

DOI: 10.20103/j.stxb.202307111487

李阳, 罗健夫, 侯志勇, 谢永宏, 陈薇, 黄鑫, 曾静, 于晓英. 莽山湖畔湖国家重要湿地植物多样性及环境解释. 生态学报, 2024, 44(12): 5340-5350.
Li Y, Luo J F, Hou Z Y, Xie Y H, Chen W, Huang X, Zeng J, Yu X Y. Plant diversity and environmental interpretation of Mang Shan Lang Pan Lake national important wetland. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5340-5350.

莽山湖畔湖国家重要湿地植物多样性及环境解释

李 阳^{1,2}, 罗健夫⁴, 侯志勇^{1,*}, 谢永宏¹, 陈薇^{1,3}, 黄 鑫^{1,2}, 曾 静¹, 于晓英²

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 农业生态过程重点实验室, 中国科学院洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125

2 湖南农业大学园艺学院, 长沙 410128

3 湖南农业大学风景园林与艺术设计学院, 长沙 410128

4 益阳市林业局, 益阳 413000

摘要: 研究莽山高山湖泊湿地植物多样性对环境因子的响应分析, 不仅有助于深入了解湿地植物对环境变化下的适应策略, 同时对保护当地湿地珍稀濒危物种具有重要价值。采用系统聚类分析、典范对应分析(CCA)和 Pearson 相关性分析等方法, 对研究区 30 个植物群落样方进行分析, 研究植物多样性与环境因子(土壤、水)之间的相互关系。研究结果表明: 湖畔湖国家重要湿地植物群落可分为蕨状苔草+宽叶泽苔草群落、雪白睡莲+菹菜群落、水毛花+宽叶泽苔草群落、菹菜+宽叶泽苔草群落等 4 类。雪白睡莲+菹菜群落 Patrick 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数最低, Simpson 多样性指数最高, 水毛花+宽叶泽苔草群落与之相反。湖畔湖国家重要湿地植物多样性与土壤速效钾和水深呈极显著相关性, 与水质氨氮呈显著相关性, 水深和土壤速效钾是影响湿地植物群落分布格局的主要因子。群落物种多样性指数与环境因子之间存在显著相关性, 群落物种丰富度指数随水深增加呈先增后降的趋势, 群落物种均匀度指数与水质氨氮浓度之间呈负相关关系。本研究旨在揭示湖畔湖国家重要湿地植物多样性与环境因子之间的生态关系, 为保护湿地珍稀物种及维持湿地生态系统稳定提供理论依据。

关键词: 高山湿地; 群落多样性; 环境因子; 系统聚类; 典范对应分析(CCA); Pearson 相关性分析

Plant diversity and environmental interpretation of Mang Shan Lang Pan Lake national important wetland

LI Yang^{1,2}, LUO Jianfu⁴, HOU Zhiyong^{1,*}, XIE Yonghong¹, CHEN Wei^{1,3}, HUANG Xin^{1,2}, ZENG Jing¹, YU Xiaoying²

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, the Chinese Academy of Sciences, Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 College of Landscape Architecture and Art Design, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

4 Yiyang Forestry Bureau, Yiyang 413000, China

Abstract: This study investigates the response of plant diversity in the high-altitude lakeside wetlands of Mang Shan to environmental factors. It not only helps in understanding the adaptive strategies of wetland plant communities to environmental changes but also holds significant value for the protection of local rare and endangered wetland species. In this study, methods such as Hierarchical cluster analysis, Canonical Correspondence Analysis (CCA), and Pearson correlation analysis were used to analyze 30 plant community plots in the study area, exploring the relationships between plant community diversity and environmental factors (soil and water). The results indicated that the plant communities in

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601106); 湖南省科技创新平台计划(2022PT1010); 国家科技基础资源调查专项(2019FY100600); 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心开放课题基金(2023011)

收稿日期: 2023-07-11; **网络出版日期:** 2024-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzy2005@isa.ac.cn

the Lang Pan Lake national important wetland were categorized into four groups: Ass.*Carex filicina*+*Caldesia grandis*, Ass.*Nymphaea tetragona*+*Brasenia schreberi*, Ass.*Caldesia grandis*+*Scirpus triangulatus*, and Ass.*Brasenia schreberi*+*Caldesia grandis*. Among these groups, Ass.*Brasenia schreberi*+*Caldesia grandis* exhibited the lowest Patrick's richness index and Pielou's evenness index, while had the highest Simpson's diversity index, with the Ass.*Caldesia grandis*+*Scirpus triangulatus* showing the opposite trend. The diversity of wetland plant was significantly correlated with soil exchangeable potassium and water depth and also significantly correlated with water quality ammonia nitrogen. Water depth and soil exchangeable potassium are identified as the primary factors influencing the distribution pattern of wetland plant communities. A significant correlation between community diversity indices and environmental factors, the species richness index of the community exhibited an initial increase followed by a decrease with increasing water depth, while the species evenness index showed a negative correlation with water quality ammonia nitrogen concentration. The study aims to uncover the ecological relationship between plant community species diversity and environmental factors in the Lang Pan Lake national important wetland, providing a theoretical basis for the conservation of rare wetland species and the maintenance of wetland ecosystem stability.

