

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2025.06.025

引用格式:罗来开,尹明月,朱玲,等.不同生境草本植物多样性及环境解释:以长江安庆段河岸带为例[J].草地学报,2025,33(6):1934-1946

LUO Lai-kai, YIN Ming-yue, ZHU Ling, et al. Herbaceous Plant Diversity and Environmental Interpretation in Different Habitats: A Case Study of The Anqing Section of The Yangtze River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6):1934-1946

不同生境草本植物多样性及环境解释:以长江安庆段河岸带为例

罗来开^{1,2}, 尹明月¹, 朱玲^{1,2}, 程樱^{1,2}, 阳艳芳^{1,2}, 谈凯^{1,2}, 赵凯^{1,2*}

(1. 安庆师范大学生命科学学院, 安徽 安庆 246011;

2. 安徽省“一带一路”流域生物多样性保护与利用国际合作基地, 安徽 安庆 246011)

摘要:为揭示长江下游河岸带草本植物群落分布特征及其与环境因子的关系。本研究采用Ward最小方差聚类、典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)和Pearson相关性分析等方法,对研究区90个植物群落样地进行分析。结果表明:长江安庆段河岸带共发现草本植物293种隶属于65科180属,其中菊科(Asteraceae)、禾本科(Poaceae)、唇形科(Lamiaceae)、豆科(Fabaceae)数量较多;不同类型河岸带物种丰富度大小依次为:自然型河岸带>农耕主导型河岸带>开发建设主导型河岸带;3种不同类型河岸带的植物群落可分别划分为4、4和5种群落类型,其中芦苇(*Phragmites australis*) + 益母草(*Leonurus japonicus*) + 救荒野豌豆(*Vicia sativa*)、早熟禾(*Poa annua*) + 救荒野豌豆(*Leonurus japonicus*) + 野老鹳草(*Geranium carolinianum*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*) + 喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*) + 野老鹳草(*Geranium carolinianum*)分别在自然型河岸带、农耕主导型河岸带和开发建设主导型河岸带出现频率最高;CCA结果表明,土壤含水量和郁闭度是影响自然型河岸带植物群落分布的主导因子,人为干扰是影响农耕主导型河岸带植物群落分布的主导因子,土壤全氮是影响开发建设主导型河岸带植物群落分布的主导因子。

关键词:河岸带;草本植物;环境因子;群落类型

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2025)06-1934-13

Herbaceous Plant Diversity and Environmental Interpretation in Different Habitats: A Case Study of The Anqing Section of The Yangtze River

LUO Lai-kai^{1,2}, YIN Ming-yue¹, ZHU Ling^{1,2}, CHENG Ying^{1,2}, YANG Yan-fang^{1,2},
TAN Kai^{1,2}, ZHAO Kai^{1,2*}

(1. College of Life Sciences, Anqing Normal University, Anqing, Anhui Province 246011, China; 2. The Belt and Road Model International Science and Technology Cooperation Base for Biodiversity Conservation and Utilization In Basins of Anhui Province, Anqing, Anhui Province 246011, China)

Abstract: To reveal the relationship between herbaceous plant communities distribution characteristics and environmental factors in the riparian zone of the lower reaches of the Yangtze River. In this study, methods such as Ward's minimum variance cluster analysis, Canonical Correspondence Analysis (CCA), and Pearson correlation analysis were used to analyze 90 plant community plots in the study area. The results showed that: a total of 293 herbaceous species belonging to 65 families and 180 genera were recorded in all the types of habitats, and Asteraceae, Poaceae, Fabaceae and Lamiaceae are the dominant families in all the types of habitats. Under different

收稿日期:2024-08-05;修回日期:2024-10-16

基金项目:安庆江豚省级自然保护区能力建设项目—生物多样性本底调查(CG-AQ-2022-276 FS34080120220280;长江安徽段鱼类重要栖息地调查横向课题项目(230133);2023年度安徽省科研编制计划项目(2023AH010041)资助

作者简介:罗来开(1994-),男,汉族,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事植物生态学研究, E-mail: 627764007@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhaokai@aqnu.edu.cn

types in the riparian zone, the plant species richness was in the order of natural riparian zones > farming riparian zone > building riparian zone. The ward's minimum variance method was used to classify plant communities of the three riparian zones into 4, 4 and 5 community types, respectively. The occurrence frequency of Ass. *Phragmites australis*+*Leonurus japonicus*+*Vicia sativa*, Ass. *Poa annua*+*Leonurus japonicus*+*Geranium carolinianum* and Ass. *Cynodon dactylon*+*Alternanthera philoxeroides*+*Geranium carolinianum* was the highest in the natural, rock, and prefabricated masonry shorelines, respectively. The results of CCA showed that soil moisture and canopy were the main factors affecting the distribution of plant community in natural riparian zone, human disturbance was the main factor affecting the distribution of plant community in farming riparian zone, and soil total nitrogen was the main factor affecting the distribution of plant community in the building of riparian zone.

Key words: Riparian zone; Herbaceous plants; Environmental factors; Community types

生物多样性是生物与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,是人类赖以生存和发展的物质基础,不仅为人类提供了丰富多样的生产和生活必需品、健康安全的生态环境和独特别致的景观文化,同时还在调节气候、维持生态平衡方面起着不可替代的作用,其包括遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性三个层次^[1]。而物种多样性则反映了生物群落在组成、结构、功能和动态方面的异质性,是最简单有效的描述群落和区域多样性的方法^[2-3],此外,物种多样性作为衡量一定区域内生物资源丰富程度的一个客观指标,不仅能反映群落组成结构及其发展变化,也可以测度生物群落与环境因子间的相互关系^[4]。因此,对于物种多样性的空间异质性进行研究^[5],不仅有利于深入探讨不同生境间生物多样性的分布格局及变化^[6-7],同时也可以为制定物种保育和可持续利用政策提供科学依据。

河岸带是河流和陆地的生态过渡地带,是河流生态系统与陆地生态系统进行物质、能量及信息交流的重要区域^[8]。由于河岸带特殊的地理空间位置属性,以及河流地貌、水文环境及人类活动的多重影响,河岸带生态系统表现出高度的独特性、动态性和复杂性^[9],同时也具有独特的植被、土壤和水文特性^[10]。河岸带复杂多样的生境使其具有显著的边缘效应,丰富的生物多样性、复杂的环境因子、多变的地形地貌和水文特性及独特多样的植被景观是其最直接的体现^[11-12],从而保证了河岸带生态系统结构和功能的完整性和稳定性。因此,河岸带植物群落的物种组成及多样性特征对于维持河岸带的稳定及保持整个河流生态系统的生态功能连续性具有重要的意义,成为近年来国内外生态学和环境科学的研究重点之一^[13]。河岸带植被作为河岸带生态系统的重要组成部分和第一生产力,在生态保护、涵养水源、水土保持和维持岸堤稳定性、生态景观构建以及为其他生物提供栖息繁殖和避敌场所等方面发挥着重要作用^[14-15]。土壤、

河流类型、人为干扰等环境因子不仅与河岸带生境变化密切相关,还影响河岸带植物的分布类型、数量和质量^[16]。因此,深入探讨河岸带不同生境植物群落多样性及其与环境因子的关系,不仅可以衡量其境内稳定性程度,而且还可以揭示境内植被时空变化格局及其成因^[17]。这对于理解河岸带生态系统的稳定性和生态健康评价与生态环境监测具有重要意义^[18]。

