 特别是在水库反

季节消落带, 只有少数多年生草本以及能够在退水后、蓄水前的较短时间内完成生活史的一年生草本植物才能存活, 这些植物次年依靠邻近种源或者土壤种子库或者根茎结构开始新的生命周期, 更容易在干扰剧烈的环境下生存(吕明权等, 2015)。库区水位的涨落、变动频率、持续时间、开始和结束时间及涨落后土壤水分、营养元素等特征也可能在一定程度上影响植物群落的种类组成、多样性及空间分布, 进而对植物生存、生长和繁殖产生影响。

消落带不断受到水淹环境的干扰, 形成了草本植物为主, 木本植物稀少的群落结构特征, 持续的水淹导致消落带群落结构趋于简单化(LaPaix & Freedman, 2010; 张爱英等, 2018), 使得消落带的植物群落在物种组成、群落结构等方面不同于其他相邻的植物群落(刘瑞雪等, 2015)。双向聚类分析可以同时展现物种分布和群落的相似程度。本研究用双向聚类分析将各群落中重要值大于5%的43种植物分为六大类, 从物种的分类(图2)来看, 同一类群物种具有相似的分布情况, 相同类群的植物在24个样方群落内的分布较为相似, 根据物种信息能够较好地反映群落内物种的数量排序, 从常见种、优势种及群落物种组成和多样性等群落结构特征来看, 自然消落带和反季节消落带中华蚊母树群落类型之间存在明显差异, 排序图3B中也可以看出两种生境下的中华蚊母树群落具有不同的生境需求。对各样地物种的重要值进行分析, 结果显示, 在自然消落带群落中, 中华蚊母树的重要值都是调查样方灌木层中最大的, 反映出中华蚊母树在这几个群落中占优势地位, 是群落中的优势种和主要建群种。前期研究表明, 中华蚊母树经历长期水淹后, 仍可保持较高的光合作用, 且排水后仍可恢复至正常水平(Li *et al.*, 2011)。此外, 中华蚊母树具有较大的叶片表型可塑性, 可实现资源的有效利用, 使其能够适应自然消落带长期水淹的恶劣环境, 进而逐步发展为优势种(李晓玲等, 2018)。反季节消落带群落中仅有中华蚊母树一种灌木, 而且草本层的优势种为狗牙根, 这与三峡库区反季节消落带的特殊性有关。反季节消落带长期水淹有利于狗牙根繁殖结构如不定芽的形成, 水落后其种群迅速萌发, 形成更多的分株, 从而成为群落中的优势种(李强等, 2020), 而且狗牙根已经被证实能忍受长时间水淹, 是三峡库区消落带植被恢复的重要物种之一(Chen *et al.*, 2015; 李强

等, 2020)。小株木在自然消落带样地中均有出现, 且在灌木层中的重要值较高, 仅次于中华蚊母树, 说明小株木在某些特性方面与中华蚊母树极为相似。除了狗牙根和小株木外, 长柄竹叶榕、地果、节节草、喜旱莲子草、枫杨、细叶水团花、白茅以及球核莢蒾等也是中华蚊母树群落重要的组成部分, 同样对消落带水位涨落、间歇性水淹的不利环境有一定的适应能力。

3.2 中华蚊母树群落物种多样性及其与土壤环境因子的关系

物种多样性是生物与环境因子长期作用和适应的结果(Hu *et al.*, 2015; 杨振奇等, 2018), 它是指一个群落或生境中物种数目多少以及个体数目的分配情况, 既能体现生物与生物之间、生物与环境之间的复杂关系, 又能体现生物资源的丰富性(君珊等, 2019)。*E*反映群落均匀度, 与海拔呈正相关关系(图3A)。Hillebrand等(2008)认为物种均匀度的提高有利于植物群落结构稳定, 各样地草本层*E*较高, 但差异不显著, 大宁河和古龙溪样地灌木层*E*显著高于其他3个样地, 说明这两个样地群落的物种结构更稳定。*H*代表了一个群落的复杂程度, 群落中生物种类越多, *H*越大, 群落所含的信息量越大。古龙溪样地灌木层和草本层的*H*均最高。CCA分析结果表明, *H*与pH、WFS、OM、APO、TP及TN含量呈显著正相关关系, 其中pH相关性最大, 其次是WFS、OM、APO、TP及TN含量, pH是土壤各理化性质的综合体现, pH过低会影响植物对大量元素的吸收(刘冠成等, 2018), 制约植物的生长发育。Peña等(2011)研究发现山毛榉(*Fagus sylvatica*)群落的物种多样性随土壤pH增加而增加。由此可见, 土壤酸碱度是决定中华蚊母树群落物种多样性丰富的最主要因子, pH与其他土壤营养因子(WFS、OM、APO、TP及TN含量)是共同维持高竞争灌草共存格局的主要因素。

