

信阳市南湾湖消落带冬季植物群落结构及物种多样性

吴昊^{1,2,3}, 冯川川¹, 马铭阳¹, 饶本强^{1*}

(1. 信阳师范大学生命科学学院, 河南 信阳 464000;
2. 河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 郑州 450046;
3. 信阳生态研究院, 河南 信阳 464000)

摘要: 2023年冬季在信阳市南湾湖消落带内设置12个样地,对其植物组成、分布及物种多样性进行了调查分析,并采用回归分析和除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)等方法,探讨干扰程度及外来种入侵对消落带冬季植物群落的影响。结果表明:①12个样地共记录植物40种,隶属于15科32属,菊科、禾本科、莎草科和蔷薇科的物种丰富度较高。总重要值大于0.5的优势种依次为空心莲子草、芦苇、一年蓬、石龙芮、野老鹳草和苏门白酒草,入侵植物常形成密集的单优势种群落。②群落的Patrick指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数及Pielou指数的平均值分别为7.083、1.643、0.758和0.860,4项指数的变异系数均介于0.1~1.0。中等程度的人为干扰有助于提升植物多样性,而空心莲子草入侵显著削弱了植物多样性。③DCA排序将群落物种划分为伏地生长型、根系发达型、植株高大型和水分依赖型等4个种组,各入侵植物间的生态距离较远,功能性状分化有助于其协同入侵。冬季南湾湖消落带的植物群落结构相对简单,部分物种斑块化分布程度过高,建议通过优化水位调控和人工补植本土生态修复类植物的途径来提升其群落结构稳定性。

关键词: 消落带; 植物组成; 多样性指数; DCA排序; 南湾湖

中图分类号: S45; Q948.15

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Plant community structures and species diversity of the Nanwan Lake riparian zone within Xinyang city in winter

WU Hao^{1,2,3}, FENG Chuanchuan¹, MA Mingyang¹, RAO Benqiang^{1*}

(1. College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;
2. Henan Dabieshan National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Zhengzhou 450046, China;
3. Xinyang Academy of Ecological Research, Xinyang 464000, China)

Abstract: In the winter of 2023, 12 plots were established within the riparian zone of Nanwan Lake in Xinyang city, for investigating and analyzing the plant composition, distribution, and species diversity. Regression analysis and detrended correspondence analysis (DCA) were also used to examine the impact of disturbance levels and invasive alien species on the plant community in riparian zone. The results showed that: ① A total of 40 plant species belonging to 15 families and 32 genera were recorded in the 12 plots, with high species richness in the Compositae, Gramineae, Cyperaceae, and Rosaceae. The dominant species with a total importance value >0.5 were *Alternanthera philoxeroides*, *Phragmites australis*, *Erigeron annuus*, *Ranunculus sceleratus*, *Geranium carolinianum*, and *Erigeron sumatrensis*, and the invasive plants formed dense single-dominant communities. ② The average values of the Patrick index, Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou index for the plant

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-03-16; * 通信联系人, E-mail: rbqxy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800460); 河南省科技攻关计划项目(232102110062); 河南省高等学校重点科研项目(24A180028); 信阳生态研究院开放基金项目(2013XYMS16); 信阳师范大学“南湖学者”奖励计划青年项目(2023A017)

作者简介: 吴昊(1986—), 男, 河南光山人, 副教授, 博士, 主要从事入侵生态学和群落生态学研究; 饶本强(1974—), 男, 河南光山人, 教授, 博士, 主要从事土壤生态学和生理生态学研究。

引用格式: 吴昊, 冯川川, 马铭阳, 等. 信阳市南湾湖消落带冬季植物群落结构及物种多样性[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 117-128.

WU Hao, FENG Chuanchuan, MA Mingyang, et al. Plant community structures and species diversity of the Nanwan Lake riparian zone within Xinyang city in winter[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 117-128.

community were 7.083, 1.643, 0.758, and 0.860, respectively. The coefficients of variation for all these four indices were between 0.1 and 1.0. Moderate human disturbance could help increase plant diversity, while the *A. philoxeroides* invasion significantly weakened diversity. ③ The DCA ordination divided the plant species into four groups: ground-growing, root-developed, tall-growing, and water-dependent. The ecological distance between each invasive plant species was relatively far, and the differentiation of functional traits contributed to their collaborative invasion. In conclusion, the plant community structure in riparian zone of Nanwan Lake in winter was relatively simple, with some species exhibiting overly fragmented distribution. These suggest that the stability of the community structure can be enhanced by optimizing water level regulation and artificially replanting native ecological restoration plants.

Key words: riparian zone; plant composition; diversity index; DCA ordination; Nanwan Lake

0 引言

消落带是河流、湖泊或水库水位周期性变化形成的干湿交错区^[1],其物质交换强烈,营造出具有独特生态功能的生境,区内植物种类组成、分布格局及物种多样性具有较大时空差异^[2]。消落带植物沿水位梯度呈现分层特征,多样化的生境也使得消落带植物生态位分化明显,且其对环境波动具有异质性响应^[3-4]。三峡库区消落带内植物种类以禾本科、菊科和莎草科等为主,生活型以一年生草本植物为主^[5]。在近水区域,易形成耐水淹的单一草本植物群系,其种群可通过促进地下茎物质储存及增强光合叶面积等途径拓展适生区^[6],但长时间的水淹环境下,多年生草本植物可依靠克隆繁殖及发达的通气组织成为优势物种^[7]。三峡库区消落带草本植物主要以根部、茎部和叶片形态变化来适应水淹和干旱胁迫,而木本植物则以根部形态变化为主,二者对环境胁迫的响应存在组织特异性差异^[8]。此外,人为干扰严重削弱消落带的植物多样性,导致本土群落遭受多种外来植物入侵威胁^[9]。探究消落带的植物组成及多样性状况,有助于维护湿地生态系统稳定性及其服务功能。

当前气候变暖趋势日益加剧,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental panel on climate change, IPCC)第六次评估报告表明,全球地表温度比工业革命时期上升了 1.09 °C,且未来 20 年全球温升将达到或超过 1.5 °C^[10]。全球变暖背景下,冬季气温升高可能导致消落带植物在枯水期面临的环境胁迫加剧,使得群落物种固有的生态位及种间关系发生改变^[1, 11]。研究发现,冬季气温升高可使三峡消落带部分植物表现出“补偿生长”策略,促使其在短暂的干湿交替期迅速恢复

生长,但极端水淹压力仍对耐寒植物种群构成威胁,而狗牙根等耐淹植物在冬季回暖退水期间恢复生长,表现出明显的生态适应性^[12]。冬季水位和气温变化可导致耐湿、耐淹植物逐渐成为优势种群,而一些植物在长期水淹下逐步消失^[13]。此外,消落带内的部分植物通过土壤种子库途径存留种子以应对季节性水淹,土壤种子库在消落带冬季水位波动中起到关键作用,其可使植物在退水期迅速占据裸露土地,为群落再构建过程提供基础^[14-15]。因此,探讨消落带冬季植物群落结构可为阐明全球气候变化下的湿地生物多样性维持机制提供理论依据。