Key Words: alpine wetlands; community diversity; environmental factors; Hierarchical Cluster Analysis; canonical correspondence analysis; Pearson correlation analysis

湿地是由水陆相互作用形成的独特生态系统,是全球三大生态系统之一,被誉为“地球之肾”^[1],它不仅含有丰富的自然资源,还对人类的生活环境具有巨大的调控作用^[2]。湿地植物在湿地生态系统中发挥着不可或缺的作用,它既是组成生态系统的一部分,又可反作用于湿地,并产生影响^[3]。湿地植物多样性能有效反应湿地恢复效果,同时在群落的生态系统功能的维持中具有重要作用^[4]。植物群落是一定区域内所有植物的集合,其结构、功能和生态特征综合反映了湿地生态环境的基本特点和功能特性^[5-6],其多样性能够反映物种在群落中的作用和地位、环境资源利用的状况及维持群落自生的稳定机制有重要意义,同样也是生物多样性保护的重要依据^[7]。环境因子直接或间接影响着植物群落的多样性和分布^[8],目前,对植物群落多样性的研究主要集中在海拔梯度、土壤养分、水环境、演替梯度等,土壤和水环境与植物群落结构之间的相互关系,一直是研究的热点^[9-14]。土壤是决定植物群落结构和组成的决定性因素^[9-10],其中植物个体以及物种间对土壤资源的竞争是影响植物群落物种组成和演替的关键因子^[11]。水分作为湿地主要的控制因素,直接影响到湿地植物物种组成、多样性和群落演替^[12-14]。因此,研究湿地植物群落结构与土壤和水分之间的关系尤为重要。

高山湖泊湿地,在涵养水源、固碳、调节气候、维持生物多样性、生态系统恢复与重建等方面具有重要的生态服务功能^[15-17]。湖畔湖国家重要湿地为我国亚热带地区典型高山湖泊湿地,对气候变化响应敏感,可以作为研究的参照体系。该湿地物种多样性丰富,是莼菜(*Brasenia schreberi*)、宽叶泽苔草(*Caldesia grandis*)、雪白睡莲(*Nymphaea candida*)、莽山烙铁头蛇(*Protobothrops mangshanensis*)等珍稀濒危保护物种的重要栖息地。目前湖畔湖国家重要湿地的研究主要针对植物形态及生理特征^[18-20],关于湿地植物群落及环境相关性的研究尚未开展。本研究通过对湖畔湖国家重要湿地植物多样性与环境因子(土壤、水)进行相关性分析,目的在于揭示湖畔湖湿地植物群落的分布格局和环境因子对植物群落物种多样性的影响,以期为全球气候变化背景下高山湿地珍稀物种的保护及湿地生态系统保护修复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

湖畔湖国家重要湿地位于湖南郴州市莽山国家级自然保护区,是国家重要湿地,地理位置 112°53'28"E, 24°55'15"N,海拔 1314 m(见图 1)。属中亚热带湿润气候,年均气温 17.2 °C,7 月平均气温 22.7 °C,1 月平均

气温 5.2 ℃, 极端最高气温 36.2 ℃, 极端最低气温 -9.8 ℃, 年均降雨量 2225.3 mm。全年无霜期 290 d。浪畔湖国家重要湿地共调查到湿地植物 30 科 49 属 54 种, 其中国家 II 级保护植物雪白睡莲 (*Nymphaea tetragona*)、莼菜 (*Brasenia schreberi*) 以及省级保护植物宽叶泽苔草 (*Caldesia grandis*) 在该湿地均有大面积分布, 是其重要栖息地。

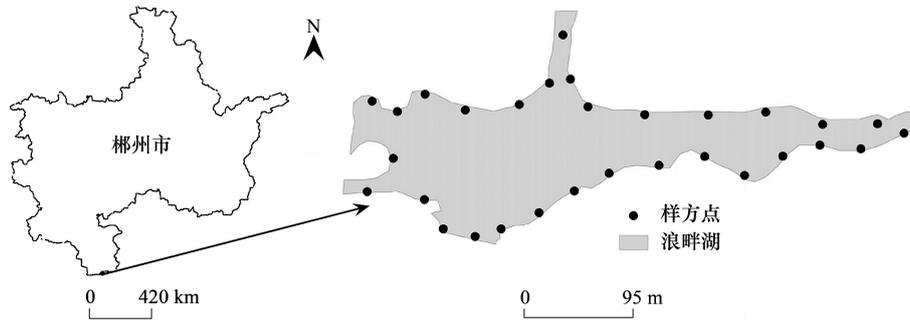


图 1 研究区域图

Fig.1 Map of study area

1.2 调查方法

植物群落的调查采用样线法和样方法。浪畔湖国家重要湿地属高山湖泊湿地, 植被类型为水生植物, 主要分布于边岸及浅水域。本研究沿湖设置环形样线, 每隔 50 m 设置 1 m × 1 m 样方 1 个, 共 30 个 (图 1)。记录每个样方内各植物物种的名称、实测样方单位面积内各物种的数量、用卷尺测量各物种高度、采用目测法估算单位面积内各物种盖度。

1.3 土壤、水样样品采集和测定

每个样方用土壤取样器采集 5 个 0—20 cm 土样, 让后混合为一个样品放入自封袋密封, 同时取水样 1000 mL, 将采集的样品编号记录, 并测量植物群落环境水深 (WD)。

土壤测定指标及方法: 土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、速效磷 (AP)、全钾 (TK)、速效钾 (AK) 和土壤 pH (spH)。SOC 利用重铬酸钾容量法测定, TN 利用凯氏定氮法测定, TP、AP 利用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮—钼锑抗比色法测定, TK 利用 HF-HClO_4 消煮—火焰光度法测定, AK 利用乙酸铵提取—火焰光度法测定, spH 利用电位法测定^[21]。

水样测定指标及方法: 总有机碳 (TOC)、可溶性有机碳 (DOC)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、水质 pH (wpH)。TOC 使用燃烧氧化—非分散红外吸收法测定, DOC 使用 TOC 分析仪测定, TP 使用钼锑抗分光光度法测定, TN 使用过硫酸钾氧化分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 使用纳氏试剂光度法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 使用紫外分光光度法测定, wpH 使用玻璃电极法测定。

1.4 数据分析

1.4.1 物种多样性分析

多样性指数选取 Patrick 丰富度指数 (R), Shannon-Wiener 多样性指数 (H), Simpson 多样性指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J), 各指数计算公式分别为^[7]:

Patrick 丰富度指数 (R): $R = S$

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

Simpson 多样性指数 (D):
$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2, P_i = N_i/N$$

Pielou 均匀度指数 (J): $J = H/\ln S$

式中: S 为样方内出现的物种总数, N_i 为样方内第 i 个种的重要值, N 为样方内所有物种重要值之和。

重要值: $IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}) / 3$

1.4.2 数据处理

群落聚类采用 Word 聚类法对群落进行数量划分,以物种的重要值为测度,计算样方间的 Euclidean 距离,再依据距离的差异划分群落,该分析使用 SPSS 24 软件进行。植物群落以物种重要值为响应变量与环境因子为环境变量使用 Canoco 5.0 软件进行典范对应分析(CCA),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。在 CCA 排序图中,各个环境因子线条的长度表示这个环境因子与优势物种群落分布关系的大小,两条线条之间的夹角表示这两环境因子之间相关性的大小。群落物种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 Origin2021 软件进行并绘图。

2 结果和分析

2.1 群落数量分类

对 30 个植物群落进行 Word 聚类分析,根据植物群落分类和命名原则,共划分为 4 个群丛(图 2)。

群丛 I: 蕨状苔草+宽叶泽苔草群丛(Ass. *Carex filicina*+*Caldesia grandis*)

包括 1、4、7、11、24、30 共 6 个样方。优势种蕨状苔草平均高度为 55.2 cm,平均盖度 90%。宽叶泽苔草平均高度为 32.3 cm,平均盖度 4.25%。伴生种水毛花平均高度为 74 cm,平均盖度 10%。长箭叶蓼平均高度为 6 cm,平均盖度 5%。群落分布区平均水深 5 cm。

群丛 II: 雪白睡莲+莼菜群丛(Ass. *Nymphaea tetragona*+*Brasenia schreberi*)

包括 8、13 共 2 个样方。优势种雪白睡莲平均高度 110 cm,平均盖度 92.5%。莼菜平均高度 73 cm,平均盖度 5%。无其余伴生种。群落分布区平均水深 91.5 cm。

群丛 III: 水毛花+宽叶泽苔草群丛(Ass. *Caldesia grandis*+*Scirpus triangulatus*)

包括 2、3、9、15、17、20、21、22、23、25、26 共 11 个样方。优势种水毛花平均高度为 90.9 cm,平均盖度 57.7%。宽叶泽苔草平均高度为 74 cm,平均盖度 28.3%。伴生种雪白睡莲平均高度 31 cm,平均盖度 7.5%。莼菜平均高度 24 cm,平均盖度 30%。群落分布区平均水深 21 cm。

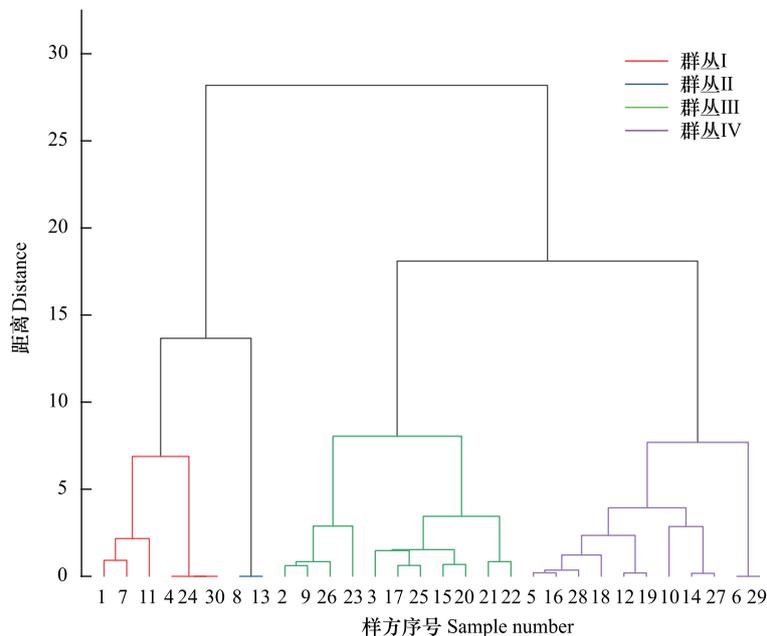


图 2 群落聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of communities

群丛Ⅳ: 菹菜-宽叶泽苔草群丛 (*Ass. Brasenia schreberi + Caldesia grandis*)

包括 5、6、10、12、14、16、18、19、27、28、29 共 11 个样方。优势种菹菜平均高度 37.5 cm, 平均盖度 73%。宽叶泽苔草平均高度为 52 cm, 平均盖度 30.6%。伴生种水毛花平均高度为 38 cm, 平均盖度 11%。雪白睡莲平均高度 74 cm, 平均盖度 5%。泽漆、画眉草、荸荠少量分布。群落分布区平均水深 33 cm。

2.2 群丛多样性指数分析

图 3 中点表示群丛中不同群落的多样性指数数值, 长方形颜色区域表示群丛中所有群落的多样性指数平均值, 即群丛多样性指数值。多样性指数为 Patrick 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数。

Simpson 多样性指数与 Shannon-Wiener 多样性指数可以反映群丛中优势种作用的大小, Simpson 多样性指数数值越高, 优势种的生态优势度就越高, 而 Shannon-Wiener 多样性指数与生态优势度呈负相关关系, H 值越高, 优势种的生态优势度反而越小。

群丛Ⅰ(蕨状苔草+宽叶泽苔草群丛)和群丛Ⅱ(雪白睡莲+菹菜群丛)群丛结构简单, 群丛物种丰富度低且优势种优势度突出, 导致群丛 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数较低, Simpson 多样性指数较高。群丛Ⅰ Shannon-Wiener 多样性指数最低, 群丛Ⅱ Patrick 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数最低, Simpson 多样性指数最高。