*R*反映群落物种丰富度, 指一个群落或环境中物种数目的多寡, 本研究结果表明, 古龙溪样地灌木层和草本层*R*均最高, 且显著高于自然消落带的其他4个样地, 说明该样地中华蚊母树群落物种数目最为丰富。*R*与TPO和AP含量呈显著正相关关系, 是决定物种丰富度最主要因素。*D*反映了各群落物种数量的变化情况, *D*越大说明群落内物种数量分布越不均匀, 优势种地位越突出, 排序结果表明, *D*与OM、TP、TN、APO等土壤营养元素含量呈密切

负相关关系。沿第1排序轴从左往右, 随着OM、TP、TN、APO等植物生长所必需的营养元素含量增加, 植物能获取的营养越多, 生长越好, 所以群落越复杂, 导致优势种的地位越下降; 在营养物质匮乏时, 能够适应最低限度的营养物质的物种才能存活并繁衍, 在群落分布中占据优势地位, 因而 D 更高。竹子溪北岸、竹子溪南岸和乌江三道拐的 D 较大且差异不显著, 表明这3个地区的优势种中华蚊母树能够利用有限的资源维持自身的存在。

植物群落物种组成分布与土壤环境因子之间的关系已有诸多研究(Ye *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2015)。消落带高程是影响这一地区植被分布的关键因子(罗琰等, 2016), 在不同海拔高度, 植物受到的水淹胁迫程度不同, 因而从低海拔到高海拔, 植被的分布呈现出明显的差异。此外, 一些河岸带和消落带的研究也表明了土壤环境因子在影响植被的分布及组成上起着关键作用(王慧敏等, 2013; Ye *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。从CCA排序图(图3B)来看, 第1排序轴描述了海拔高度和pH对物种分布的影响, 第2排序轴反映了三峡库区土壤理化性质的差异对物种分布的影响。由于不同物种的水淹耐受性不同, 所以它们在消落带上分布也不同, 低海拔地区水淹时间更长, 生境更为严酷, 耐水淹能力相对较差的物种逐渐消亡, 致使群落物种多样性降低, 耐受水淹能力较强的多年生植物或生活史较短的一年生草本更易生存, 逐渐成为该群落的优势种。海拔越高水淹时间相对越短, 更适合生活史较长和较不耐水淹的物种生存。沿第1排序轴从左往右, 海拔逐渐降低, pH不断升高, 分布样地为自然消落带的5个样地以及反季节消落带的万古寺样地。其中, 自然消落带中华蚊母树伴生物种为具有一定水淹耐受性的灌木和多年生草本, 如细叶水团花、小株木、地果、白茅等, 而反季节消落带中伴生物种为具有较强水淹耐受性的多年生草本狗牙根, 以及生活史较短、依靠邻近种源或者土壤种子库开始新生命周期的一年生草本, 如苍耳、水蓼、苘麻等。除海拔高度以外, WFS、TN、OM、TP和APO含量等也对消落带中华蚊母树群落分布有重要的影响。相关研究表明物种多样性较高的地区土壤N:P位于10–14之间(Roem & Berendse, 2000), 本研究调查的24个样方群落土壤N:P均在1.8–2.2之间, 表明消落带植被受到土壤氮的限制。长期水淹会导

致氮的流失(Qui & McComb, 1996; 王培和王超, 2018), 而三峡库区消落带的长期水淹环境使土壤中的氮被释放至水体中, 导致氮含量的降低, 使其成为三峡库区植物生长、繁殖的限制因子, 是导致生物多样性降低的重要原因之一。自然消落带中华蚊母树的伴生种小株木、球核荚蒾、地果、白茅以及反季节消落带的伴生种狗牙根、苍耳、水蓼等物种的适应性强, 对土壤营养元素的要求不高, 能够较好地适应贫瘠的土壤, 逐渐在中华蚊母树群落中占据优势地位, 成为中华蚊母树的主要伴生物种。