南湾湖位于河南省信阳市西南部,是淮河流域重要的水源地水库之一^[16]。南湾湖消落带植物作为该区生态系统功能的主要载体,在保护生物多样性、调节气候和提供旅游资源等方面具有关键作用,其生态状况受到广泛关注^[17]。已有关于南湾湖消落带植被的研究表明,在春、夏生长旺季,消落带内菊科、禾本科和豆科植物的物种丰富度较高,海拔和水位显著影响其物种多样性^[18];消落带内分布广泛的入侵植物有一年蓬、苏门白酒草、加拿大一枝黄花和大狼把草等,湿地多功能性开发与旅游业发展为植物入侵提供了条件^[17]。但目前关于南湾湖消落带冬季植物群落特征的研究尚未见报道。本研究通过野外调查并结合数量生态学技术,探究冬季南湾湖消落带植物组成、物种多样性及其与干扰因子的耦合关系,以期为该区植物多样性保护及生态评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南湾湖位于河南省信阳市浉河区,地处大别山北麓,地理坐标为东经 113°41′—114°02′,北纬

31°43'—32°11',是信阳市重要的饮用水源地和生态保护区,有“中原第一湖”之称。该区域属于北亚热带向暖温带过渡地带,四季分明,气候温暖湿润,水域面积约 25.06 km²,年均降水量 990~1200 mm,多集中于 6—8 月,年均气温 15.3 °C,年平均无霜期约为 225 d^[17]。南湾湖消落带内优势植物主要为菊科、禾本科和莎草科物种,同时该区域也分布有空心莲子草、一年蓬等多类外来植物,这些入侵种的快速扩散对消落带内本土群落多样性及稳定性构成威胁^[19]。

1.2 样地设置

2023 年 12 月 13 日—20 日,对南湾湖消落带植物分布状况进行踏查,采用典型取样法在植被盖度较高的区域设置 12 调查样地(图 1)。每个样地规格为 3 m×3 m,在各样地中央均匀布设 3 条 3 m 长的样带,沿每条样带均匀设置 3 个规格为 0.5 m×0.5 m 的小样方进行植物群落特征调查。调查点涵盖了消落带内不同干扰强度的生境,以综合反映研究区植物群落分布特征及其适应策略(表 1)。

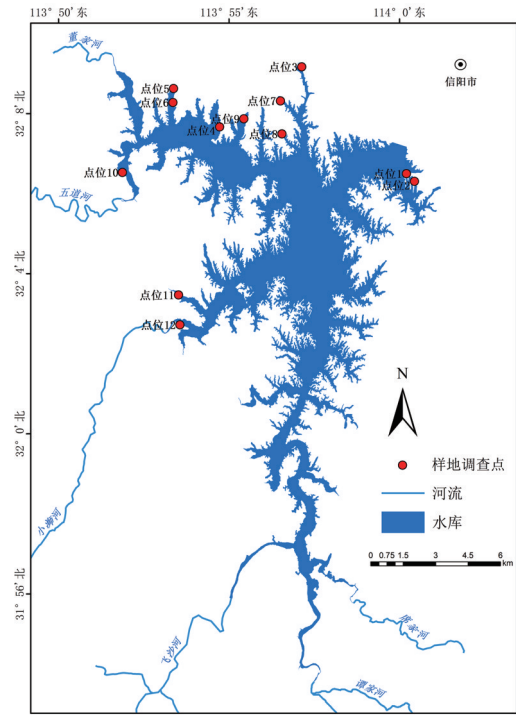


图 1 研究区调查样地分布

Fig. 1 Distributions of sampling plot in the study area

表 1 研究区调查样地概况

Tab. 1 Overview of sampling plot in the study area

样地号	经度	纬度	海拔/m	生境类型	人为干扰程度	植被盖度/%
1	E 114°00.330 9'	N 32°06.767 8'	109	水库-茶山结合区	中度	21
2	E 114°00.573 0'	N 32°06.581 3'	101	水库-茶山结合区	重度	34
3	E 113°57.172 1'	N 32°09.363 8'	105	水库边湿地	重度	67
4	E 113°54.812 8'	N 32°07.805 8'	134	水库边湿地	轻度	40
5	E 113°53.430 2'	N 32°08.729 1'	110	水库-茶山结合区	轻度	41
6	E 113°53.423 0'	N 32°08.380 0'	92	水库-茶山结合区	中度	59
7	E 113°56.574 2'	N 32°08.497 9'	124	水库-茶山结合区	中度	43
8	E 113°56.646 5'	N 32°07.673 6'	97	水库-茶山结合区	中度	44
9	E 113°55.515 4'	N 32°08.023 9'	114	水库边湿地	轻度	37
10	E 113°52.003 5'	N 32°06.596 5'	115	水库-茶山结合区	重度	31
11	E 113°53.750 3'	N 32°03.576 8'	94	水库-茶山结合区	中度	29
12	E 113°53.816 5'	N 32°02.832 6'	107	水库-茶山结合区	重度	40

1.3 野外调查

调查时,记录每个样方中各植物物种的名称、盖度、高度和株数。利用具有 100 分格的 0.5 m×0.5 m 样方测量植物盖度。每种植物随机选取 6 株,以卷尺测量其高度并求平均值(种群数量小于 6 株则全部测量)。对于禾本科植物,统计其分蘖数;对于非禾本科植物,统计其个体数;对于克隆型植物,统计其无性分枝数^[20]。使用手持式 GPS

定位仪记录各样地生境的经度、纬度和海拔数据。

1.4 数理统计

1.4.1 指标计算

相对重要值(IV)=(相对盖度+相对高度+相对多度)/3;某种植物的总重要值即为所有调查样地中该物种的相对重要值之和^[20]。

Patrick 丰富度指数(R)、Simpson 多样性指数(λ)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀

度指数(E)等 4 项 α -物种多样性指数按如下公式计算。

$$R = S;$$

$$\lambda = 1 - \sum P_i^2;$$

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

$$E = H / \ln S,$$

式中: S 为每个样地中植物物种总数, P_i 为样地中第 i 种植物的相对重要值^[20]。

1.4.2 数据分析

分别计算 4 项 α -物种多样性指数的平均值、标准差和变异系数。利用 SPSS 16.0 软件对空心莲子草入侵重要值与各多样性指数进行回归分析,以该软件提供的 11 种曲线方程建立回归模型并检验其显著性,选择回归显著($P < 0.05$)且拟合系数最大者进行讨论。建立 12×40 的物种重要值矩阵,利用 Canoco 4.5 软件分别对样地分布和物种分布进行除趋势对应分析(De-trended correspondence analysis, DCA),并使用 CanoDraw 功能绘制 DCA 二维排序图。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成