群丛Ⅲ(水毛花+宽叶泽苔草群丛)和群丛Ⅳ(菹菜+宽叶泽苔草群丛)群丛结构复杂, 群丛物种丰富度高且各物种分布相对均匀, 导致群丛 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数较高, Simpson 多样性指数较低。群丛Ⅲ Shannon-Wiener 多样性指数和 Patrick 丰富度指数最高, Simpson 多样性指数最低, 群丛Ⅳ Pielou 均匀度指数最高。

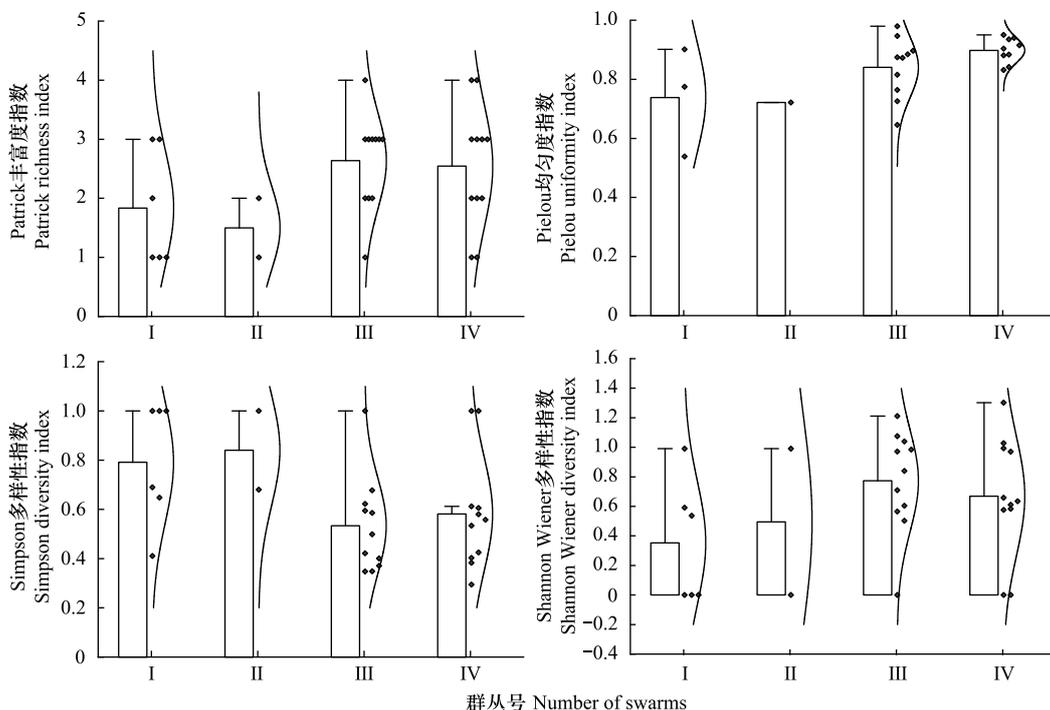


图 3 群丛的多样性指数(平均值)

Fig.3 Diversity index of clusters (average)

2.3 植物群落与环境因子的 CCA 分析

2.3.1 植物群落与土壤因子的 CCA 分析

将 30 个植物群落与所选取的 7 个土壤因子进行 CCA 分析且经蒙特卡洛置换检验, 结果表明, 第一排序

轴 ($F=6, P=0.002$) 和所有排序轴 ($F=1.7, P=0.003$) 均显示差异显著 ($P<0.05$), 证明土壤因子与植物群落存在线性关系。所有排序轴对土壤因子的解释率共 35%, 其中 CCA1 解释率为 21.39%、CCA2 解释率为 7.14%, 共解释了 28.53%, 证明前两轴能够很好的反映土壤因子对群落的综合影响, 因此采用前两轴作图 (图 4)。

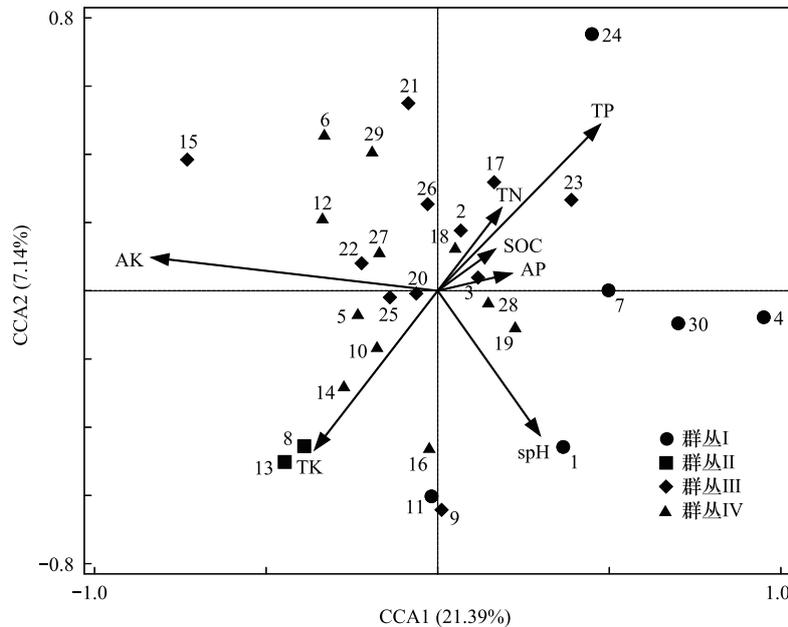


图 4 群落和土壤因子的 CCA 排序图

Fig.4 CCA ranking diagram of community and soil factors

箭头表示土壤因子;相同符号标记代表同一群落;AK:速效钾 available potassium;TK:全钾 total potassium;AP:速效磷 available phosphorus; TP:全磷 total phosphorus;SOC:有机碳 soil organic carbon;spH:土壤 pH;TN:全氮 total nitrogen