目前,学者们就长江下游河岸带的植物群落结构^[19]、沿江丘岗圩田土壤性质空间变异特征^[20]等方面已开展了一些研究,但从不同时空尺度上探讨河岸带植被分布格局及其环境解释方面的文献仍较少。鉴于此,本研究以长江安庆段河岸带草本植物为研究对象,旨在探讨长江下游河岸带不同生境类型下草本植物群落分布特征、物种多样性特征及其与环境因子的关系,以期对长江流域生物多样性保护和生态文明建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长江安庆段地处鄂皖赣三省交界处的皖南山区与大别山南麓之间的冲积平原地带,其干流长约165 km,自西向东贯穿安庆市宿松县、望江县、迎江区和大观区,南岸则为江西省九江市和安徽省池州市。气候属于北亚热带湿润季风气候区,其特点是季风明显,四季分明。年平均气温16.1~16.6℃,多年平均无霜期252 d,全年日照时数1936~2091 h。年均降水量约在1300~1400 mm之间,具有明显的枯水期和丰水期。近年来,人类对河岸带的过度开发利用,如码头航运建设、农业开垦等活动,对河岸带生态系统造成了显著影响。在这一背景下,安庆江段河岸带形成了3种主要的生境类型:(1)自然型河岸带(Natural riparian zone, NRZ):基本处于原始自然状态,无人破坏和扰动,但郁闭度较高;(2)

开发建设主导型河岸带(Buliding riparian zone, BRZ):受工程建设干扰,如航运码头与防洪设施的建设;(3)农耕主导型河岸带(Farming riparian zone, FRZ):受农业耕地活动的干扰。

1.2 研究方法

1.2.1 设置样地 参照《河道管理条例》和一些学者对河岸带宽度的相关研究^[21-22],以及通过卫星影

像和 Google earth 影像判断,综合确定长江安庆段河岸带植物资源调查的宽度为 100 m(垂直于河流方向)。对于距离河道不足 100 m 时,其调查范围为江堤脚线与河岸之间的地带。根据全面性、典型性以及代表性原则,于 2023 年 5 月在长江安庆段两岸进行全面踏查,并在此基础上,选取 30 个不同生境样点(见图 1)进行调查。在每个样点内设置 3 个 20 m×20 m 的样地,共计 90 个样地。

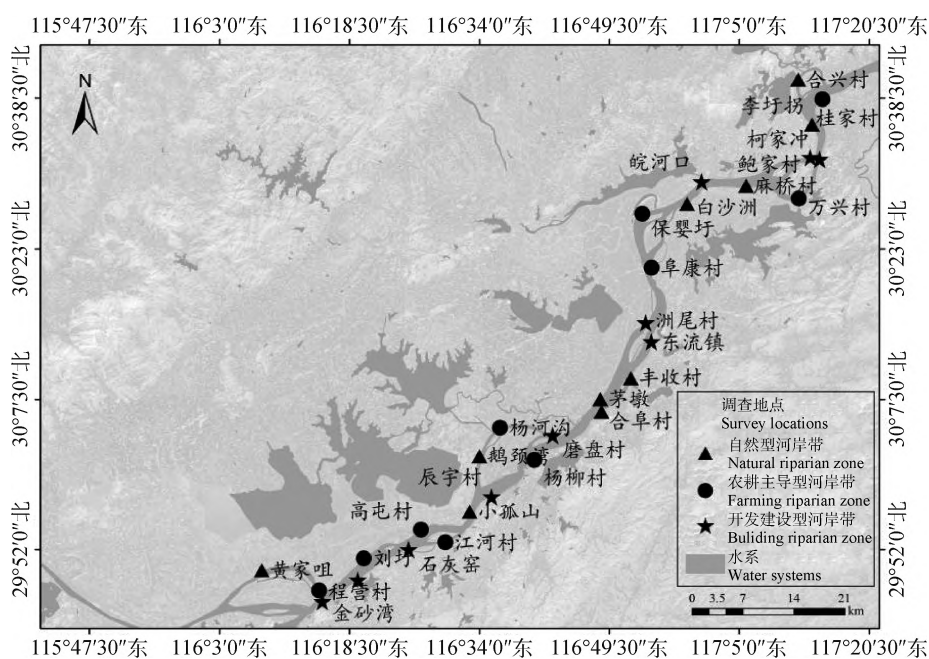


图 1 研究区域位置及样点分布示意图

Fig. 1 Location of the study area and the distribution map of sample points

1.2.2 植被调查方法 采用典型样地调查法与样方法相结合的方法^[23],于 2023 年 5 月,在每个样地内随机取 10 个 1 m×1 m 的草本样方进行调查,共计 900 个小样方。记录每个样方中所有草本植物的物种名称、数量、高度,同时采用目测估计法记录每个样地的植被盖度。使用便携式 GPS 导航设备记录样地的经度和纬度,同时记录环境信息与人为干扰情况。采用收割法^[24]收割植株地上部分,并使用便携式手提秤称量其鲜重(g)。

1.3 环境因子测定

1.3.1 土壤样品采集 在进行植物群落调查的样地内,采用五点取样法对样地内的土壤进行采集,即先清除样地 4 个角与中心点共 5 个取样点表层的植被及凋落物,再使用土壤采集器在 0~20 cm 土层采集土样,将 5 个采样点的土壤混合均匀后使用自封袋封装并做好标记,带回实验室测定各项理化性

质。此次调查共采集土壤样品 90 份。

环境因子:对样地坡向进行记录,并对坡向的具体情况进行人为赋值^[25],其中 1 代表北坡,2 代表东北坡,3 代表东坡,4 代表东南坡,5 代表南坡,6 代表西南坡,7 代表西北坡,8 代表西坡。郁闭度(Canopy density, DEN)采用样点法进行测定,分为 5 个等级并赋值^[26],其中 1 表示 <0.20,2 表示 0.20~0.39,3 表示 0.40~0.59,4 表示 0.60~0.79,5 表示 >0.8。根据样地现场的实际情况,将干扰(Human disturbance, HUMDIS)根据强度的不同分为 5 个等级并赋值,1 表示罕见人为干扰,2 表示极少人为踩踏,3 表示有人为踩踏,4 表示较多人为踩踏,5 表示经常人为踩踏。

1.3.2 土壤理化性质测定 土壤各项物理化学性质参照《土壤分析技术规范(第二版)》^[27]进行测定,采用烘干法(105℃)测定土壤含水量(Soil moisture, SM),采用水提法(质量体积比为 1:2.5)测定土壤

pH值,采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮(Total nitrogen, TN),采用重铬酸钾滴定法测定土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量^[28],采用硫酸-高氯酸消煮、钼锑抗比色法测定全磷(Total phosphorus, TP)和速效磷(Available phosphorus, AP)含量^[29],采用火焰光度计法测定全钾(Total potassium, TK)含量,采用醋酸铵提取和火焰光度法测定速效钾(Available potassium, AK)含量^[30],用纳氏试剂比色法测定上清液中铵态氮(Ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量^[31]。

1.4 数据分析

1.4.1 重要值计算 选取重要值作为评价草本植物群落内各物种相对重要性的综合数量指标^[32],计算公式如下:

$$\text{草本层重要值} = \frac{\text{相对频度} + \text{相对密度} + \text{相对盖度}}{3}$$

$$\text{相对频度} = \frac{\text{某一个种在样方中出现的次数}}{\text{所有物种出现的总次数}}$$

$$\text{相对盖度} = \frac{\text{某一个种的盖度}}{\text{所有种的盖度之和}}$$

相对密度 = 某一个种的株数 / 所有种的总株数

1.4.2 物种多样性计算 采用Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Simpson优势度指数、Patrick丰富度指数来表示不同生境下植物个体数量在种间的分布特征。计算公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener多样性指数: } H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou均匀度指数: } J = H / \ln S$$

$$\text{Simpson优势度指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$\text{Patrick丰富度指数 } R = S$$

式中, S 为样地中的物种数, P_i 为第 i 个种的重要值。

1.5 数据处理

不同生境草本植物群落多样性指数采用Microsoft Excel 2019软件处理分析,并使用SPSS 27.0软件运用单因素方差分析(One-way ANOVA)方法对不同生境河岸带植物群落进行差异显著性分析($\alpha = 0.05$),显著性均为 $P < 0.05$,多重比较采取最小显著性差异法(Least significant difference method, LSD)。使用R软件中的vegen, gclus, cluster等程序包对植物群落进行聚类分析并作图。运用Canoco5.0软件对植物群落和环境因子之间进行典