野外调查共记录植物 40 种,隶属于 15 科 32 属。其中,物种丰富度较高的科为:菊科 5 属 8 种、禾本科 5 属 6 种、莎草科 2 属 4 种和蔷薇科 4 属 4 种(表 2)。群落植物组成以本土物种为主,但也存在一些外来入侵物种,如苏门白酒草、一年蓬、大狼把草、白花车轴草、粉绿狐尾藻、空心莲子草和节节草等。这些入侵种在部分区域形成较为密集的单优势种群落,甚至形成空心莲子草+一年蓬(1 号样地)、一年蓬+苏门白酒草(9 号样地)、空心莲子草+白花车轴草+苏门白酒草(3 号样地)等共生入侵群落,对研究区植物群落物种多样性及稳定性构成威胁。

2.2 植物形态特征

研究区群落的植物形态特征如图 2 所示。60 个样方中,出现频次较高的物种依次为空心莲子草(16 次)、一年蓬(11 次)、苏门白酒草(10 次)和芦苇(7 次)等;单位面积(0.25 m^2)内多度较高的物种依次为白花车轴草(34 株)、野老鹳草(30 株)、黄花蒿(28 株)、五节芒(28 株)和粉绿狐尾藻(26 株)、石龙芮(25 株)和空心莲子草(25 株)等;盖度较高的物种依次为红果黄鹳菜(78%)、芦竹(78%)、芦苇

表 2 研究区植物群落的物种组成

Tab. 2 Species composition of plant communities in the study area

科	属	种	拉丁名
菊科	蒿属	黄花蒿	<i>Artemisia annua</i>
		中南蒿	<i>Artemisia simulans</i>
	黄鹳菜属	红果黄鹳菜	<i>Youngia erythrocarpa</i>
		黄鹳菜	<i>Youngia japonica</i>
	飞蓬属	苏门白酒草	<i>Erigeron sumatrensis</i>
		一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>
苦苣菜属	花叶滇苦菜	<i>Sonchus asper</i>	
鬼针草属	大狼把草	<i>Bidens frondosa</i>	
禾本科	芒属	芒	<i>Miscanthus sinensis</i>
		五节芒	<i>Miscanthus floridulus</i>
	狗尾草属	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>
	狼尾草属	狼尾草	<i>Pennisetum alopecuroides</i>
	芦苇属	芦苇	<i>Phragmites australis</i>
	芦竹属	芦竹	<i>Arundo donax</i>
莎草科	薹草属	舌叶薹草	<i>Carex ligulata</i>
		阿齐薹草	<i>Carex argyi</i>
		二形鳞薹草	<i>Carex dimorpholepis</i>
	莎草属	香附子	<i>Cyperus rotundus</i>
蔷薇科	蛇莓属	蛇莓	<i>Duchesnea indica</i>
	蔷薇属	野蔷薇	<i>Rosa multiflora</i>
	龙芽草属	龙芽草	<i>Agrimonia pilosa</i>
	委陵菜属	蛇含委陵菜	<i>Potentilla sundaica</i>
唇形科	鼠尾草属	荔枝草	<i>Salvia plebeia</i>
	风轮菜属	风轮菜	<i>Clinopodium chinense</i>
	益母草属	益母草	<i>Leonurus japonicus</i>
毛茛科	毛茛属	石龙芮	<i>Ranunculus sceleratus</i>
		禺毛茛	<i>Ranunculus cantoniensis</i>
	天葵属	天葵	<i>Semiaquilegia adoxoides</i>
蓼科	蓼属	马蓼	<i>Persicaria maculosa</i>
	酸模属	皱叶酸模	<i>Rumex crispus</i>
		酸模	<i>Rumex acetosa</i>
豆科	野豌豆属	救荒野豌豆	<i>Vicia sativa</i>
	车轴草属	白花车轴草	<i>Trifolium repens</i>
小二仙草科	狐尾藻属	粉绿狐尾藻	<i>Myriophyllum aquaticum</i>
苋科	莲子草属	空心莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i>
石竹科	鹅肠菜属	鹅肠菜	<i>Myosoton aquaticum</i>
伞形科	窃衣属	窃衣	<i>Torilis scabra</i>
茄科	茄属	龙葵	<i>Solanum nigrum</i>
木贼科	木贼属	节节草	<i>Equisetum ramosissimum</i>
牻牛儿苗科	老鹳草属	野老鹳草	<i>Geranium carolinianum</i>

(78%)、五节芒(76%)、白花车轴草(76%)和粉绿狐尾藻(75%)等;株高较大的物种依次为芦竹(168 cm)、芦苇(135 cm)、五节芒(134 cm)和芒(125 cm)等。