3.3 消落带植物群落保护和恢复的建议

消落带周期性水淹会造成土壤的大量流失, 导致植被的严重退化。三峡大坝的修建致使大量土著物种消失, 尤其是乔木和灌木。一年生植物对库岸土壤的固持能力较弱, 蓄水后可能会导致大量营养元素进入水体而使植被进一步衰退(谭淑端等, 2008), 此外, 蓄水后大量植株的死亡和分解可能会导致库区水体的二次污染(Zhang *et al.*, 2013), 而中华蚊母树根系发达、叶片茂密, 具有较强水淹耐受性, 是固土护岸的良好树种, 因此, 它可作为消落带植被恢复备选物种(Sun *et al.*, 2020)。结合前期的研究结果(Xiang *et al.*, 2020), 对中华蚊母树群落的保护和恢复给出如下建议: (1)加强宣传教育力度, 严禁盗伐中华蚊母树。(2)加强原位保存。根据本研究群落物种多样性分析结果, 应优先保护多样性最高的古龙溪群落, 其次是白龙过江、乌江三道拐及竹子溪南岸和北岸的自然群落。(3)加强迁地保护。在迁地收集时应该结合自然消落带种群的群落特征, 保护其资源的同时兼顾物种多样性。(4)加强水库反季节消落带中华蚊母树群落的恢复。根据中华蚊母树群落结构的分析, 现存水库反季节消落带群落优势种为一年生和多年生草本植物, 结合群落双向聚类结果, 在水库消落带高海拔(173–175 m)区域构建恢复群落时增加细叶水团花、小株木、球核荚蒾等小灌木作为伴生物种, 同时由于消落带为氮限制类型土壤, 在人工群落构建时可以考虑豆科植物, 如播撒紫云英种子, 增加土壤氮的供给, 同时APO含量是决定中华蚊母树物种多样性的主要因子, 因此在群落构建时应增加钾的供给, 并对水库消落带植被进行长期监测, 优化群落组成结构, 使中华蚊母树群落保持较高的物种多样性, 从而维持消落带生态系统稳定。

致谢 感谢三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF2018-02)和中国科学院水生植物与流域生态重点实验室开放课题基金(E0520204)对后续的野外调查补充研究工作的部分支持。