范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)分析,并进行置换检验,分析不同环境因子对植物群落的影响及其解释度。群落多样性和环境因子之间的相关性分析采用Pearson相关性分析方法,采用Origin 21.0软件进行并绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生境草本植物物种组成

草本植物通常具有生长周期较短,对环境变量较敏感,能较好地体现生物群落对环境变化的响应,并可为多种生物提供适宜生境与食物来源,是衡量生物多样性水平的重要生态指标。本研究通过系统调查和分析长江安庆段流域不同类型河岸带草本植物(图2),发现该区域内共存在293种草本植物,隶属于65科180属。其中自然型河岸带(NRZ)植物物种数最多,共计61科149属232种,占整个长江安庆段流域草本植物总数的79.18%。其次是农耕主导型河岸带(FRZ),为212种,占比72.35%。开发建设主导型河岸带(BRZ)植物物种数最少,为176种,占比60.07%。由此可见,NRZ的植物种类较丰富,但FRZ的物种丰富度偏低。这些植物中占优势的科主要有菊科(Asteraceae)、禾本科(Poaceae)、唇形科(Lamiaceae)、豆科(Fabaceae)和蓼科(Polygonaceae),均为典型的大科,前四者在3种生境中均有分布,且在各个生境中物种数最多,说明其适合在各生境中生长。

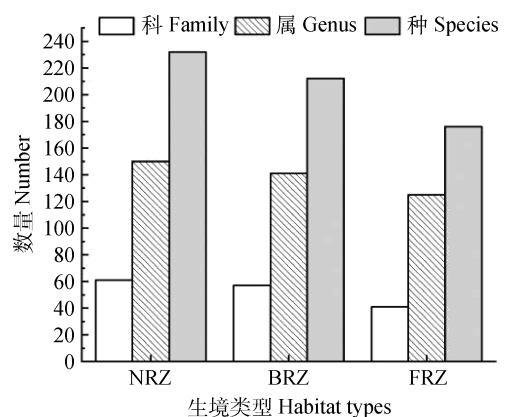


图2 不同生境草本植物群落科、属、种数量

Fig. 2 The number of families, genera and species of herbaceous plant communities in different habitats

2.2 不同生境草本植物群落的物种多样性特征

2.2.1 不同生境草本植物多样性 单因素方差分析表明,长江安庆段不同类型河岸带草本植物的Patrick丰富度指数(R)、Shannon-Wiener多样性指

数(H)和 Simpson 优势度指数(D)差异显著($P < 0.05$),且三种生境的变化趋势相同,详见图 3A, 3B, 3C。长江安庆段河岸带草本植物群落的 R , H 和 D 的变化范围分别是 26~38, 0.90~1.21 和 0.52~0.63,其中均以 NRZ 样地的草本植物群落多

样性指数最高(分别为 38, 1.21 和 0.63),植物群落结构复杂,物种丰富。均匀度指数表示在不同物种间多度分布的均匀度程度,长江安庆段河岸带 Pielou 均匀度指数(J)变化范围为 0.79~0.84,整体起伏波动较小,见图 3(D)。

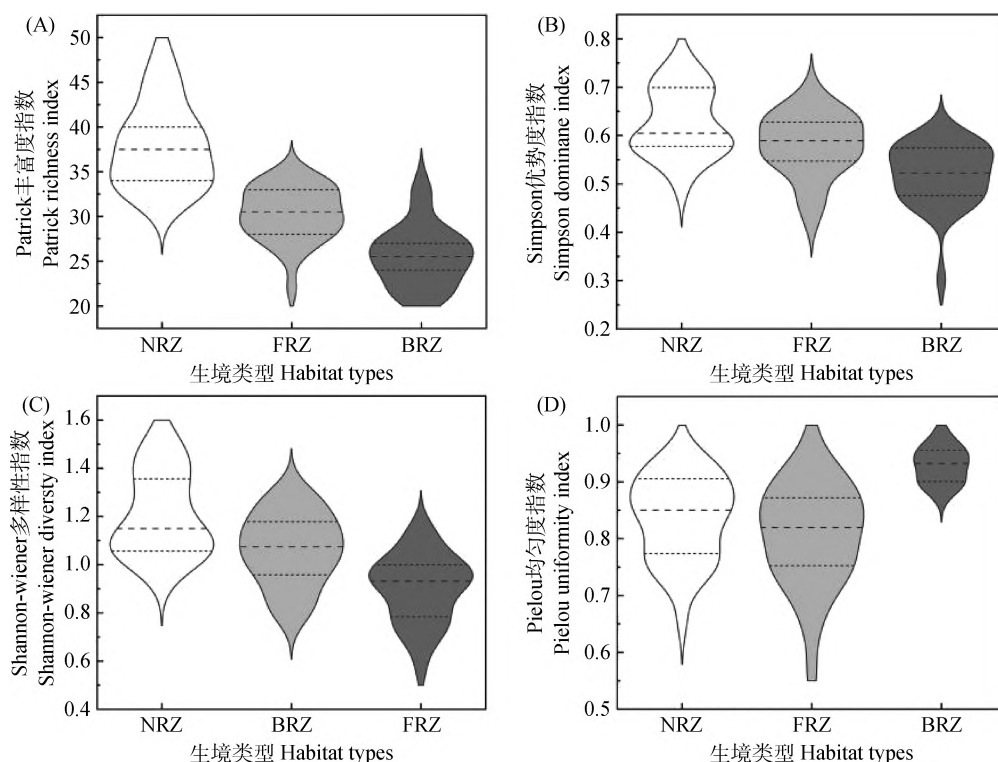


图 3 长江安庆段河岸带不同生境草本植物多样性差异

Fig. 3 Differences of herbaceous plant diversity under different habitats in the riparian zone of the Anqing section of the Yangtze River

2.2.2 不同生境草本植物的生物量和植被盖度 生物量是维持河岸带生态系统稳定发展的基础,能够反映河岸带植被群落的生产力大小。由表 1 可知,长江安庆段河岸带草本植物群落的平均生物量差异较大。其中 BRZ 的植物群落的平均生物量最小,为 $1437.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,而最大生物量则出现在自然型河岸带,可达 $2776.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此外,通过对样地内的 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方的植被盖度进行估算,长江安庆段河岸带植被的整体盖度在 79.50%~92.91% 之间(表 1)。其中 NRZ 的植被盖度较高,平均盖度为 90% 以上,与之相反的则是 BRZ,平均盖度为 79.50%。

2.2.3 不同生境草本植物重要值分析 重要值能够衡量植物个体在群落中的地位和作用,因此,通过计算分析各物种重要值的大小,可得出群落中的优势物种。由表 2 可知,不同生境重要值排名前 3

的物种存在相同种类,但这些物种在各生境中的重要值有所差异。例如,鹅观草(*Elymus kamoji*)的重要值在 NRZ 中为 7.17%,而在 BRZ 中为 8.63%。此外,在 NRZ 中重要值最大的是芦苇(*Phragmites australis*),而在 FRZ 和 BRZ 中重要值较大的则分别为早熟禾(*Poa annua*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*),且三者的重要值均在 11% 以上。总体而言,长江安庆段河岸带草本植物种类组成较为简单,物种重要值变化幅度较大。

表 1 不同生境草本植物构件生物量(均值±标准差)

Table 1 Modular biomass under different habitats in the riparian zone

生境类型 Habitat	盖度 Coverage/%	生物量 Biomass/g
NRZ	92.91 ± 2.61^a	2776.93 ± 641.21^a
FRZ	88.37 ± 4.29^b	2139.51 ± 707.67^b
BRZ	79.50 ± 3.47^c	1437.46 ± 378.46^c

表 2 不同生境草本植物重要值

Table 2 Importance values of herbaceous plants in different habitats

生境类型 Habitat	植物名称 Species names	总重要值 Total importance value/%
NRZ	芦苇 <i>P. australis</i>	12.42
	鹅观草 <i>E. kamoji</i>	7.17
	野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	6.85
FRZ	早熟禾 <i>P. annua</i>	11.18
	救荒野豌豆 <i>Vicia sativa</i>	9.33
	野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	7.73
BRZ	狗牙根 <i>C. dactylon</i>	12.22
	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	9.61
	鹅观草 <i>E. kamoji</i>	8.63