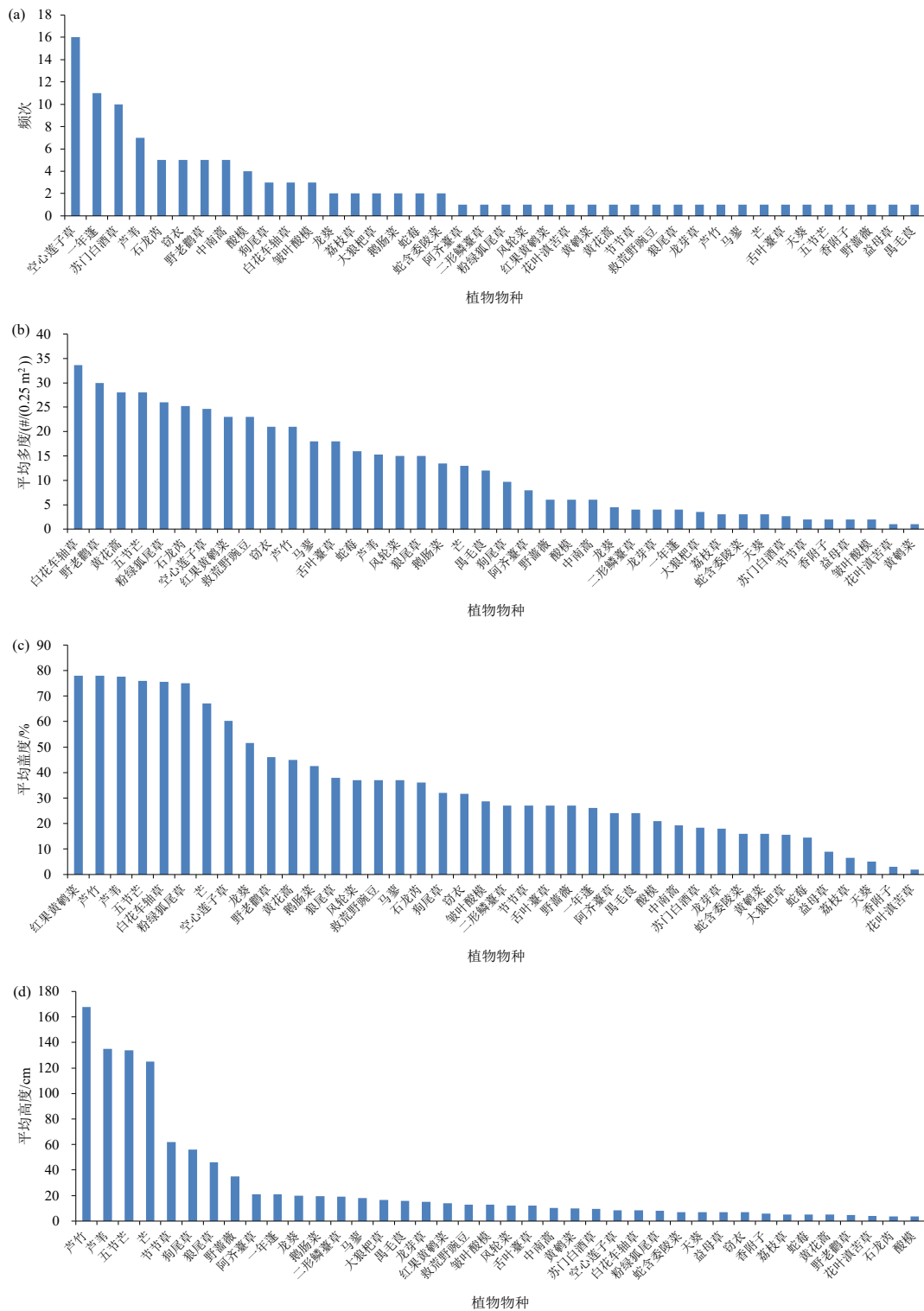


图2 研究区40种植物的形态特征指标值

Fig. 2 Morphological traits values of 40 plant species in the study area

12个样地中各植物的总IV介于0.014~2.210,数值差距较大,总IV<0.100的植物有14种,0.100≤总IV<0.500的植物有20种,总IV≥0.500的植物有6种。其中,空心莲子草(总IV=

2.210)和芦苇(总IV=2.041)的优势度远高于其他植物,表明它们为研究区植物群落中的优势物种(图3)。此外,入侵植物一年蓬(总IV=0.837)、苏门白酒草(总IV=0.504)、白花车轴草(总IV=

0.498)、大狼把草(总 IV=0.234)和粉绿狐尾藻(总 IV=0.160)也具有较高优势度。总 IV 排名前 10

位植物的野外生境如图 4 所示。

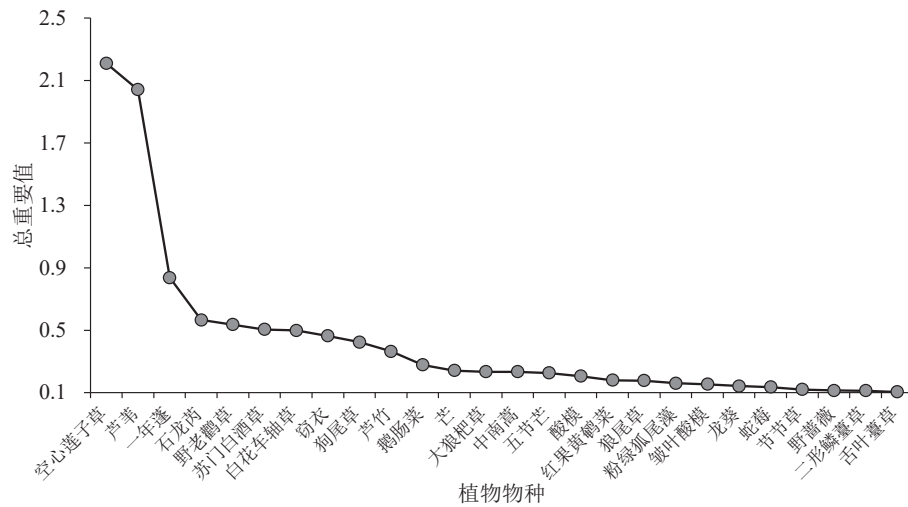
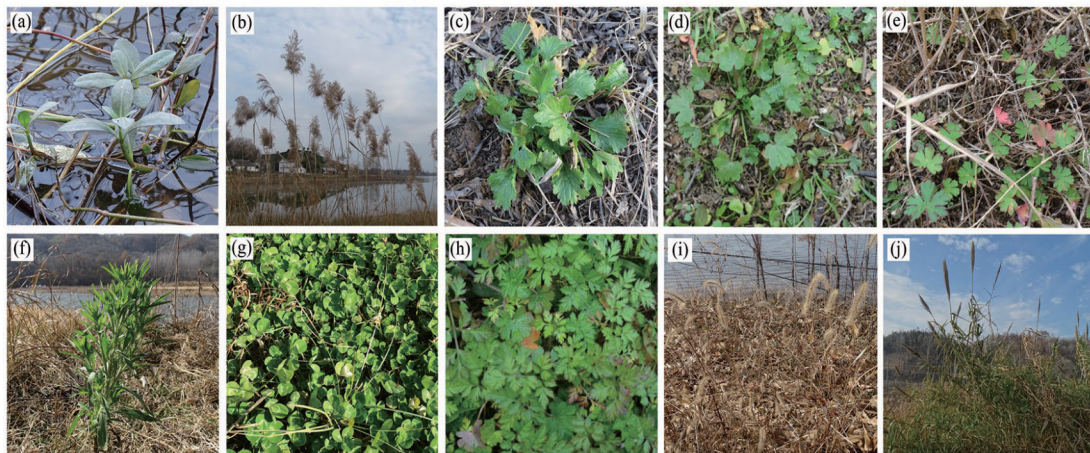


图 3 研究区优势植物物种的总重要值

Fig. 3 The total importance value of dominant plant species in the study area



注 a—j 分别为空心莲子草、芦苇、一年蓬、石龙芮、野老鹳草、苏门白酒草、白花车轴草、窃衣、狗尾草和芦竹。

图 4 研究区总重要值排名前 10 位植物的野外生境图

Fig. 4 Field habitats of the plant species with top 10 total importance value in the study area

2.3 物种多样性

研究区植物群落的 Patrick 丰富度指数值介于 4.000~11.000,平均值为 7.083;Shannon-Wiener 多样性指数值介于 0.893~2.189,平均值为 1.643;Simpson 多样性指数值介于 0.497~0.866,平均值为 0.758;Pielou 均匀度指数值介于 0.555~0.968,平均值为 0.860。4 项指数的变异系数值均处于 0.100~1.000,呈中等程度空间变异,其中,Patrick 丰富度指数的变异程度(c. v. =0.353)相对较高(表 3)。