参考文献

- Aerts R, de Caluwe H, Beltman B (2003). Is the relation between nutrient supply and biodiversity co-determined by the type of nutrient limitation? *Oikos*, 101, 489-498.
- Bao SD (2000). *Soil Agro-chemical Analysis*. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 3版. 中国农业出版社, 北京.]
- Bergholz K, May F, Giladi I, Ristow M, Ziv Y, Jeltsch F (2017). Environmental heterogeneity drives fine-scale species assembly and functional diversity of annual plants in a semi-arid environment. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 24, 138-146.
- Chen FQ, Zhang JX, Zhang M, Wang JZ (2015). Effect of *Cynodon dactylon* community on the conservation and reinforcement of riparian shallow soil in the Three Gorges Reservoir area. *Ecological Processes*, 4, 3. DOI: 10.1186/s13717-014-0029-2.
- Chen L, Xin JN, Su Y, Li YF, Song NP, Wang L, Yang XG, Bian YY, Tian N (2019). Effects of heterogeneous habitats on community composition and niche characteristics of different plant populations in the desert steppe of China. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 6187-6205. [陈林, 辛佳宁, 苏莹, 李月飞, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 卞莹莹, 田娜 (2019). 异质生境对荒漠草原植物群落组成和种群生态位的影响. 生态学报, 39, 6187-6205.]
- Chen ZL, Yuan XZ, Liu H, Li B (2012). Effects of water level fluctuation on plant communities in the littoral zone of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 21, 672-677. [陈忠礼, 袁兴中, 刘红, 李波 (2012). 水位变动下三峡库区消落带植物群落特征. 长江流域资源与环境, 21, 672-677.]
- Edge RS, Sullivan MJP, Pedley SM, Mossman HL (2019). Species interactions modulate the response of saltmarsh plants to flooding. *Annals of Botany*, 125, 315-324.
- Fan DY, Xiong GM, Zhang AY, Liu X, Xie ZQ, Li ZJ (2015). Effect of water-level regulation on species selection for ecological restoration practice in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 416-432. [樊大勇, 熊高明, 张爱英, 刘曦, 谢宗强, 李兆佳 (2015). 三峡库区水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响. 植物生态学报, 39, 416-432.]
- Fang JY, Wang XP, Shen ZH, Tang ZY, He JS, Yu D, Jiang Y, Wang ZH, Zheng CY, Zhu JL, Guo ZD (2009). Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 17, 533-548. [方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪 (2009). 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 17, 533-548.]
- Fu J, Li XL, Dai ZL, Zhang HF, Luo YH, Xu T, Huang YP (2015). Floristic composition and plant community diversity of water-level fluctuation zone along Xiangxi River, Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 61, 285-290. [付娟, 李晓玲, 戴泽龙, 张海锋, 罗玉红, 胥焘, 黄应平 (2015). 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性. 武汉大学学报(理学版), 61, 285-290.]
- Guisan A, Weiss SB, Weiss AD (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143, 107-122.
- Gundersen P, Laurén A, Finér L, Ring E, Koivusalo H, Sætersdal M, Weslien JO, Sigurdsson BD, Högbom L, Laine J, Hansen K (2010). Environmental services provided from riparian forests in the Nordic countries. *Ambio*, 39, 555-566.
- Guo Y, Yang S, Shen YF, Xiao WF, Cheng RM (2019). Study on the natural distribution characteristics and community species diversity of existing plants in the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 4255-4265. [郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 肖文发, 程瑞梅 (2019). 三峡水库消落带现存植物自然分布特征与群落物种多样性研究. 生态学报, 39, 4255-4265.]
- Hillebrand H, Bennett DM, Cadotte MW (2008). Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. *Ecology*, 89, 1510-1520.
- Hu YX, Huang JL, Du Y, Han PP, Wang JL, Huang W (2015). Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China. *Ecological Engineering*, 74, 274-285.
- Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer TM, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin JN, Guo Q, Hautier Y, Hector A, et al. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526, 574-577.
- Jun S, Wang DB, Zhou JH, Bai XY, Bai K (2019). Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Lhasa River. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 787-798. [君珊, 王东波, 周健华, 白晓宇, 白凯 (2019). 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. 生态学报, 39, 787-798.]
- Langer ER (L), Steward GA, Kimberley MO (2008). Vegetation structure, composition and effect of pine plantation harvesting on riparian buffers in New Zealand. *Forest Ecological and Management*, 256, 949-957.