2.3 不同类型河岸带的草本植物群落类型特征

2.3.1 不同类型河岸带的植物群落数量分类 数量分类和排序是解释植物群落、植物物种和环境之间关系的常用方法。为有效剔除偶见种,本研究选择重要值 $\geq 0.04\%$ 的草本植物作为植物群落数量分类的对象。然后根据植物群落分类和优势种命名原则,分别将 3 种类型河岸带的植被划分为 4, 4 和 5 个群落类型(如表 3 所示),具体为:

(1)自然型河岸带

群丛 1: 芦苇群丛(Ass. *Phragmites australis*)

仅包含样地 1, 群落高度为 43~180 cm, 平均盖度为 91.85%, 优势种为芦苇, 重要值为 1.13%, 主要伴生种为马兰(*Aster indicus*)、艾(*Artemisia argyi*)、南苜蓿(*Medicago polymorpha*)等。群丛结构复杂, 群丛物种丰富高且生物量较大。

群丛 2: 藨草+苕菜(Ass. *Phalaris arundinacea*+*Nymphoides peltata*)

仅包含样地 2, 群落高度为 32~125 cm, 平均盖度为 94.56%, 优势种为藨草和苕菜, 重要值分别为 0.44% 和 0.39%, 主要伴生种为水鳖(*Hydrocharis dubia*)、紫萍(*Spirodela polyrhiza*)、菰(*Zizania latifolia*)和芡(*Euryale ferox*)。群丛为水生植物, 结构简单, 物种数相对较少和多样性指数较低。

群丛 3: 芦苇+窃衣(Ass. *Phragmites australis*+*Torilis scabra*)

仅包含样地 3, 群落平均高度为 78~165 cm, 平均盖度为 96.30%, 优势种为芦苇和窃衣, 重要值分别为 0.86% 和 0.73%, 主要伴生种有南苜蓿、野老鹳草(*Geranium carolinianum*)和节节草(*Equisetum ramosissimum*)。群丛结构简单, 物种丰富度较低, 生物量较小。

群丛 4: 芦苇+益母草+救荒野豌豆(Ass. *Phragmites australis*+*Leonurus japonicus*+*Vicia sativa*)

包含 26 个样地, 群落平均高度为 45~173 cm, 平均盖度为 92.76%, 主要优势种为芦苇、益母草和救荒野豌豆, 总重要值分别为 10.43%, 6.55% 和 6.45%, 主要伴生种为野老鹳草、菱蒿(*Artemisia selengensis*)、早熟禾、狗牙根和喜旱莲子草, 物种丰富度较高, 多样性指数、生物量和盖度均较大, 为 NRZ 的代表性群丛。

(2)农耕主导型河岸带

群丛 1: 早熟禾+救荒野豌豆+野老鹳草(Ass. *Poa annua*+*Leonurus japonicus*+*Geranium carolinianum*)

包含 26 个样地, 群落平均高度为 21~35 cm, 平均盖度为 88.69%, 主要优势种为早熟禾、救荒野豌豆和野老鹳草, 其重要值分别为 9.71%, 8.46% 和 7.11%, 主要伴生种为风花菜(*Rorippa globosa*)、鹅观草、益母草和野燕麦(*Avena fatua*), 群丛结构复杂, 物种丰富度较高, 但多样性指数较低, 是 FRZ 的代表性群丛。

群丛 2: 球序卷耳+芥(Ass. *Cerastium glomeratum*+*Capsella bursa-pastoris*)

仅包含样地 1, 群落平均高度为 35~54 cm, 平均盖度为 87.22%, 主要优势种为球序卷耳和芥, 重要值分别为 1.32% 和 0.84%, 主要伴生种为马兰、宝盖草(*Lamium amplexicaule*)、救荒野豌豆和蛇床(*Cnidium monnieri*), 群丛结构复杂, 物种丰富度和多样性指数较高, 生物量和覆盖度较大。

群丛 3: 芥+婆婆纳(Ass. *Capsella bursa-pastoris*+*Veronica polita*)

仅包含样地 2, 群落平均高度为 37~45 cm, 平均盖度为 81.80%, 主要优势种为芥和婆婆纳, 重要值分别为 1.61% 和 1.47%, 主要伴生种为狗牙根、球序卷耳、窃衣和野老鹳草, 群丛结构简单, 物种丰富度、多样性指数、生物量及盖度均较低。

群丛4: 球序卷耳+早熟禾+六叶葎 (Ass. *Cerastium glomeratum*+*Poa annua*+*Galium hoffmeisteri*)

仅包含样地3, 群落平均高度为20~33 cm, 平均盖度为87.20%, 主要优势种为球序卷耳、早熟禾和六叶葎, 重要值分别为1.72%, 1.17%和0.69%, 主要伴生种为车前 (*Plantago asiatica*)、救荒野豌豆、婆婆纳 (*Veronica polita*) 和芥 (*Capsella bursa-pastoris*), 群丛结构复杂, 物种多样性较高。

(3) 开发建设主导型河岸带

群丛1: 喜旱莲子草+灰化藁草 (Ass. *Alternanthera philoxeroides*+*Carex cinerascens*)

仅包含样地1, 群落平均高度为45~75 cm, 平均盖度为79.30%, 主要优势种为喜旱莲子草和灰化藁草, 重要值分别为1.07%和1.03%, 重要伴生种为狗牙根、鹅观草和荻 (*Miscanthus sacchariflorus*), 群落结构简单, 物种丰富度和多样性指数较低。

群丛2: 白茅+荻 (Ass. *Imperata cylindrica*+*Miscanthus sacchariflorus*)

仅包含样地2, 群落平均高度为78~115 cm, 平均盖度为74.90%, 主要优势种为白茅 (*Imperata cylindrica*) 和荻, 重要值分别为1.07%和0.88%, 主要伴生种为野燕麦、益母草和蛇床, 群落结构简

单, 物种多样性指数均较低。

群丛3: 风花菜+一年蓬 (Ass. *Rorippa globosa*+*Erigeron annuus*)

仅包含样地3, 群落平均高度为87~111 cm, 平均盖度为78.60%, 主要优势种为风花菜和一年蓬, 重要值分别为0.81%和0.68%, 主要伴生种为益母草、芦苇、蛇床, 群落结构简单, 物种多样性指数较低。

群丛4: 益母草+鹅观草 (Ass. *Leonurus japonicus*+*Elymus kamoji*)

仅包含样地4, 群落平均高度为77~132 cm, 平均盖度为80.60%, 主要优势种为益母草和鹅观草, 重要值分别为1.36%和1.28%, 主要伴生种为南苜蓿、喜旱莲子草和蛇床, 群落结构复杂, 物种多样性指数较高。

群丛5: 狗牙根+喜旱莲子草+野老鹳草 (Ass. *Cynodon dactylon*+*Alternanthera philoxeroides*+*Geranium carolinianum*)

包含25个样地, 群落平均高度为23~35 cm, 平均盖度为79.67%, 主要优势种为狗牙根喜旱莲子草和野老鹳草, 重要值分别为10.76%, 7.48%和7.07%, 主要伴生种为一年蓬、鹅观草、窃衣和救荒野豌豆, 群落结构简单, 物种多样性指数较低, 但在BRZ生境中出现频度最高, 为代表性群落。

表3 不同生境草本植物群丛的多样性指数、生物量和盖度(平均值)

Table 3 Species diversity indices, biomass and cover of herbaceous plant assemblages types in different habitat (mean values)