排序图显示 (图 4), CCA1 与 AP、SOC、TP 呈正相关, 与 AK 呈负相关, 其中 AK 对植物群落的解释度 (15.2%) 达到显著水平 ($P<0.05$), 其余因子无显著性 ($P>0.05$), 证明 CCA1 主要反映植物群落在 AK 梯度的分布趋势; CCA2 与 TN 呈正相关、与 TK、spH 呈负相关, 这些因子对植物群落的解释度均无显著性 ($P>0.05$), 证明 CCA2 主要反映 TN、TK、spH 对群落的综合影响 (表 1)。排序图中, 群丛 I 分布区土壤中 AK 最低; 群丛 IV 和群丛 III 主要分布于土壤 AK 较高区域, 但群丛 IV 所分布的区域土壤 AK 略高于群丛 III; 群丛 II 分布区土壤 AK 含量高于群丛 I, 低于群丛 IV 和群丛 III。土壤 AK 是影响植物群落分布的主要土壤因子。

表 1 CCA 不同土壤因子的置换检验

Table 1 Displacement test for different soil factors of CCA

土壤因子 Soil factor	解释度 Explains/%	伪 F 统计量 Pseudo f-statistics	显著性 (P) Significance
速效钾 AK/(mg/kg)	15.2	5.0	0.002**
全钾 TK/(g/kg)	6.1	2.1	0.078
速效磷 AP/(mg/kg)	4.8	1.7	0.162
全磷 TP/(g/kg)	2.6	0.9	0.464
有机碳 SOC/(g/kg)	2.7	0.9	0.44
土壤 pH spH	1.8	0.8	0.616
全氮 TN/(g/kg)	1.4	0.5	0.774

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; AK:速效钾 available potassium; TK:全钾 total potassium; AP:速效磷 available phosphorus; TP:全磷 total phosphorus; SOC:有机碳 soil organic carbon; spH:土壤 pH; TN:全氮 total nitrogen

2.3.2 植物群落与水环境因子的 CCA 分析

将 30 个植物群落与所选取的 8 水因子进行 CCA 分析且经蒙特卡洛置换检验,结果表明,第一排序轴 ($F=6.4, P=0.008$) 和所有排序轴 ($F=1.8, P=0.024$) 均显示显著差异 ($P<0.05$),证明水因子与群落的分布存在线性关系。所有排序轴对水因子的解释率共 40.4%,其中 CCA1 解释率为 23.16%、CCA2 解释率为 9.82%,共解释了 32.98%,证明前两轴能够很好的反映水因子对群落的综合影响,因此采用前两轴作图(图 5)。

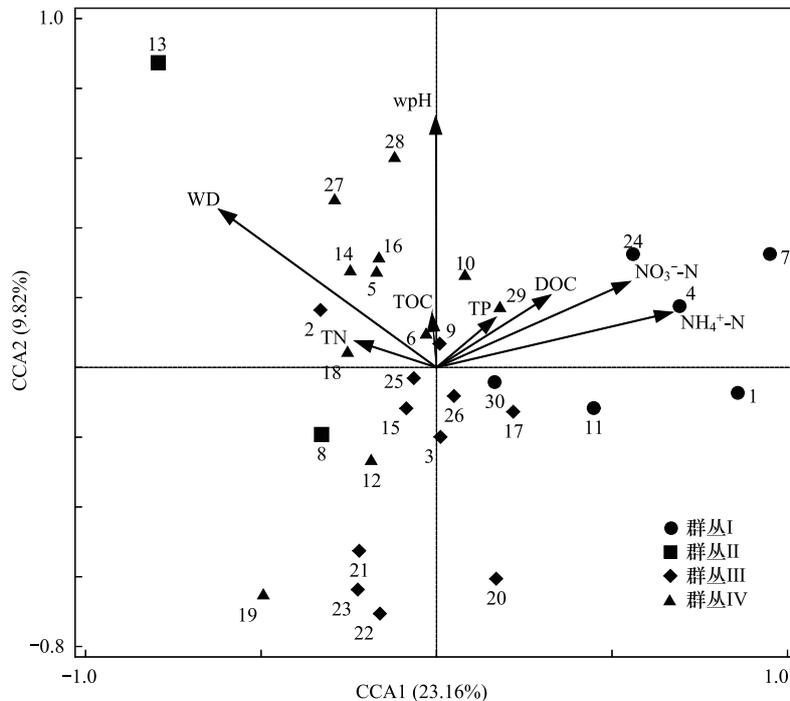


图 5 群落和水环境因子的 CCA 排序图

Fig.5 CCA ranking diagram of community and aquatic environmental factors

箭头表示土壤因子;相同符号标记代表同一群落;WD:水深 water depth; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:氨氮 ammonium nitrogen; wpH:水 pH; TP:总磷 total phosphorus; TN:总氮 total nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝氮 nitrate nitrogen; DOC:可溶性有机碳 dissolved organic carbon; TOC:总有机碳 total organic carbon

排序图显示(图 5),CCA1 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC、TP 呈正相关,与 TN 呈负相关,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的解释率 (8.5%) 达到显著水平 ($P<0.05$),其余因子无显著性 ($P>0.05$),证明 CCA1 主要反映群落在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 梯度上的分布趋势;CCA2 与 WD、wpH、TOC 呈正相关,只有 WD 解释率 (12.5%) 达到显著水平 ($P<0.01$),证明 CCA2 主要反映群落在 WD 梯度上的分布趋势(表 2)。排序图中,群丛 I 主要分布于水深最低,水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高;群丛 IV 分布区水深高于群丛 III 但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 低于群丛 III,群丛 II 主要分布于水深最深,水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最低。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 WD 是影响群落分布的主要因子。