随着人为干扰程度增加,Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈现出明显的

“先上升后下降”凸型变化模式,表明植物群落在中等干扰程度下具有较高的物种丰富度和多样性水平,但人为干扰程度并未显著影响群落的 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数(图 5)。

对优势种空心莲子草的入侵重要值与群落 4 项 α -多样性指数进行回归分析,结果表明,空心莲子草重要值与 Shannon-Wiener 指数($R^2=0.425, P=0.022$)、Simpson 指数($R^2=0.593, P=0.003$)、Pielou 指数($R^2=0.628, P=0.002$)之间均具有显著或极显著的指数函数拟合关系,随着空心莲子草入侵程度增加,群落的多样性及均匀度均下降(图 6(b)、(c)、(d)),但空心莲子草入侵未对

Patrick 丰富度指数产生显著影响(图 6(a))。

表 3 研究区植物群落的物种多样性

Tab. 3 Species diversity of plant communities in the study area

样地号	R	H	λ	E
1	10.000	2.082	0.855	0.904
2	5.000	0.893	0.497	0.555
3	5.000	1.471	0.734	0.914
4	5.000	1.264	0.678	0.785
5	6.000	1.638	0.778	0.914
6	5.000	1.400	0.724	0.870
7	10.000	2.044	0.846	0.888
8	7.000	1.503	0.732	0.772
9	7.000	1.884	0.840	0.968
10	4.000	1.316	0.712	0.949
11	10.000	2.034	0.840	0.883
12	11.000	2.189	0.866	0.913
平均值	7.083	1.643	0.758	0.860
标准差	2.503	0.403	0.105	0.112
变异系数	0.353	0.245	0.139	0.130

2.4 DCA 排序

沿着人为干扰程度梯度,12 个调查样地在 DCA 二维排序图中被划分为 3 个分布区,依次对应轻度人为干扰、中度人为干扰和重度人为干扰(图 7(a))。其中,重度人为干扰样地分布区与其

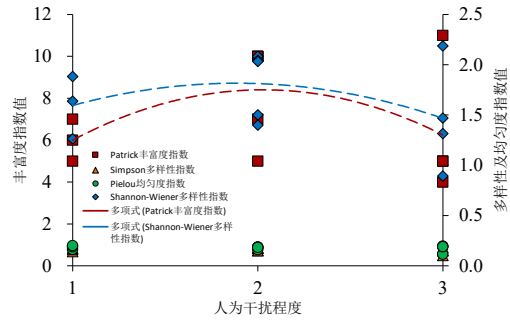


图 5 不同人为干扰程度的样地中 4 项多样性指数变化趋势

Fig. 5 Trends of four diversity indices in plots with different levels of human interference

他分布区的距离较远,表明重度人为干扰样地的群落特征明显异于其他样地。通过对比植物组成可知,重度人为干扰样地中外来入侵种空心莲子草、白花车轴草和苏门白酒草的出现频次及重要值均明显升高。

在 DCA 二维排序图中,40 种植物物种被划分为界限明显的 4 类种组(图 7(b))。其中,种组 I 包含空心莲子草、荔枝草、香附和花叶滇苦菜等 4 种植物;种组 II 包含芦苇、狗尾草、五节芒和皱叶酸模等 13 种植物;种组 III 包含一年蓬、苏门白酒草、芦竹和芒等 14 种植物;种组 IV 包含石龙芮、酸模、粉绿狐尾藻和二形鳞藁草等 9 种植物。结合植物功能性状,4 类种组依次命名为:种组 I——伏

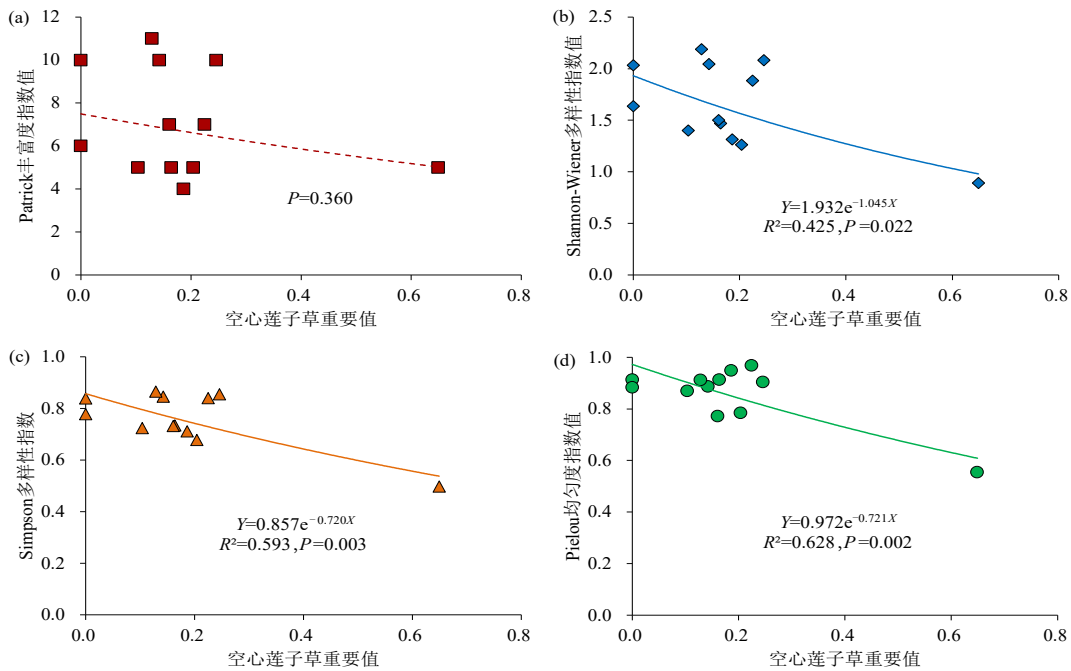


图 6 空心莲子草入侵重要值与 4 项多样性指数的回归拟合

Fig. 6 Regression fitting between *A. philoxeroides* invasion IV and four diversity indices