生境类型 Habitat	群落类型 Community types	Patrick丰富度指数 Patrick richness index	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Simpson优势度指数 Simpson dominance index	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index	生物量 Biomass/g	盖度 Coverage/%
NRZ	芦苇	40	0.56	1.06	0.74	3421.94	91.85
	藜草+苕菜	33	0.61	1.04	0.95	1932.60	94.56
	芦苇+窃衣	35	0.56	1.02	0.77	3001.40	96.30
	芦苇+益母草+救荒野豌豆	38	0.63	1.23	0.84	2796.07	92.76
FRZ	早熟禾+救荒野豌豆+野老鹳草	30	0.58	1.05	0.81	2204.36	88.69
	球序卷耳+芥	32	0.63	1.30	0.75	1366.13	87.22
	芥+婆婆纳	26	0.53	0.97	0.73	1097.06	81.80
	球序卷耳+早熟禾+六叶葎	33	0.64	1.27	0.80	1319.18	87.20
BRZ	喜旱莲子草+灰化藁草	26	0.52	0.95	0.72	1548.50	79.30
	白茅+荻	27	0.52	0.94	0.74	2169.44	74.90
	风花菜+一年蓬	32	0.52	0.99	0.70	1960.08	78.60
	益母草+鹅观草	34	0.57	1.13	0.72	1942.70	80.60
	狗牙根+喜旱莲子草+野老鹳草	25	0.52	0.89	0.80	1386.88	79.67

2.4 不同生境草本植物群落与环境因子的关系

2.4.1 不同生境各特征值的相关性 以不同生境的样地为单位统计每种植物重要值, 分别建立样地-多样性指数矩阵, 将13个环境因子与群落多样性指数、盖度和生物量等特征值进行相关性分析, 结果如

图4所示, 在NRZ生境中植被盖度(VC)与土壤含水量(SM)和全钾(TK)、生物量(B)与有机质(SOM)、H与AK、R与速效钾(AK)和LIT等为显著正相关 ($P<0.05$), 其中VC与SM相关系数最大, 为0.62。但人为干扰(HUMDIS)与R、H及J均为显著负相关

($P < 0.05$), 其中 HUMDISH 与 H 的相关系数为 -0.46 , 详见图 4A。在 FRZ 生境中, D 与 SM 、 J 与郁闭度(DEN)为显著正相关($P < 0.05$)其中 J 与 DEN 相关系数最大, 为 0.40 , 而 VC 与全磷(TP)呈显著负

相关($P < 0.05$), 相关系数为 -0.42 , 详见图 4B。在 BRZ 生境中, J 与 TK 和铵态氮(NH_4^+-N)、AP 与 VC 呈显著正相关, SM 与 D 、 NH_4^+-N 和有效磷(AP)与 B 呈显著负相关($P < 0.05$), 详见图 4C。

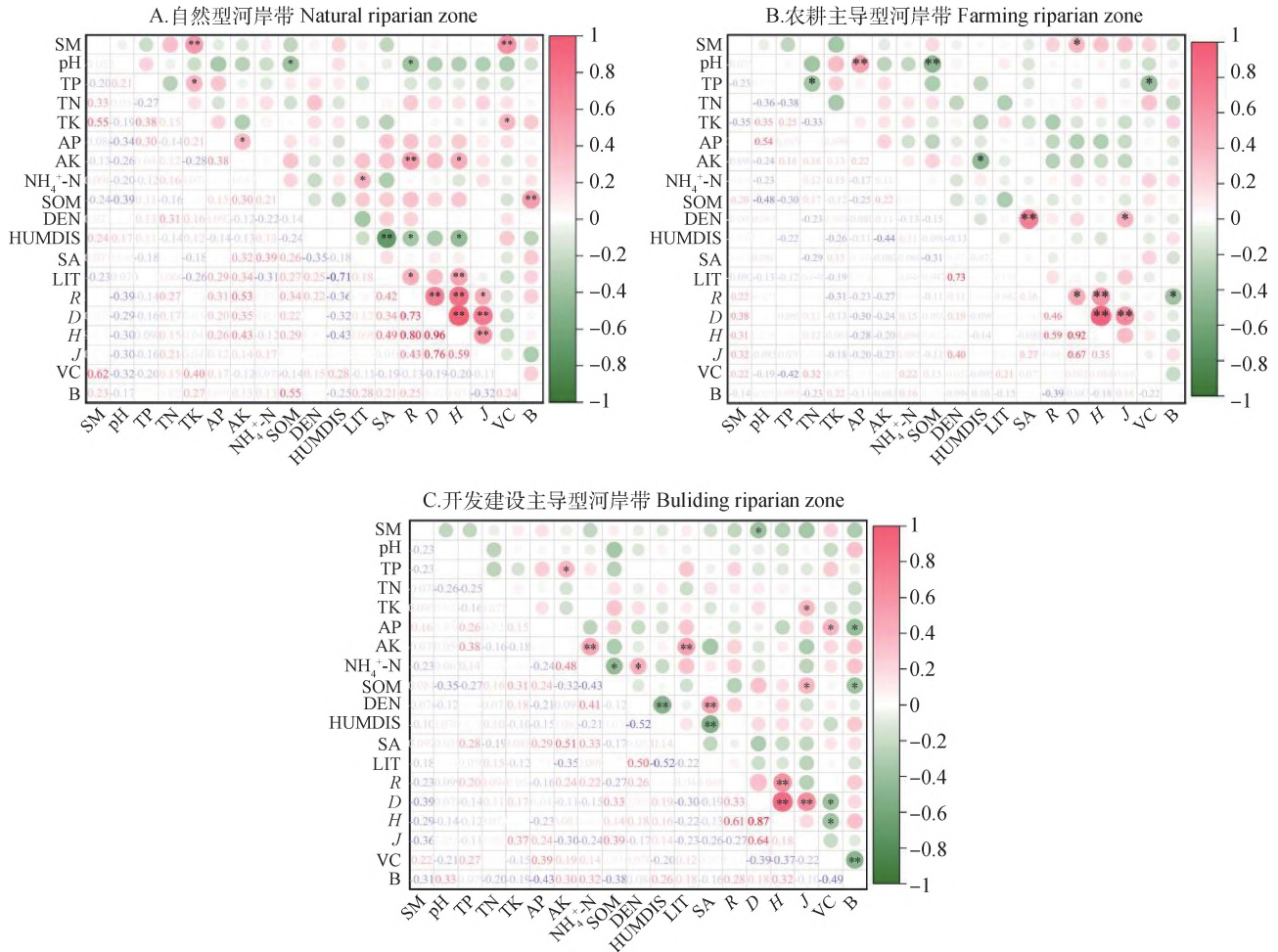


图4 不同生境类型各特征值相关性热图

Fig. 4 Pearson analysis of eigenvalues in different habitats

注:红色表示正相关,绿色表示负相关表示,数字表示为相关性系数;*表示差异显著($P < 0.05$),**表示差异极显著($P < 0.01$)

Note: Red indicate positive correlations, green indicate negative correlations, the number indicate correlation coefficients; *indicates significant differences($P < 0.05$), **indicates extremely significant differences($P < 0.01$)

2.4.2 不同生境的 CCA 排序 排序是指一个区域内调查的群落样地,按照相似度来排定各样地的位序,进而分析各样地之间及其与生境之间的关系。为了解影响调查区域内草本群落分布的主导因素,分别将三种类型的河岸带的植物群落与 13 种环境因子进行 CCA 分析且经过蒙特卡洛置换检验。由图 5A 可知,在 NRZ 生境中,所有排序轴对环境因子的解释率共为 80.93% ,其中 CCA1 解释率为 45.21% ,CCA2 解释率为 17.88% ,共解释了 63.09% ,证明前两轴能够很好的反映环境因子对

植物群落的影响,因此采用前轴作图。排序图显示,CCA1 与 SM 、 DNE 、 TN 呈正相关,与 LIT 和 TP 呈负相关,其中 SM 和 DEN 对植物群落的解释度分别为 12.40% 和 6.10% ,且均达到显著水平($P < 0.05$)(表 4),表明 CCA1 主要反映植物群落在 SM 和 DEN 梯度的分布趋势;CCA2 与 NH_4^+-N 表现为正相关,与 $HUMDIS$ 和 AK 表现为负相关,这些因子对植物群落的解释度均无显著性。排序图中,第一轴从右到左基本反映了土壤含水量和郁闭度从高到低、从大到小的变化趋势,结果表明各样方