2.3.3 群落物种多样性指数与关键环境因子的 Pearson 分析

对 CCA 排序分析所得对植物群落影响最显著的环境因子(AK、WD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)与群落多样性指数做相关分析,结果如图 6,AK 与 Patrick 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数呈正相关,与 Simpson 多样性指数呈负相关; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 Patrick 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数呈负相关,与 Simpson 多样性指数呈正相关,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Pielou 均匀度指数呈显著负相关,相关系数为 -0.56 ($P<0.05$);WD 与 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数呈正相关,与 Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数呈负相关,其中 WD 与 Patrick 丰富度指数呈显著正相关,相关系数为 0.46 ($P<0.05$)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

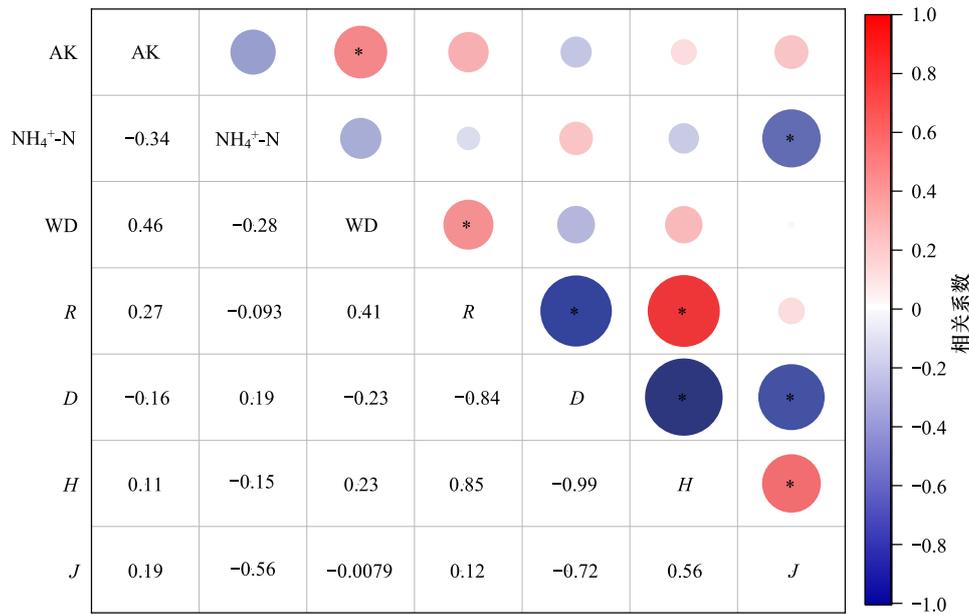
N 和 WD 与植物群落多样性指数之间存在显著关系 ($P < 0.05$), 表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 WD 是影响群落多样性指数的主要环境因子。

表 2 CCA 不同水环境因子的置换检验

Table 2 Displacement test for different water environment factors of CCA

水因子 Water Factor	解释度 Explains/%	伪 F 统计量 Pseudo f-statistics	显著性(P) Significance
水深 WD/(cm)	12.5	4.0	0.008 **
氨氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /(mg/L)	8.2	2.8	0.038 *
水 pH wpH	5.4	1.9	0.104
总磷 TP/(mg/L)	4.2	1.5	0.21
总氮 TN/(mg/L)	3.4	1.2	0.286
硝氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ /(mg/L)	3.1	1.1	0.302
可溶性有机碳 DOC/(mg/L)	1.8	0.7	0.6
总有机碳 TOC/(mg/L)	1.7	0.6	0.686

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; WD:水深 water depth; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:氨氮 ammonium nitrogen; wpH:水 pH; TP:总磷 total phosphorus; TN:总氮 total nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝氮 nitrate nitrogen; DOC:可溶性有机碳 dissolved organic carbon; TOC:总有机碳 total organic carbon



* $P \leq 0.05$

图 6 群落多样性指数与环境因子的 Pearson 分析

Fig.6 Pearson analysis of community diversity index and environmental factors

AK:速效钾 available potassium; WD:水深 water depth; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:氨氮 ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝氮 nitrate nitrogen; R 为 Patrick 丰富度指数 Patrick richness index; D 为 Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; H 为 Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon Wiener diversity index; J 为 Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index

3 讨论

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^[22]。本研究将调查的 30 个植物群落,采用层次聚类分析方法划分为,蕨状苔草+宽叶泽苔草群丛、雪白睡莲+菹菜群丛、水毛花+宽叶泽苔草群丛、菹菜+宽叶泽苔草群丛 4 个群丛类型。CCA 分析结果也揭

示湖畔湖湿地植群落在不同的环境梯度下呈现出一定的分布规律。

3.1 土壤因子对植物群落分布和多样性的影响

湖畔湖国家重要湿地植物群落与土壤因子的 CCA 分析结果表明, AK 是影响群落分布的主要因子。大量研究表明, AK 是影响植物空间格局分布的主要环境因素, 对物种丰富度和多样性有着显著影响^[23-24], 本研究的研究结果与其一致。AK 是植物能够直接从土壤中吸收用于生长的钾素, 主要来源于土壤有机质分解和土壤中微生物和植物代谢作用的转化, 而 TK 仅代表土壤中钾素的丰缺^[25-26]。张丽苗等^[27]研究指出土壤速效钾的含量主要受植物类型和干扰活动的影响。湖畔湖国家重要湿地地势低洼, 是周边地表径流汇集区, 地表径流携带大量植物凋落物及土壤淋溶物汇聚于湿地。群丛 III、IV 以挺水植物为主, 根系发达, 因此容易将降水后冲刷的大部分凋落物和土壤汇聚于其分布区域, 汇聚的脱落物以及群丛中植物自身凋落物在水充足条件下能够快速分解为植物用于生长的营养元素^[28-29], 其中钾元素具有“向下淋溶”效应, 在淹水条件下的土壤更有利于钾元素的富集^[30], 土壤中 AK 含量较高, 另外钾元素的“向下淋溶”效应会随着水深增加而增强, 所以群丛 III 土壤中 AK 低于群丛 IV。群丛 II 分布于深水域, 钾元素“向下淋溶”效应减弱, 不利于钾元素富集于土壤中, 土壤中 AK 含量较低。群丛 I 主要分布于无水区域, 凋落物汇集后受水因子的限制难以将其分解也不具备钾元素“向下淋溶”的条件, 导致土壤 AK 含量最低。可见, 土壤中 AK 含量的梯度变化是导致湖畔湖国家重要湿地植物群丛分布差异的关键因子。