地生长型,种组 II——根系发达型,种组 III——植株高大型,种组 IV——水分依赖型。各入侵植物在 DCA 二维排序图中多分散于不同区域,表明其

生态位重叠程度低,存在较高的生态位分化,有利于物种广泛共存。

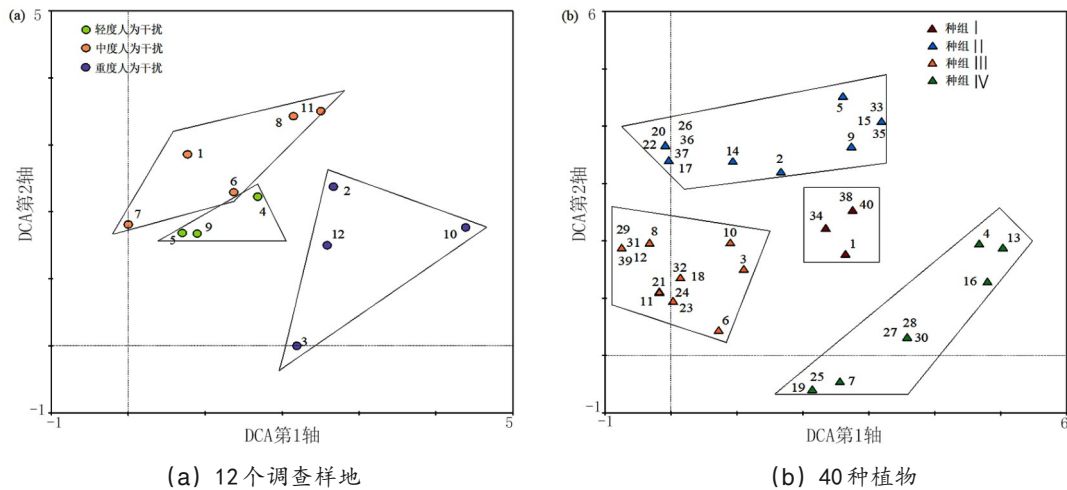


图 7 研究区的 DCA 二维排序图

Fig. 7 Two-dimensional DCA ordination diagrams of the study area

3 讨论

南湾湖消落带冬季植物群落组成以菊科、禾本科、莎草科和蔷薇科等物种为主,这些植物凭借耐干旱、繁殖能力强和发达根系等特性,能够在干湿交替环境中保持较高生存能力^[1]。相较于夏季,研究区冬季优势物种发生了由豆科到蔷薇科和莎草科的转换^[19]。由于季节性水淹和干旱,消落带植物以耐胁迫和能快速完成生活史的物种为主^[21],在局部区域,外来入侵植物形成优势种群,甚至出现共生入侵现象,这是因为入侵植物具备较高的生长速率及资源利用效率,其在资源脉冲环境下迅速扩展,显著压制本土植物^[9,22]。如:空心莲子草通过快速繁殖占据空间,而苏门白酒草和一年蓬则依靠产生大量种子及较高的生态适应性在消落带中与本土植物竞争资源^[23],且这些入侵种还能产生抑制本土植物生长的化感物质^[24]。入侵植物之间则通过功能性状分化降低了竞争强度(如空心莲子草占据低层空间,一年蓬则竞争上层光资源),从而更加削弱本土植物多样性,这符合“生态位分化假说”和“竞争排除原理”^[25]。

环境适应性表征了生态位分化程度,使得不同植物能够充分利用异质性资源,避免过多种间竞争,从而有助于维持群落稳定性^[26]。研究区植物群落中,频次和多度较高的物种表现出显著的

生态适应性,如红果黄鹌菜、空心莲子草和白花车轴草等形成高密度种群,这主要得益于其快速繁殖能力和高效资源利用特性^[27]。高盖度植物通过密集的植被覆盖抑制其他植物生存,株型高大的植物则凭借其对于上层光资源的竞争优势迅速占据生态位。不同的资源分配策略既优化了群落内植物的资源利用效率,又降低了种间竞争强度,使得多类植物在消落带中共存并形成不同分布格局^[28],如本土植物芦苇和五节芒等具有深根性和高大株型等优势,在外来植物入侵生境中仍可表现出强竞争力并构建单优势种群落,这种形态优势在其适应消落带特殊环境及群落构建中发挥了重要作用^[29]。

南湾湖消落带 4 项多样性指数值呈中等程度空间变异,表明其植物多样性水平具有一定程度波动,物种生活型受到异质性生境影响,存在沿着水淹梯度逐渐由杂草型对策(R 对策)向胁迫忍耐型对策(S 对策)的转变^[30]。而人为干扰和植物入侵进一步加剧了物种多样性的空间变异,尤其在在不同干扰强度样地中表现突出。Patrick 指数和 Shannon-Wiener 指数在中度干扰程度下具有最大值,这支持“中度干扰假说”,即适度干扰通过减少竞争优势种的资源垄断,可创造出更多生态位从而促进植物共存^[13]。但重度干扰下植物多样性显著下降,群落结构趋于单一化,表明强干扰筛选出

了对于环境波动适应性强的植物(如空心莲子草等),而耐受性较差的本地植物则逐步在群落中消失,这也与关于群落构建的“环境过滤机制”相吻合^[31-32]。类似研究表明,对三峡库区消落带的中度干扰增加了其植物多样性,强干扰则会加剧入侵植物拓展而导致多样性下降^[33]。进一步证实了适度干扰对于群落多样性的正向效应,但也需重视强干扰对于群落稳定性的威胁。空心莲子草重要值与多样性指数和均匀度指数均呈显著负向关系,表明其入侵蔓延严重削弱了消落带植物多样性水平。但空心莲子草入侵对 Patrick 指数无显著影响,可能是因为冬季植物群落物种组成相对简单,故植物入侵仅改变了本土群落的物种丰富度及分布状况,而对物种丰富度影响较小,吴昊^[34]也发现,空心莲子草虽抑制了本地植物生长,但并未直接导致局部物种消失。

重度干扰样地中,入侵植物凭借其快速扩展能力和高资源利用效率,在干扰条件下主导群落构建过程,使其从多样化的群落类型趋于单优势种群落^[25]。研究区植物基于功能性状分为伏地生长型、根系发达型、植株高大型和水分依赖型等四个种组,表明消落带植物可通过调控其对于光照、水分及养分的分配与利用策略,优化整体资源的利用效率,从而实现共存^[35]。DCA 排序表明,群落中入侵植物多分布于不同区域,这与“生态位分化理论”和“入侵崩溃理论”相符合,即多类入侵植物在功能性状及对资源的选择性利用方面存在差异性,这既增强了入侵植物的扩散能力,又使得入侵植物之间相互促进从而加剧入侵^[36-37]。入侵植物的这种分化策略也有助于其在消落带中广泛共存,但进一步挤压了本地植物的生存空间。相较于其他生境类型,消落带内水位波动和周期性干湿交替带来了更为频繁的环境扰动,使得该区植物群落遭受外界干扰及其响应模式更为复杂^[38]。

