

甘曲湿地水生植物功能性状与环境因子相关性研究

何文佳,王壮壮

(西藏自治区农牧科学院水产科学研究所, 西藏 拉萨 850002)

摘要:湿地水生植物是湿地生态系统的重要组成部分,植物功能性状是响应环境变化最直接的表现形式。为探究西藏自治区甘曲湿地水生植物功能性状与环境之间的相关性,掌握对其功能性状产生影响的关键环境因子,于2024年10月选取甘曲湿地3种优势水生植物,对其株高、胸径、叶宽、叶长、叶面积等表型指标以及全氮、全磷含量进行测定,同时对湿地水体理化因子、不同深度(0~10 cm、10~20 cm)底泥相关理化指标进行测定。结果显示:甘曲湿地3种不同水生植物功能性状与湿地环境因子存在差异性。芦苇、杉叶藻和眼子菜全氮含量存在显著差异,由大到小依次为杉叶藻、眼子菜、芦苇,全磷含量差异不显著。水体电导率、溶解氧、总氮、总磷、氨氮和硝态氮与湿地水生植物表型性状有较强的相关性,不同深度底泥氮磷含量与水生植物表型性状也表现出较强的相关性。

关键词:高原湿地;水生植物;功能性状;环境因子

中图分类号:Q948.8

文献标识码:A

Study on the Correlation Between Functional Traits of Aquatic Plants and Environmental Factors in Ganqu Wetland

HE Wenjia, WANG Zhuangzhuang

(Institute of Fisheries Science, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa Xizang 850002, China)

Abstract: Aquatic plants are a vital component of wetland ecosystems, and plant functional traits are the most direct manifestation in response to environmental changes. To explore the correlation between functional traits of aquatic plants and environmental factors and identify the key environmental factors affecting functional traits in Ganqu Wetland, Xizang, three dominant aquatic plant species were selected in October 2024. Their phenotypic indicators (plant height, stem diameter, leaf width, leaf length, leaf area) and total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents were measured. Meanwhile, physicochemical properties of water body and sediment at different depths (0–10 cm, 10–20 cm) were determined. There were differences in functional traits among the three aquatic plant species under different environmental factors. Significant differences in TN content were found among *Phragmites communis*, *Hippuris vulgaris* and *Potamogeton distinctus*, showing an order of *Hippuris vulgaris* > *Potamogeton distinctus* > *Phragmites communis*, while no significant difference was observed in TP content. Water conductivity, dissolved oxygen, TN, TP, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen had strong correlations with phenotypic traits of aquatic plants. TN and TP contents in sediment at different depths also showed strong correlations with phenotypic traits of aquatic plants.

Key words: plateau wetland; aquatic plants; functional traits; environmental factors

湿地作为重要的生态系统,其在水源涵养、洪涝调蓄、水质净化、农产品和生产资源利用、气候调节及生物多样性保护与维持等方面具有重要作用^[1-2]。高原湿地作为我国生态安全战略格局的重要组成部分^[3],相较于一般湿地,具有更

为特殊的生态地位和价值。高原湿地海拔较高、温度较低、植被生长较为缓慢^[4]。特有物种多是高原湿地更为显著的特征^[5]。高原湿地特殊的地质构造及气候条件,使其更具脆弱性^[6],一旦遭到破坏,便难以在短时间内得到恢复。相关研

收稿日期:2025-12-22

基金项目:西藏自治区自然科学基金项目(XZ20231ZR0015G)。

作者简介:何文佳(1995—),女,硕士,助理研究员,主要从事高原生物多样性与资源利用工作, E-mail:2755179090@qq.com。

究表明在近35年内,青藏高原湿地总面积减少了4.34%,而沼泽等植被型湿地也呈现减少趋势^[7],因此,加强对高原湿地生态系统的相关研究显得极为重要。

甘曲湿地位于西藏自治区拉萨市林周县内,是拉萨河谷湿地生态系统的典型代表,同时也是国家I级保护动物黑颈鹤的越冬地^[8]。随着气候变化以及现代生产力与经济的快速发展,甘曲湿地面临着水质恶化、生物多样性减少、沙化等严峻挑战^[9],因此开展甘曲湿地的相关研究十分紧迫。

湿地水生植物是湿地生态系统物质循环和能量流动的首要生物因素,在维持湿地生态系统的稳定和物质循环中起着重要作用,是其结构和功能的核心^[10]。植物功能性状则是植物适应环境最直接的表现^[11]。本研究以甘曲湿地为研究对象,通过实地调查、采样分析等方法,测定湿地水生植物的功能性状和环境因子,多维度分析它们之间的相关性,旨在明确影响甘曲湿地水生植物功能性状的关键环境因子,为高原湿地生物多样性和湿地水生生态保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