3.2 水环境因子对植物群落分布和多样性的影响

群落与水质因子的 CCA 排序结果表明, WD、氨氮是影响植物群落分布的主要因子。李静等^[31]研究表明, 水深是影响群落分布的主要因素, 对植物群落的分布有着显著影响。本研究中, 群丛 I 主要分布于水深 0—5 cm, 群丛 III 主要分布于水深 20—40 cm, 群丛 IV 主要分布于水深 30—60 cm, 群丛 IV 主要分布于水深 80 cm 及以上, 群丛分布受水深限制明显, 分布格局随水深由浅到深表现为: 蕨状苔草+宽叶泽苔草群丛(I)-水毛花+宽叶泽苔草群丛(III)-菹菜+宽叶泽苔草群丛(IV)-雪白睡莲+菹菜群丛(II)。已有研究表明, 水位与群落多样性之间具有显著相关性^[32], 淹水导致群落物种多样性降低, 尤其是丰富度的降低^[33-34]。在本研究中 Pearson 相关性分析表明水深是影响群落物种多样性指数的主要环境因子, 与 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数呈正相关, 与 Simpson 多样性指数呈负相关, 其中水深与 Patrick 丰富度指数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与已有的研究结果相反, 这是由于湖畔湖国家重要湿地植物主要表现为湿生植物向水生植物的过渡, 且主要以水生植物为主, 随着水深的增加, 群落丰富度增加。水体铵氮含量也是制约群落分布的主要环境因子。张树彬等^[35]研究也表明, 水体氨氮是影响水生植物生长和群落分布的主要因子, 与本研究结果一致。水体铵氮和硝氮是水体无机氮的主要组成成分, 可以直接被植物吸收利用, 是水生植物的主要氮素来源, 也是制约水生植物的关键因素^[36-37], 但高浓度时会对植物产生毒害作用, 且水体富营养化也会抑制植物生长^[38]。本研究中, 群丛 I 以蕨状苔草为优势建群种, 生长发育的氨氮来源于土壤, 对水体氨氮吸收能力弱, 导致水体氨氮浓度较高。其余三个群丛的优势建群种以水生植物为主, 供植物吸收的氮素主要来源于水体, 因此水体中氨氮含量相对较低。群丛 II 优势建群种为浮叶植物(菹菜、雪白睡莲), 群丛 III 优势建群种为挺水植物(宽叶泽苔草、水毛花), 群丛 IV 优势建群种为浮叶植物(菹菜)、挺水植物(宽叶泽苔草), 浮叶植物对水体氨氮的吸收能力高于挺水植物^[39], 因此这三个群丛水体中氨氮含量表现为: 群丛 III > 群丛 IV > 群丛 II。此外 Pearson 相关性分析表明氨氮与 Pielou 均匀度指数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 原因是随着水体氨氮浓度增加, 耐氮物种减少, 群落构成的物种较少且单一, 导致群落 Pielou 均匀度指数降低。

4 结论

湖畔湖国家重要湿地植被分布格局随水深由浅到深分为: 蕨状苔草+宽叶泽苔草群丛—水毛花+宽叶泽苔草群丛—菹菜+宽叶泽苔草群丛—雪白睡莲+菹菜群丛。CCA 分析结果表明, 水深、土壤速效钾、水质氨氮是影响湖畔湖国家重要湿地植物群落分布的主要环境因子。Pearson 相关性分析表明氨氮和群落物种均匀度