随不同土壤含水量和林间郁闭度等环境因子呈间断分布。在较高土壤含水量的区域多以芦苇、藨草和荇菜为优势种的湿生植物群落,耐淹性好且生命力强,随着向土壤含水量逐渐较低,群落逐渐由湿生群落过渡到以益母草、救荒野豌豆等中生植物为优势种的植物群落,这与前文聚类分析结果相吻合。

在FRZ生境中(图5B),所有轴对环境因子的解释率为72.08%,其中CCA1解释率为26.00%的植物群落变异,CCA2解释率为23.02%,共解释了58.62%,包含了大部分排序信息,故用前两轴的数据来分析群落与环境因子的关系。排序图显示,CCA1与AK,pH,TP表现为正相关,与HUMDIS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$,TK表现为负相关,其中HUMDIS对植物群落的解释度为5.70%,且达到显著水平($P < 0.05$),其余因子无显著性,表明CCA1主要反映植物群落HUMDIS梯度的分布趋势;CCA2与DEN,

SM和坡向(SA)表现为负相关。排序图中,各群落分布具有一定的重叠,但总的来说又有一定的分散性,说明部分群落对生境的要求较为相似。

在BRZ生境中(图5C),所有轴对环境因子的解释率为80.74%,其中CCA1解释率为41.21%的植物群落变异,CCA2解释率为17.41%,共解释了58.62%,包含了大部分排序信息,故用前两轴的数据来分析群落与环境因子的关系。排序图中,CCA1与TN,SA表现为正相关,与AP,TP,TK表现为负相关,其中TN对植物群落的解释度分别为15.30%,且达到显著水平($P < 0.05$),其余因子无显著性,表明CCA1主要反映植物群落TN梯度的分布趋势;CCA2与SOM表现为正相关,与DEN,SM和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 表现为负相关。排序图中,样地的分布在第一轴方向较为分散,在第二轴方向较为集中,表明植物群落受TN与TP的影响较大。

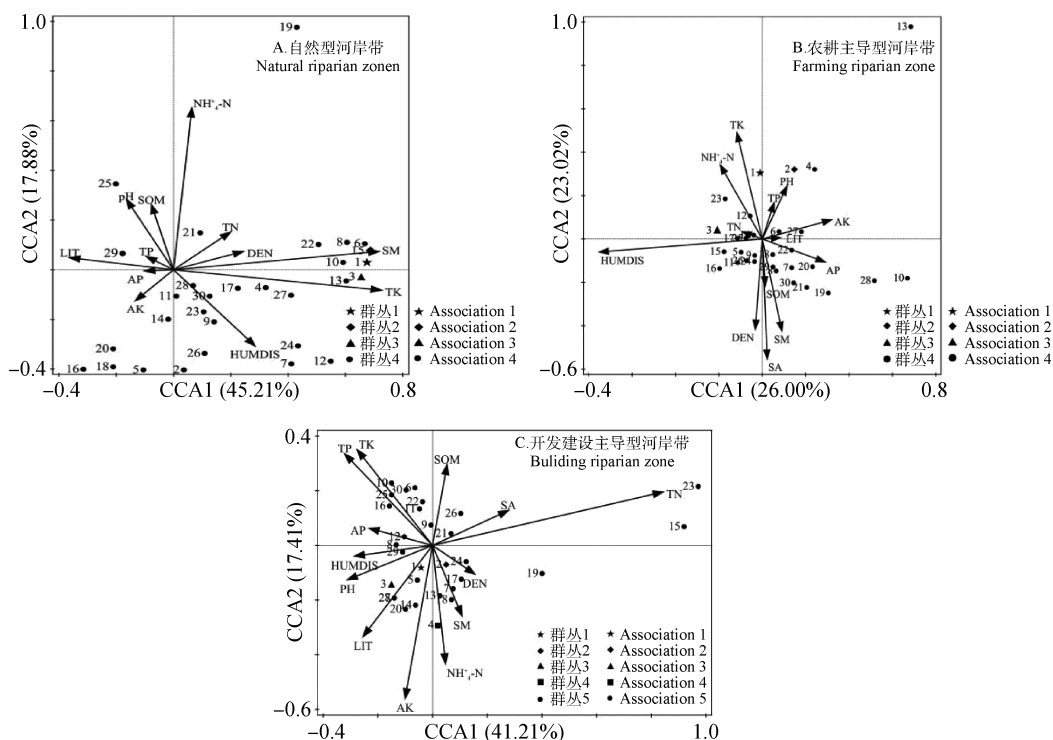


图5 不同生境草本植物群落分布和环境因子的CCA排序图

Fig. 5 CCA ranking diagram of herbaceous plant community distribution and environmental factors in different habitats

表 4 不同生境类型河岸带 CCA 不同环境因子的置换检验

Table 4 Displacement tests for different environmental factors of CCA in different habitats

生境类型 Habitat	环境因子 Environmental factor	解释度 Explains	伪 <i>F</i> 统计量 Pseudo <i>F</i> -statistties	显著性(<i>P</i>) Significance
NRZ	SM	12.4	4.0	0.002**
	DEN	6.1	2.0	0.034*
	NH ₄ ⁺ -N	4.8	1.6	0.084
	LIT	3.7	1.3	0.224
	TK	2.4	0.8	0.624
	SA	3.2	1.1	0.298
	pH	2.8	1.0	0.480
	HUMDIS	2.4	0.8	0.590
	TP	2.8	0.9	0.476
	TN	2.2	0.7	0.668
	AP	2.1	0.7	0.730
	AK	3.1	1.0	0.438
	SOM	1.9	0.6	0.798
FRZ	HUMDIS	5.7	1.7	0.048*
	TK	3.8	1.1	0.274
	TN	3.2	1.0	0.482
	NH ₄ ⁺ -N	2.7	0.8	0.682
	pH	3.1	0.9	0.460
	AP	2.6	0.8	0.528
	SOM	2.2	0.6	0.712
	DEN	2.4	0.7	0.684
	SM	2.1	0.6	0.742
	LIT	1.8	0.5	0.884
	TP	1.7	0.5	0.868
	AK	1.6	0.4	0.934
	SA	1.8	0.4	0.892
BRZ	TN	15.3	5.1	0.020*
	TP	5.4	1.8	0.060
	AK	5.3	1.9	0.064
	HUMDIS	3.8	1.3	0.194
	NH ₄ ⁺ -N	3.1	1.1	0.350
	TK	2.6	0.9	0.486
	SA	2.9	1.0	0.406
	SM	3.1	1.1	0.364
	AP	2.3	0.8	0.562
	LIT	2.1	0.7	0.642
	DEN	1.7	0.6	0.776
	pH	1.6	0.5	0.828
	SOM	1.0	0.3	0.960

注:*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)

Note:*indicates significant differences($P<0.05$),**indicates high significant differences($P<0.01$)

3 讨论

3.1 不同生境草本植物物种组成与多样性特征

草本植物是生态系统养分循环维持稳定的重要影响因子,其多样性间接地反映了植被的丰富程度^[33],同时也对减小地表径流侵蚀、改善土壤结构有着至关重要的作用^[34]。本研究调查表明,长江安庆段流域河岸带的 90 个样地中共记录草本植物

293 种,隶属于 65 科 180 属,可见长江安庆段流域植物组成较为丰富。这些草本植物种类以菊科、禾本科、蓼科、豆科、唇形科等优势科为主,这与长江下游流域的研究结果相似^[35]。在不同生境中,NRZ 草本植物物种数最多,物种多样性较好,其所在的生态系统相对稳定;BRZ 和 FRZ 的物种种类相对较少,其原因可能是 NRZ 所受的人为干扰较少,而 BRZ 和 FRZ 生境由于码头、航道整治以及河堤修复