受气候条件、水位波动和植被生长周期的影响,冬季消落带的植物组成、群落特征及多样性与生长季明显不同。冬季气温较低,多数植物在库

区水位退去后进入休眠,一年生植物选择以种子库形式越冬,故冬季消落带群落主要由耐干旱的多年生草本植物构成^[29],入侵植物则凭借其强大的生态可塑性形成单优势群落,抑制本土植物生长^[3]。相关研究也表明,冬季消落带植物群落组成及结构相较于夏季更为简单,其物种丰富度和多样性均较低,入侵植物的优势地位更为突出^[39]。此外,冬季水位降低导致湿地土壤长期裸露,适合耐旱性植物建群,进一步加剧了消落带群落特征的季节性差异^[40]。全球变暖背景下,冬季气温升高延长了植物的生长周期,多种入侵植物可能提前萌发或持续生长,提升对消落带内本土植物的种间竞争能力^[20]。因此,未来应加强对冬季南湾湖消落带中外来植物重度入侵区的生态监测,优化水位调控,降低冬季裸露地表面积并强化土壤和水文管理,采用抗寒性本土植物进行替代性修复,以增强消落带群落稳定性及其生态系统的自我调节功能^[15]。

4 结论

冬季南湾湖消落带共记录植物 40 种,丰富度较高的科为菊科、禾本科、莎草科和蔷薇科,总重要值大于 0.5 的优势植物依次为空心莲子草、芦苇、一年蓬、石龙芮、野老鹳草和苏门白草。部分物种的斑块化分布程度过高,如空心莲子草、芦苇、芦竹等常形成大面积单优势种群落。群落 4 项 α -物种多样性指数均呈中等程度空间变异,其丰富度和多样性随人为干扰程度增加呈“先上升-后下降”变化模式,而其多样性及均匀度随空心莲子草入侵程度增加而显著下降。DCA 排序将消落带植物划分为伏地生长型、根系发达型、植株高大型和水分依赖型等 4 个种组,各入侵植物间存在较高程度生态位分化,有利于其协同入侵。未来亟须加强冬季植物入侵区的群落动态监控,可考虑采用人工补植本土生态修复类植物以及景观类植物的方式,提升冬季南湾湖消落带植物多样性及其空间分布异质性。

参考文献:

- [1] 江薇薇,杨楠,肖衡林.三峡库区与西南库区消落带植物多样性及群落构建比较[J].湖泊科学,2023,35(2):564-579.
JIANG Weiwei, YANG Nan, XIAO Henglin. Comparison of plant diversity and community assembly between drawdown zone of three gorges reservoir and its southwest reservoir area[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 564-579.

- [2] YE F, MA M H, WU S J, et al. Soil properties and distribution in the riparian zone: The effects of fluctuations in water and anthropogenic disturbances[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(3): 664-673.
- [3] 窦文清, 贾伟涛, 张久红, 等. 三峡水库消落带植被现状、适生策略及生态修复研究进展[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(1): 208-218.
DOU Wenqing, JIA Weitao, ZHANG Jiahong, et al. Research progress of vegetation status, adaptive strategies and ecological restoration in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1): 208-218.
- [4] 程莅登, 袁兴中, 孙阔, 等. 三峡库区消落带植物群落及其功能性状对水淹强度的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4795-4807.
CHENG Lideng, YUAN Xingzhong, SUN Kuo, et al. Responses of plant communities and their functional traits in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area to different flooding intensities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4795-4807.
- [5] 孙荣, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(2): 208-214.
SUN Rong, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al. 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[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2): 208-214.
- [6] 陈功, 李晓玲, 黄杰, 等. 三峡水库秭归段消落带植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 688-699.
CHEN Gong, LI Xiaoling, HUANG Jie, et al. Characteristics of plant communities and their relationships with environmental factors in the water level fluctuation zone of the Zigui region of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 688-699.
- [7] 张想英, 樊大勇, 谢宗强, 等. 克隆整合有助于狗牙根抵御水淹[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1075-1083.
ZHANG Xiangying, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al. Clonal integration enhances performance of *Cynodon dactylon* subjected to submergence[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(9): 1075-1083.
- [8] 邓蓓, 王晓锋, 廖君. 环境胁迫影响三峡库区消落带草本和木本植物生理生态特征的 meta 分析[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(5): 623-637.
DENG Bei, WANG Xiaofeng, LIAO Jun. Ecophysiological responses of herbaceous and woody plants to environmental stresses in the riparian zone of Three Gorges Reservoir: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(5): 623-637.
- [9] 黄金夏, 易雪梅, 贾伟涛, 等. 三峡库区消落带外来植物入侵与景观基质组成结构的关联性[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 477-488.
HUANG Jinxia, YI Xuemei, JIA Weitao, et al. Relationship between alien plant invasion and landscape matrix in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 477-488.
- [10] 陆春晖, 袁佳双, 黄磊, 等. 从 IPCC 看全球盘点中的关键科学问题及其对中国的启示[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(6): 736-746.
LU Chunhui, YUAN Jiashuang, HUANG Lei, et al. Key scientific issues in the global stocktake from the perspective of IPCC and their implications for China[J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(6): 736-746.
- [11] BAO Yuhai, GAO Peng, HE Xiubin. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [12] 饶洁, 段丁琪, 唐强, 等. 三峡水库消落带植被高程梯度分异及其对生境胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6649-6660.
RAO Jie, DUAN Dingqi, TANG Qiang, et al. Vegetation differentiation along elevation gradient in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir and its response to habitat stressing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6649-6660.
- [13] 毛媛, 袁嘉, 游奉溢, 等. 三峡库区城市河岸带草本植物功能性状及群落结构[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9848-9861.
MAO Yuan, YUAN Jia, YOU Fengyi, et al. Functional traits and community structure of herbaceous plants in urban riparian zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9848-9861.
- [14] LI Tingting, ZHU Zihan, SHAO Ying, et al. Soil seedbank: Importance for revegetation in the water level fluctuation zone of the reservoir area[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154686.
- [15] 李秋宏, 王小国, 刘祥龙. 蓄水对三峡库区消落带土壤和植被的影响研究进展[J/OL]. *水生态学杂志*, 2024: 1-11