指数呈显著负相关,水深与群落物种丰富度指数呈显著正相关。环境因子与群落多样性之间的关联性反映了植物通过构建差异化群落结构来适应环境变化的策略,同时也反映了湿地植物、土壤和水文长期相互作用对浪畔湖国家重要湿地生态系统的调控。目前研究尚不能全部解释浪畔湖国家重要湿地环境因子与群落多样性之间的关系,还需深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 陈宜瑜,吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学,2003,1(1):7-11.
- [2] 吴天或. 论湿地生态环境影响的评价. 化工管理,2019(2):181.
- [3] 田益理,郭东罡. 山西沁河上游植物种间关系及功能群划分. 山西农业科学,2018,46(6):986-991.
- [4] 单元琪,姚允龙,张欣欣,张强. 三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素. 生态学报,2020,40(5):1629-1636.
- [5] 王新源,马立鹏,程小云,张琴,兰芳芳,李源,唐霞,曲浩,连杰,李玉霖. 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响. 生态学报,2022,42(14):5869-5883.
- [6] 文丽,宋同清,杜虎,王克林,彭晚霞,曾馥平,曾昭霞,何铁光. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. 生态学报,2015,35(17):5822-5833.
- [7] 李群,赵辉,赵成章,马敏,唐玉瑞,赵婷婷. 洮河国家湿地公园主要植物群落多样性对土壤环境因子的响应. 生态学报,2022,42(7):2674-2684.
- [8] Zhang Q P, Wang J, Wang Q. Effects of abiotic factors on plant diversity and species distribution of alpine meadow plants. *Ecological Informatics*, 2021, 61: 101210.
- [9] 余轩,王兴,吴婷,王启学,马响,谢莉,宋乃平. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系. 生态学报,2021,41(21):8516-8524.
- [10] Ma T S, Deng X W, Chen L, Xiang W H. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification. *Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139667.
- [11] Crick J C, Grime J P. Morphological plasticity and mineral nutrient capture in two herbaceous species of contrasted ecology. *The New Phytologist*, 1987, 107(2): 403-414.
- [12] 徐治国,何岩,闫百兴,任慧敏. 营养物及水位变化对湿地植物的影响. 生态学杂志,2006,25(1):87-92.
- [13] LeBagousse-Pinguet Y, Liancourt P, Gross N, Straile D. Indirect facilitation promotes macrophyte survival and growth in freshwater ecosystems threatened by eutrophication. *Journal of Ecology*, 2012, 100(2): 530-538.
- [14] 许秀丽,李云良,谭志强,郭强. 鄱阳湖湿地典型中生植物水分利用来源的同位素示踪. 湖泊科学,2020,32(6):1749-1760.
- [15] 罗正明,刘晋仙,周妍英,杜京旗,吴强,柴宝峰. 亚高山草地土壤原生物群落结构和多样性海拔分布格局. 生态学报,2021,41(7):2783-2793.
- [16] 马维伟,王辉,李广,石万里,赵锦梅,罗永忠,聂志刚,薛景文. 甘南杂海湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态. 生态学报,2017,37(15):5091-5101.
- [17] 牟利,吴林,刘雪飞,李小玲,王涵,吴浩,余玉蓉,杜胜蓝. 鄂西南亚高山不同覆被类型泥炭藓沼泽湿地甲烷排放特征及其环境影响因子. 植物生态学报,2021,45(2):131-143.
- [18] 朱红莲,杜娟,刘正位,孙亚林,李明华,彭静,周凯,柯卫东. 我国野生蔬菜考察及遗传多样性研究. 植物遗传资源学报,2020,21(6):1586-1595.
- [19] 郑向炜,潘海韵,王玉国,陈家宽. 宽叶泽苔草藓类化学成分分析及其化学分类学意义. 植物分类学报,2007,45(4):570-575.
- [20] 王青锋,王玉国,潘明清. 湖南莽山自然保护区的水生维管束植物——多样性及其生境特征. 广西植物,2000,20(1):27-31.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 王国宏,方精云,郭柯,谢宗强,唐志尧,沈泽昊,王仁卿,王襄平,王德利,强胜,于丹,彭少麟,达良俊,刘庆,梁存柱. 《中国植被志》研编内容与规范. 植物生态学报,2020,44(2):128-178.
- [23] 达文彦,李石胜,古桑群宗,温晓迪,何柄枚,罗布央宗,陈菁菁,吴姣姣,拉多. 乃朗高寒沼泽湿地植物群落特征与环境因子的关系. 西藏科技,2020,(8):9-15.
- [24] 陈功,李晓玲,黄杰,向玲,孙雷,杨进,胥焘,黄应平. 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. 生态学报,2022,42(2):688-699.
- [25] 宋靛颖,冉敏,李呈吉,李文丹,董琴,李一丁,李启权. 成都平原农地利用方式转变下表层土壤速效钾变化特征. 农业资源与环境学报.

2023,40(6): 1435-1442.

- [26] 赵鹏姝,杨顺瑛,郝东利,苏彦华. 水稻钾素营养的基因型特征及分子机制初探. 土壤,2021,53(01):37-46.
- [27] 张丽苗,谭雪,董智,郑杰,袁中勋,李昌晓. 重庆主城河岸带植物群落功能性状与土壤理化性质的关系. 生态学报,2023,43(5): 1892-1901.
- [28] 阿旺,吕汪汪,周阳,孙建平,张苏人,夏露,李博文,刘培培,洪欢,王奇,张立荣,苏爱玲,姜丽丽,斯确多吉,张振华,罗彩云,汪诗平. 温度和湿度对高寒草甸凋落物分解的影响. 生态学报,2021,41(17):6846-6853.
- [29] 王玉红. 黄土高原主要植物叶凋落物分解过程中碳流通研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [30] 龚汉雨,柯金松,董琪琪,邓红平,冉露,周富忠,邓楚洪,余光辉. 水土农化因子与利川莼菜产量的相关关系研究. 安徽农业科学,2022,50(14):39-45.
- [31] 李静,王恒,胡杰,翟毕娇,任香凝,王春玲. 宁武老师傅海湿地植物物种多样性及其与环境因子的关系. 生态学杂志,2021,40(4): 950-958.
- [32] 徐娜,姚艳玲,王铭,王升忠,曹议文,徐志伟,李鸿凯,董彦民. 新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落空间分布与环境解释. 湖泊科学,2017,29(2):409-419.
- [33] Wantzen K M, Rothhaupt K O, Mörtl M, Cantonati M, G-Tóth L, Fischer P. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Hydrobiologia*, 2008, 613(1): 1-4.
- [34] 杨涛,宫辉力,胡金明,王丽. 长期水分胁迫对典型湿地植物群落多样性特征的影响. 草业学报,2010,19(6):9-17.
- [35] 张树彬,任启文,王鑫,李联地,张树梓. 白洋淀湿地水生植物群落物种多样性及对环境因子的响应. 山东林业科技,2023,53(1):35-40.
- [36] 刘佩佩,白军红,王婷婷,韩祯,赵庆庆,卢琼琼. 白洋淀优势植物群落生物量及其影响因子. 湿地科学,2013,11(4):482-487.
- [37] 黄燕. 广佛地区典型湿地植物群落与环境因子的响应[D]. 广州:华南农业大学,2020.
- [38] 时瑶,张雷,秦延文,马迎群,杨晨晨,刘志超,竹怀林. 四川邛海水体氮、磷浓度时空分布特征及其生态环境响应研究. 地学前缘,2023,30(2):495-505.
- [39] 张芳,易能,邸攀攀,王岩,张振华,唐婉莹,严少华,高岩. 不同水生植物的除氮效率及对生物脱氮过程的调节作用. 生态与农村环境学报,2017,33(2):174-180.