等人为的强烈干扰因素,使其物种远低于其他生境类型。在生活型方面,三种类型河岸带均以一年生草本植物种类最多。在水分生态型方面则均以中生植物类群略高于湿生和水生植物类群,虽然该地区湿生和水生植物的占比偏低,但鉴于长江安庆段河岸带是以季节性淹没为核心的滩涂湿地,芦苇、荻、狗牙根、灰化藁草(*Carex cinerascens*)、鳢肠(*Eclipta prostrata*)等优势湿生植物在群落中仍处于较高生态位。因此,在面对未来气候的变化下,如该地区的湿地面积缩小、湿地生态系统功能退化等,管理者应进行严格监管以及及时掌握群落动态,在实现资源可持续利用的同时也维持物种多样性,以促进长江流域生物资源储存库的保护。

重要值是反映某个物种在植物群落中作用和地位的综合量化指标,能衡量物种在群落中的作用和地位,通过重要值分析,可找出群落中的主要优势种。在长江安庆段流域河岸带不同生境类型中,禾本科和豆科等优势科植物总体重要值较大,这与禾本科和豆科等植物耐水淹、耐干旱、耐贫瘠且有较强生态适应能力与较大生态位的生物学特性有关^[36],如禾本科植物根系为须根系,侧根发达,分布于浅层土壤且吸收养分能力较强,生产能力较强。豆科植物根瘤菌可将大气中游离的 N_2 转化以供植物利用,对恶劣的生境具有强烈的适应性^[37]。这表明芦苇和狗牙根等禾本科植物、救荒野豌豆等豆科植物适宜作为长江安庆段河岸带生态系统植物的重建类型。

从物种多样性指数上看,长江安庆段不同类型河岸带草本植物的 R 、 H 和 D 间差异显著,且三种生境的变化趋势相同。其中自然型河岸带 R 、 H 和 D 均最高,FRZ和BRZ相对较低,主要原因可能是由于自然型河岸带人为干扰较少,农耕主导型河岸带和开发建设主导型河岸带则分别受农耕、码头建设与河堤修复等人为因素干扰。长江安庆段河岸带物种均匀度指数整体起伏波动较小,说明长江安庆段河岸带草本植物群落的组成以少数物种为主,优势现象明显。生物量是植物对环境适应能力及生长发育的体现,同时也是生态系统结构构建和获取能量的体现^[38],因此生物量可作为生境是否有利于植物生长的测定指标之一^[39]。本研究表明,NRZ生境中的植物群落的平均生物量显著高于其余两种生境,与生境存在联系,但同时也与植物生长特性有关,即主要是由于芦苇的优势作用,其拥有植株

高大、数量多、根茎粗壮及叶宽大特点。此外,这也与NRZ中芦苇较高的重要值以及较高的植被覆盖率相一致。

3.2 不同生境植物群落分类特征

群丛的划分可以明确反映群落与环境条件之间的密切联系以及植物生长的特定生境类型,有效揭示群丛的多样性组成^[40]。随着近年来经济的蓬勃发展,对河流及河岸的过度开发利用,如大规模农田开垦、防洪工程建设和码头建设等,使长江安庆段河岸带形成了不同类型的河岸带,其植物群落类型与组成在不同生境不尽相同。Ward最小方差聚类将长江安庆段消落区中3种生境的植物群落分别划分成了4、4、5个群落类型,其中芦苇+益母草+救荒野豌豆、早熟禾+救荒野豌豆+野老鹳草和狗牙根+喜旱莲子草+野老鹳草分别在NRZ,FRZ和BRZ中出现的频率最高,分别占总样方数的86.67%、86.67%和83.33%,是长江安庆段海岸带不同类型河岸带中的代表群落类型。

3.3 不同生境类型河岸带环境因子对植物群落分布和多样性的影响

植被分布格局与多样性是自然环境、群落内部各物种相互作用以及人类活动干扰的共同结果^[41]。大量研究表明,生态因子对植物群落结构、多样性及生长分布具有决定性的作用^[42]。如经纬度和海拔通常运用在大尺度上物种多样性分布格局的研究,而在区域尺度上,地形、气候、土壤3种环境要素则的不同组合在小尺度上更容易产生复杂的群落物种多样性格局^[43]。由于人为干扰以及气候变化等因素的影响,不同类型河岸带的生境存在一定的差异。也有学者对河岸带植被与环境因子的关系的研究表明,河岸带植物的群落分布格局通常受到水文、河流类型、人为干扰、地形以及人为干扰等多种因素的综合影响^[44]。

本研究对长江安庆段不同类型河岸带草本植物群落与环境因子的CCA分析结果表明,在NRZ生境中,SM、DEN和 NH_4^+-N 对NRZ草本植物群落的分布存在较大影响。这与武晓倩^[45]和陈功^[46]等人的研究结果一致。在调查的样地中,有25个样地的郁闭度高于40%,有21个样地的含水量高于29%,总体呈现出阴凉湿润的郁闭环境。主要是由于本区域自上世纪70年代以来为防治日本血吸虫而在沿岸大量栽种了加杨林,使其郁闭度较高。群

丛1、2和3大多以耐水淹的湿生植物为主,其根系发达,因此容易将降雨冲刷的大部分凋落物和土壤汇聚于其生长区域,且在较高水分湿度的条件下能够快速分解为其能够利用的营养元素^[47]。在FRZ生境中,HUMDIS是影响植物群落分布的主要环境因子,主要是由于人类频繁的农田耕作和人类沿河岸居住等活动影响了河岸带植物群落的物种组成,使一些农田杂草(如独行菜、球序卷耳、早熟禾和芥)通常伴随人类活动而进入河岸带植物群落中,这与实地调查中这些农田杂草植物具有较大重要值的现象一致。在BRZ生境中,TN和TP是影响植物群落分布的主要环境因子,这可能是由于是AK是受植被类型和涉水工程建设等干扰活动的影响。研究表明,土壤中氮元素含量主要来源于土壤有机质,所以土壤中有机质含量较高的区域其氮元素含量也较丰富^[48]。但在BRZ生境中,其植被覆盖度和地表凋落物厚度均较低,在一定程度上限制了有机质的含量^[49],因此TN成为了限制BRZ群落分布的主要影响因素之一。此外,入侵植物喜旱莲子草、狗牙根和益母草作为群落的优势物种,具有较高生境适应能力和较宽的生态位,能够有效利用土壤养分,因而对土壤养分含量要求较低^[50]。

Pearson相关性分析表明,在NRZ生境中SM,AK,LIT,SOM、多样性指数、植被盖度和生物量的相关性极显著,原因可能是土壤含水量的高低在一定程度上影响了土壤元素和有机质的含量,使得一些植物该种生境的适应性不同而导致多样性的变化。在FRZ生境中,pH与AP呈正相关,与SOM负相关,表明土壤的酸碱度越高,则有机质流失越多;SM和TP与群落物种多样性指数、植被覆盖度显著相关,这与前面的研究是一致的,水分条件和土壤磷元素是影响物种多样性的最主要因子。在BRZ生境中,AP与VC呈正相关,SM与D、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和AP与B呈负相关。主要原因是对于耐旱的中生植物而言,土壤相对干燥能够一定程度上促进喜光植物的光合作用以及种子的萌发。此外,BRZ生境中几乎无木本植物覆盖,其热量条件较好,草本植物大多为耐旱的中生植物,有利于其生长发育,从而提高其物种多样性^[26]。综合而言,长江安庆段不同类型河岸带群落分布和多样性与众多环境因子都具有显著关系,说明植物群落的分布与多样性受到不同因素的耦合作用而非某个单一因素的影响,使得植被与环境因子之间的关系极其复杂,因