- LaPaix R, Freedman B (2010). Vegetation structure and composition within urban parks of Halifax Regional Municipality, Nova Scotia, Canada. *Landscape and Urban Planning*, 98, 124-135.
- Li Q, Ding WQ, Wang SM, Zhu QH, Yang J, Ke SQ, Qin L, Yang LJ, Zheng JY, Meng YW (2020). Influence of multi-year high water level running on growth recovery of *Cynodon dactylon* population in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 985-992. [李强, 丁武泉, 王书敏, 朱启红, 杨俊, 柯胜钱, 秦露, 杨林静, 郑捷月, 孟隰雯 (2020). 三峡库区多年高水位运行对消落带狗牙根生长恢复的影响. *生态学报*, 40, 985-992.]
- Li XL, Li N, Yang J, Yang WH, Chen FJ, Zhang ZB (2011). ISSR analysis of genetic diversity of *Distylium chinense* in Hubei Province and conservation strategy. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 31, 38-44. [李晓玲, 李宁, 杨进, 杨文辉, 陈发菊, 张正彬 (2011). 湖北中华蚊母 ISSR遗传多样性分析及保护策略. *西北植物学报*, 31, 38-44.]
- Li XL, Li N, Yang J, Ye FZ, Chen FJ, Chen FQ (2011). Morphological and photosynthetic responses of riparian plant *Distylium chinense* seedlings to simulated autumn and winter flooding in Three Gorges Reservoir Region of the Yangtze River, China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 31-39.
- Li XL, Wen HR, Wang XS, Yang J, Huang CM (2018). Phenotypic plasticity of *Distylium chinense* leaves in relation to soil environmental factors in heterogeneous habitats in the Three Gorges Reservoir Region. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 3581-3591. [李晓玲, 温浩然, 王雪松, 杨进, 黄成名 (2018). 三峡库区不同生境下中华蚊母树叶片表型可塑性及其与土壤环境因子的关系. *生态学报*, 38, 3581-3591.]
- Li Y, Chen ZT, Xia PH, Ge H (2017). Species composition and species diversity of plant community in the water-lever fluctuation zone of Hongfeng Reservoir. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 30, 244-250. [黎杨, 陈忠婷, 夏品华, 葛皓 (2017). 红枫湖水库消落带植物物种组成及群落物种多样性研究. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 30, 244-250.]
- Liu GC, Huang YX, Wang QG, Xing YJ (2018). Effects of environmental factors on plant species diversity: research progress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 34, 83-89. [刘冠成, 黄雅曦, 王庆贵, 邢亚娟 (2018). 环境因子对植物物种多样性的影响研究进展. *中国农学通报*, 34, 83-89.]
- Liu RX, Chen LQ, Shi ZH (2015). Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in the riparian zone of Danjiangkou Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1208-1216. [刘瑞雪, 陈龙清, 史志华 (2015). 丹江口水库水滨带植物群落空间分布及环境解释. *生态学报*, 35, 1208-1216.]
- Liu ZB, Cheng RM, Xiao WF, Guo QS, Wang N (2014). Effect of off-season flooding on growth, photosynthesis, carbohydrate partitioning, and nutrient uptake in *Distylium chinense*. *PLOS ONE*, 9, e107636. DOI: 10.1371/journal.pone.0107636.
- Lu ZJ, Li LF, Jiang MX, Huang HD, Bao DC (2010). Can the soil seed bank contribute to revegetation of the drawdown zone in the Three Gorges Reservoir Region? *Plant Ecology*, 209, 153-165.
- Lundholm JT (2009). Plant species diversity and environmental heterogeneity: spatial scale and competing hypotheses. *Journal of Vegetation Science*, 20, 377-391.
- Luo Y, Su DR, Lv SH, Bu H, He J, Xie JJ (2016). Relationship between plant species diversity of riparian zone in Hui River wetlands and soil factors. *Wetland Science*, 14, 396-402. [罗琰, 苏德荣, 吕世海, 布和, 贺晶, 谢晶杰 (2016). 辉河湿地河岸带植物物种多样性与土壤因子的关系. *湿地科学*, 14, 396-402.]
- Lv MQ, Wu SJ, Chen CD, Jiang Y, Wen ZF, Chen JL, Wang Y, Wang XX, Huang P (2015). A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3504-3518. [吕明权, 吴胜军, 陈春娣, 姜毅, 温兆飞, 陈吉龙, 王雨, 王小晓, 黄平 (2015). 三峡消落带生态系统研究文献计量分析. *生态学报*, 35, 3504-3518.]
- Mc Conigley C, Lally H, O'Callaghan M, O'Dea P, Little D, Kelly-Quinn M (2015). The vegetation communities of unmanaged aquatic buffer zones within conifer plantations in Ireland. *Forest Ecology and Management*, 353, 59-66.
- Peña L, Amezcaga I, Onaindia M (2011). At which spatial scale are plant species composition and diversity affected in beech forests? *Annals of Forest Science*, 68, 1351-1362.
- Qui S, McComb AJ (1996). Drying-induced stimulation of ammonium release and nitrification in reflooded lake sediment. *Marine and Freshwater Research*, 47, 531. DOI: 10.1071/mf9960531.
- Roem WJ, Berendse F (2000). Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities. *Biological Conservation*, 92, 151-161.
- Soliveres S, Maestre FT (2014). Plant-plant interactions, environmental gradients and plant diversity: a global synthesis of community-level studies. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 16, 154-163.
- Sun L, Li XL, Wang XS, Xiang L, Yang J, Min QF, Chen GH, Chen FQ, Huang CM, Wang GX (2020). Growth and respiratory metabolic adaptation strategies of riparian plant *Distylium chinense* to submergence by the field study and controlled experiments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 157, 1-12.
- Sun R, Yuan XZ, Ding JJ (2010). Plant communities in wa-