- (2024-07-19) [2024-12-09]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202303240079>.
- LI Qihong, WANG Xiaoguo, LIU Xianglong. Progress of research of the effect of impounding on soil and vegetation in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 2024; 1-11 (2024-07-19) [2024-12-09]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202303240079>.
- [16] 胡俊, 沈强, 陈明秀, 等. 基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3759-3769.
- HU Jun, SHEN Qiang, CHEN Mingxiu, et al. Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3759-3769.
- [17] 周巍, 杨俊杰, 王海燕. 南湾湖湿地外来入侵植物多样性调查研究[J]. *信阳农林学院学报*, 2019, 29(2): 79-82.
- ZHOU Wei, YANG Junjie, WANG Haiyan. Investigation on species diversity of alien invasive plants in Nanwan lake wetland[J]. *Journal of Xinyang Agricultural College*, 2019, 29(2): 79-82.
- [18] FU Manyi, WANG Zhen, LIANG Xiangpeng. Floristic composition and plant community diversity of water-level fluctuation zone of Nanwan Reservoir[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2023, 291: 233-241.
- [19] 付满意. 信阳南湾水库消落带植物群落结构分析[J]. *湖南农业科学*, 2021(4): 62-65, 73.
- FU Manyi. Analysis of plant community structure in the riparian zone of Nanwan reservoir in Xinyang[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(4): 62-65, 73.
- [20] 吴昊, 张辰, 代文魁. 气候变暖和物种多样性交互效应对空心莲子草入侵的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(3): 38-48.
- WU Hao, ZHANG Chen, DAI Wenkui. Interactive effects of climate warming and species diversity on the invasiveness of the alien weed *Alternanthera philoxeroides*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3): 38-48.
- [21] MANDÁK B. Germination requirements of invasive and non-invasive atriplex species: A comparative study [J]. *Flora -Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2003, 198(1): 45-54.
- [22] 秦文超, 陶至彬, 王永健, 等. 资源脉冲对外来植物入侵影响的研究进展和展望[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 573-582.
- QIN Wenchao, TAO Zhibin, WANG Yongjian, et al. Research progress and prospect on the impacts of resource pulses on alien plant invasion[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(6): 573-582.
- [23] 陈雪纯, 刘虹, 朱少琦, 等. 漓江流域不同弃耕年限下4种常见草本植物功能性状种内变化及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 559-570.
- CHEN Xuechun, LIU Hong, ZHU Shaoqi, et al. Intraspecific variations in plant functional traits of four common herbaceous species under different abandoned years and their relevant driving factors in Lijiang River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(4): 559-570.
- [24] 王岑, 党海山, 谭淑端, 等. 三峡库区苏门白酒草(*Conyza sumatrensis*)化感作用与入侵性研究[J]. *武汉植物学研究*, 2010, 28(1): 90-98.
- WANG Cen, DANG Haishan, TAN Shuduan, et al. Study on allelopathy and invasiveness of *Conyza sumatrensis* in the Three Gorges reservoir of the Yangtze River[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, 28(1): 90-98.
- [25] 李沛蓉, 樊青卓, 李蓉蓉, 等. 运城盐湖湿地入侵植物多样性及区系特征[J]. *生态学杂志*, 2025, 44(7): 2142-2149.
- LI Peirong, FAN Qingzhuo, LI Rongrong, et al. Diversity and floristic characteristics of invasive plants in Yuncheng Salt Lake wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(7): 2142-2149.
- [26] 牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 579-593.
- NIU Kechang, LIU Yining, SHEN Zehao, et al. Community assembly: The relative importance of neutral theory and niche theory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 579-593.
- [27] 钟静怡, 叶采金, 吴浩静, 等. 青藏高原种子植物区系多样性格局及其影响因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(3): 1-17.
- ZHONG Jingyi, YE Caijin, WU Haojing, et al. Diversity patterns and influencing factors of seed plant flora in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1-17.
- [28] 李闪闪, 刘学勤. 长江中游河漫滩湿地植物功能性状分析[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(5): 601-611.
- LI Shanshan, LIU Xueqin. Analysis of functional traits of wetland plants in floodplains in middle reaches of Yangtze river[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(5): 601-611.
- [29] 郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 等. 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[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4255-4265.
- GUO Yan, YANG Shao, SHEN Yafei, et al. Study on the natural distribution characteristics and community species

- diversity of existing plants in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4255-4265.
- [30] 张羲, 于一雷, 李胜男, 等. 南水北调北京段大宁水库消落带植被分布特征及多样性[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 40-49.
ZHANG Yi, YU Yilei, LI Shengnan, et al. Vegetation distribution and diversity in the water-level-fluctuation zone of Daning Reservoir, Beijing Section, Middle Route of the south-to-north water diversion[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 40-49.
- [31] 董智, 李留彬, 向国伟, 等. 三峡库区忠县消落带植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(7): 1-13.
DONG Zhi, LI Liubin, XIANG Guowei, et al. Characteristics of plant communities and their relationships with environmental factors in the riparian zone of Zhong county of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science)*, 2022, 44(7): 1-13.
- [32] 赵敏, 赵坤, 王赟博, 等. 长期放牧干扰降低了短花针茅荒漠草原植物多样性[J]. *草业学报*, 2023, 32(9): 39-49.
ZHAO Min, ZHAO Kun, WANG Yunbo, et al. Long-term grazing disturbance reduced plant diversity in *Stipa breviflora* desert steppe[J]. *Acta prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 39-49.
- [33] 张丽苗, 谭雪, 董智, 等. 喜旱莲子草入侵对三峡库区重庆主城区河岸带植物多样性的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31(9): 13-25.
ZHANG Limiao, TAN Xue, DONG Zhi, et al. Effects of *Alternanthera philoxeroides* invasion on plant diversity in the riparian zones of downtown Chongqing in the three gorges reservoir area[J]. *Acta prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 13-25.
- [34] 吴昊. 入侵植物空心莲子草春季沿纬度变化的群落特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(5): 816-824.
WU Hao. Variation characteristics of an invasive *Alternanthera philoxeroides* community along latitudinal gradients in spring[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(5): 816-824.
- [35] 熊梅, 安海波, 赵萌莉, 等. 放牧对荒漠草原主要植物种群空间格局与生态位的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(4): 1177-1183.
XIONG Mei, AN Haibo, ZHAO Mengli, et al. Effect of grazing on spatial pattern and niche characteristics of main species in desert steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1177-1183.
- [36] 姜倪皓, 张世浩, 张诗函. 哀牢山紫茎泽兰入侵群落主要物种间联结及环境解释[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1370-1382.
JIANG Nihao, ZHANG Shihao, ZHANG Shihan. Interspecific associations and environmental interpretation of the dominant species of the communities invaded by *Ageratina adenophora* in ailao mountains[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2022, 31(7): 1370-1382.
- [37] SUN Y, REN Z K, MÜLLER-SCHÄRER H, et al. Increasing and fluctuating resource availability enhances invasional meltdown[J]. *Ecology*, 2024, 105(9): e4387.
- [38] 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 等. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 571-580.
TONG Xiaoxiao, CHEN Chundi, WU Shengjun, et al. Spatial distribution pattern of plant community and habitat impact analysis of the drawdown zone of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 571-580.
- [39] VILÀ M, ESPINAR J L, HEJDA M, et al. Ecological impacts of invasive alien plants: A meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 702-708.
- [40] 樊大勇, 熊高明, 张爱英, 等. 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[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(4): 416-432.
FAN Dayong, XIONG Gaoming, ZHANG Aiyong, et al. Effect of water-level regulation on species selection for ecological restoration practice in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(4): 416-432.

责任编辑:任长江