此对于他们之间的相互关系还有待进一步的研究。

4 结论

长江安庆段河岸带草本植物物种数总体上较为丰富,在物种组成上主要以菊科、禾本科、唇形科和豆科等植物占优势地位。不同类型河岸带的植物群落类型、植被盖度、生物量及物种多样性存在显著差异。各生境中影响群落分布格局和多样性特征环境因子有所不同,其中自然型河岸带更易受土壤含水量和郁闭度的影响,而开发建设主导型河岸带与农耕主导型河岸带则分别更容易受到土壤TN和人为干扰的影响。本研究的结果为理解河岸带植物对环境变化的适应策略提供了科学依据,并对河岸带的生态保护和生物多样性保护具有重要的参考价值。然而,目前的研究尚无法全面解释长江安庆段河岸带草本植物群落多样性与环境因子之间的关系,且对整个长江安庆段的植物群落的动态变化仍缺乏系统性研究。因此,未来还需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 童跃伟,屈利利,符庆响,等. 大别山南坡森林植物群落物种多样性及其与海拔因子的关系[J]. 生态学报, 2024,44(12):5307-5317
- [2] SHAHEEN H,ULLAH Z,KHAN S M,HARPER D M. Species composition and community structure of western Himalayan moist temperate forests in Kashmir[J]. Forest Ecology & Management, 2012, 278:138-145
- [3] COELHO M T P,BARRETO E,RANGEL T F,et al. The geography of climate and the global patterns of species diversity [J]. Nature, 2023,622(7983):537-544
- [4] 张柳桦,齐锦秋,柳苹玉,等. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(1):166-175
- [5] 余飞燕,王坤悦,叶鑫,等. 金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究[J]. 草地学报, 2020, 28(3):793-800
- [6] 胡文浩,张晓婧,陈雅杰,等. 坝上地区不同年代退耕还林生境的草本层植物多样性及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1116-1126
- [7] 王俊伟,李伟,陈瑾芳,等. 西藏尼洋河干流河岸带维管植物区系特征[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(4): 137-145
- [8] DING L L,ZHOU J Y,LI Q Y,et al. Effects of Land-Use Type and Flooding on the soil microbial community and functional genes in reservoir riparian zones[J]. Microbial Ecology, 2022:83,393-407
- [9] GARSSSEN A G,ANNETTE B P,VOESENEK L A C J,et al. Riparian plant community responses to increased flooding: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2015,21(8):2881-2890
- [10] GREGORY S V,SWANSON F J,MCKEE W A,et al. An

- Ecosystem Perspective of Riparian Zones [J]. *BioScience*, 1991, 41(8):8
- [11] ABACCHI E T, ORRELL D L C, AUER R H. Development, maintenance and role of riparian vegetation in the river landscape[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 40(3):497-516
- [12] 王净杰, 刘钟元, 高鑫, 等. 西藏雅鲁藏布江中游草本植物群落多样性与海拔因子的关系[J]. *草地学报*, 2024, 32(11):3579-3590
- [13] 张志永, 刘晖, 董方勇, 等. 三江源河岸带植物群落空间分布特征及其驱动因子解析[J]. *环境科学*, 2024, 45(09):5351-5360
- [14] YI X, HUANG Y, MA M H, et al. Plant trait-based analysis reveals greater focus needed for mid-channel bar downstream from the Three Gorges Dam of the Yangtze River[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:105950
- [15] ZHENG J, ARIF M, ZHANG S, et al. Dam inundation simplifies the plant community composition[J]. *Science of The Total Environment*. 2021, 801(15):149827
- [16] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华等. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(11):4116-4126
- [17] 富金赤, 李晓莎, 许中旗, 等. 冀北山地阳坡草本植物物种多样性的空间异质性研究[J]. *草地学报*, 2018, 26(6):1298-1304
- [18] WIEGAND T, MOLONEY K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. *Oikos*, 2004, 104(2):209-229
- [19] 马凤娇, 蔺丹清, 张晓可, 等. 安庆西江长江江豚迁地保护基地河岸带植物群落结构特征[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(03):623-633
- [20] 曹雨, 房莉, 余健, 等. 长江下游沿江丘岗圩田地形区土壤养分空间分布特征及影响因素[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(5):453-461
- [21] BUDD W W, COHEN P L, SAUNDERS P R, et al. Stream corridor management in the Pacific Northwest: I. Determination of stream-corridor widths [J]. *Environmental Management*, 1987, 11(5):587-597
- [22] COOPER J R, GILLIAM J W, DANIELS R B, et al. Riparian Areas as Filters for Agricultural Sediment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51:416-422
- [23] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6):533-548
- [24] 周华坤, 李珊, 孙建, 等. 三江源区高寒草甸植物群落与土壤理化性质沿海拔梯度的变化特征[J]. *草地学报*, 2023, 31(6):1735-1743
- [25] 程莅登, 邓洪平, 何松, 等. 长江重庆段消落区植物群落分布格局与多样性[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12):3626-3634
- [26] 刘倩, 丁彦芬, 宋杉杉, 等. 南京明城墙绿带草本层自生植物群落数量分类与排序分析[J]. *草业学报*, 2024, 33(5):1-15
- [27] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(第二版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2006, 1-67
- [28] FOLCH J, LEES M, SLOANE STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1957, 226(1):497-509
- [29] BEERS J R F, SIZER I W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1952, 195(1):133-140
- [30] El-SAMAD H M A, MOSTAFA D. Growth, Metabolites, Protein Profile and Esterase Enzyme of Wheat Grown under Osmotic Stress with Exogenous Application of *Allium sativum* [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2018, 9(4):902-919
- [31] 弓晓峰, 张静, 张振辉, 等. 纳氏试剂比色法测定土壤铵态氮的研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, (1):43-44, 117
- [32] 杨小菊, 强巴克珠, 韩彦刚, 等. 雅鲁藏布江中游河谷植物群落数量分类与排序[J]. *草地学报*, 2024, 23(9):2784-2793
- [33] 逯金鑫, 高飞, 周荣磊, 等. 不同植被类型下草本群落与土壤因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3):310-317, 326
- [34] 郭茹茹, 杨磊, 李宗善, 等. 半干旱黄土高原苜蓿草地撂荒过程土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 202(23):8618-8626
- [35] 李雨晗, 丁彦芬, 张畅为. 南京外秦淮河河岸带草本植物多样性及其对环境的响应[J]. *中国野生植物资源*, 2023, 42(10):101-106
- [36] 高瑞, 艾宁, 刘广全, 等. 煤矿复垦区不同修复年限林下草本群落特征及其与土壤耦合关系[J]. *草业学报*, 2022, 31(6):61-68
- [37] 陆保福, 康文娟, 师尚礼, 等. 豆科植物-根瘤菌固氮系统及其碳氮互作[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(11):119-135, 144
- [38] 聂婷婷, 董乙强, 杨合龙, 等. 禁牧对伊犁绢蒿种群数量特征及其构件生物量分配的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(3):483-490
- [39] 罗永开, 方精云, 胡会峰. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(1):115-125
- [40] 王国宏, 方精云, 郭柯, 等. 《中国植被志》研编内容与规范[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(2):128-178
- [41] 刘旻霞, 南笑宇, 张国娟等. 高寒草甸不同坡向植物群落物种多样性与功能多样性的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(13):5398-5407
- [42] LYON J, GROSS N M. Patterns of plant diversity and plant-environmental relationships across three riparian corridors [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 204(2-3):267-278
- [43] 齐丹丹, 杨洪晓, 卢琦等. 浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6):65-77
- [44] 程莅登. 长江重庆段河岸植物群落及物种多样性研究[D]. 重庆:西南大学, 2019:1-2
- [45] 武晓倩, 范保硕, 滕叶文, 等. 白洋淀流域河岸带草本植物群落分布特征与土壤环境因子的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(6):1608-1614
- [46] 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
- [47] 阿旺, 吕汪汪, 周阳, 等. 温度和湿度对高寒草甸凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(17):6846-6853
- [48] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(8):2752-2761
- [49] 杨佳, 于志军, 王参, 等. 雄安新区不同土地利用方式土壤性状的空间分布特征——以容城县为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(17):6764-6772
- [50] 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

(责任编辑 付 宸)