- ter-level-fluctuating-zone of Baijia Stream in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to 156 m height. *Wetland Science*, 8, 1-7. [孙荣, 袁兴中, 丁佳佳 (2010). 三峡水库蓄水至156 m水位后白夹溪消落带植物群落生态学研究. *湿地科学*, 8, 1-7.]
- Sun R, Yuan XZ, Liu H, Chen ZL, Zhang YW (2011). Floristic composition and species diversity of plant communities along an environment gradient in drawdown area of Three Gorges Reservoir after its initial impounding to the water level of 156 m. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 208-214. [孙荣, 袁兴中, 刘红, 陈忠礼, 张跃伟 (2011). 三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性. *生态学杂志*, 30, 208-214.]
- Tan SD, Wang Y, Zhang QF (2008). Environmental challenges and countermeasures of the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 17, 101-105. [谭淑端, 王勇, 张全发 (2008). 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治. *长江流域资源与环境*, 17, 101-105.]
- Wang HM, Zhang F, Pang CH, Zhao CL, Fan X (2013). Interrelation between plant species diversity and soil factors in the middle and lower reaches of Fenhe River. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33, 2077-2085. [王慧敏, 张峰, 庞春花, 赵彩莉, 范晓 (2013). 汾河流域中下游植物群落物种多样性与土壤因子的关系. *西北植物学报*, 33, 2077-2085.]
- Wang P, Wang C (2018). Study on restoration of vegetation community in water-level-fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 49, 11-14. [王培, 王超 (2018). 丹江口水库消落带植被群落恢复模式研究. *人民长江*, 49, 11-14.]
- Wang Q, Yuan XZ, Liu H, Zhang YW, Chen ZL, Li B (2011). Effect of initial impoundment on the vegetation and species diversity in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Natural Resources*, 26, 1680-1693. [王强, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 陈忠礼, 李波 (2011). 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响. *自然资源学报*, 26, 1680-1693.]
- Wang Q, Yuan XZ, Liu H, Zhang YW, Cheng ZL, Li B (2012). Effect of long-term winter flooding on the vascular flora in the drawdown area of the Three Georges Reservoir, China. *Polish Journal of Ecology*, 60, 95-106.
- Wang Y, Li EH, Wu JQ (2002). A preliminary study on the vascular plant flora of the water-level-fluctuating zone in the Three-Gorge Reservoir Area. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 20, 265-274. [王勇, 厉恩华, 吴金清 (2002). 三峡库区消落带维管植物区系的初步研究. *武汉植物学研究*, 20, 265-274.]
- Wu ZY, Sun H, Zhou ZK, Li DZ, Peng H (2011). *Floristic Geography of Seed Plants in China*. Science Press, Beijing. [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.]
- Xiang L, Li XL, Wang XS, Yang J, Lv K, Xiong ZQ, Chen FQ, Huang CM (2020). Genetic diversity and population structure of *Distylium chinense* revealed by ISSR and SRAP analysis in the Three Gorges Reservoir Region of the Yangtze River, China. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00805. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00805.
- Xu YJ, Lin DM, Shi M, Xie YJ, Wang YZ, Guan ZH, Xiang JY (2017). Spatial heterogeneity and its causes in evergreen broad-leaved forests in the Ailao Mountains, Yunnan Province. *Biodiversity Science*, 25, 23-33. [徐远杰, 林敦梅, 石明, 谢妍洁, 王逸之, 管振华, 向建英 (2017). 云南哀牢山常绿阔叶林的空间分异及其影响因素. *生物多样性*, 25, 23-33.]
- Yang ZQ, Qin FC, Zhang XN, Li XQ, Niu XL, Liu LC (2018). Environmental interpretation of herb species diversity under different site types of *Hippophae rhamnoides* forest in feldspathic sandstone region. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5132-5140. [杨振奇, 秦富仓, 张晓娜, 李晓琴, 牛晓乐, 刘力川 (2018). 砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释. *生态学报*, 38, 5132-5140.]
- Ye C, Zhang KR, Deng Q, Zhang QF (2013). Plant communities in relation to flooding and soil characteristics in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 1794-1802.
- Zhang AY, Xiong GM, Fan DY, Yang D, Xie ZQ (2018). Effects of Three Gorges Dam on riparian vascular plants of the main stream of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27, 145-156. [张爱英, 熊高明, 樊大勇, 杨丹, 谢宗强 (2018). 三峡水库蓄水对长江干流河岸植物组成的影响. *长江流域资源与环境*, 27, 145-156.]
- Zhang ZY, Chang HT, Endress PK (2003). *Hamamelidaceae*/Wu ZY, Raven PH, Hong DY. *Flora of China*. Science Press, Beijing.
- Zhang ZY, Wan CY, Zheng ZW, Hu L, Feng K, Chang JB, Xie P (2013). Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7080-7091.

责任编辑: 曾波 编辑: 赵航