于2024年10月在甘曲湿地共设置10个采样点,分别采集湿地优势水生植物样品(芦苇、杉叶藻和眼子菜)^[12]、水样和不同深度底泥样品。

用CX-401便携式多参数水质测定仪现场测

定水样的pH值、溶解氧。水样采集后测定水体氧化还原电位、总氮、总磷、氨氮、硝态氮。采用柱状采泥器(直径为38 mm)采集湿地底泥样品,每个采样点分别采集0~10 cm、10~20 cm深度的底泥样品各3份,并将其分别混合为一个样品,共20份底泥样品。底泥样品置于室内自然风干,研磨过筛(100目)后测定其全氮、全磷、氨氮和硝态氮含量。湿地水生植物样品每种植物随机选取10~30株,用卷尺和游标卡尺测量株高、胸径,选择长势均衡的20~30枚叶片,用叶面积测定仪(YMJ-A)测定叶长、叶宽、叶面积等指标。选取长势良好的植物,连根挖起整株,将根部的泥土洗净,带回实验室,放置阴凉处自然晾干后测定全株植物的全氮、全磷含量。

1.2 数据分析

采用Excel 2010对数据进行初步整理和分析,使用SPSS 21.0统计软件进行Pearson相关性分析(双侧检验),并使用Origin 2021和R Studio进行绘图。

2 结果与分析

2.1 甘曲湿地水体理化指标

由表1可知,湿地水体pH值为7.78~8.12,氧化还原电位为-61.13~-33.37 mV,溶解氧为6.59~7.58 mg/L,总氮为0.27~1.65 mg/L,总磷为0.03~0.19 mg/L,氨氮为0.05~0.67 mg/L,硝态氮为0.02~0.09 mg/L,水温为10.80~23.73 °C,电导率为231.83~439.77 S/m。

表1 甘曲湿地水环境因子理化指标

采样点	pH值	氧化还原电位/mV	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	硝态氮/(mg·L ⁻¹)	水温/°C	电导率/(S·m ⁻¹)
S1	8.00±0.01	-60.17±0.12	7.33±0.00	0.75±0.04	0.03±0.00	0.05±0.00	0.03±0.01	10.80±0.10	266.87±7.35
S2	7.78±0.01	-33.37±0.21	6.59±0.00	0.54±0.02	0.03±0.00	0.05±0.00	0.02±0.00	17.73±0.25	265.30±6.99
S3	7.88±0.01	-59.53±0.06	7.05±0.00	1.65±0.02	0.17±0.00	0.67±0.00	0.07±0.00	23.73±0.38	439.77±6.98
S4	7.91±0.01	-55.67±0.06	7.24±0.02	0.30±0.02	0.05±0.00	0.06±0.00	0.08±0.00	18.83±1.17	257.17±8.76
S5	7.99±0.01	-59.80±0.10	7.46±0.04	0.64±0.03	0.11±0.00	0.23±0.01	0.08±0.00	19.20±0.30	274.20±20.51
S6	8.06±0.01	-59.17±0.11	7.20±0.02	0.36±0.03	0.14±0.00	0.49±0.01	0.09±0.00	18.30±0.20	294.00±17.96
S7	8.11±0.00	-59.70±0.10	6.96±0.04	0.49±0.02	0.19±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	18.73±0.60	287.00±3.56
S8	7.84±0.01	-59.87±0.06	7.50±0.00	0.40±0.02	0.09±0.00	0.15±0.00	0.06±0.00	17.90±0.43	231.83±7.32
S9	7.97±0.01	-60.57±0.06	7.09±0.00	0.27±0.01	0.04±0.00	0.11±0.00	0.05±0.00	15.13±0.25	265.30±3.01
S10	8.12±0.01	-61.13±0.15	7.58±0.00	0.44±0.02	0.07±0.00	0.16±0.00	0.06±0.00	14.80±0.30	245.00±19.15

2.2 甘曲湿地不同深度底泥理化指标

由图1可知,湿地不同深度底泥氮磷含量存在差异。0~10 cm深度底泥总氮、总磷、氨氮、硝态氮含量分别为820.00~11 070.00 mg/kg、

270.00~570.00 mg/kg、5.17~24.22 mg/kg、0.04~8.49 mg/kg。10~20 cm深度底泥总氮、总磷、氨氮、硝态氮含量分别为1 370.00~7 030.00 mg/kg、320.00~860.00 mg/kg、5.68~69.87 mg/kg、

0.05~2.48 mg/kg。两深度底泥总氮含量无显著差异,湿地 0~10 cm 深度底泥总磷、氨氮含量显著低于 10~20 cm 深度底泥,湿地 0~10 cm

深度底泥硝态氮含量显著高于 10~20 cm 深度底泥。

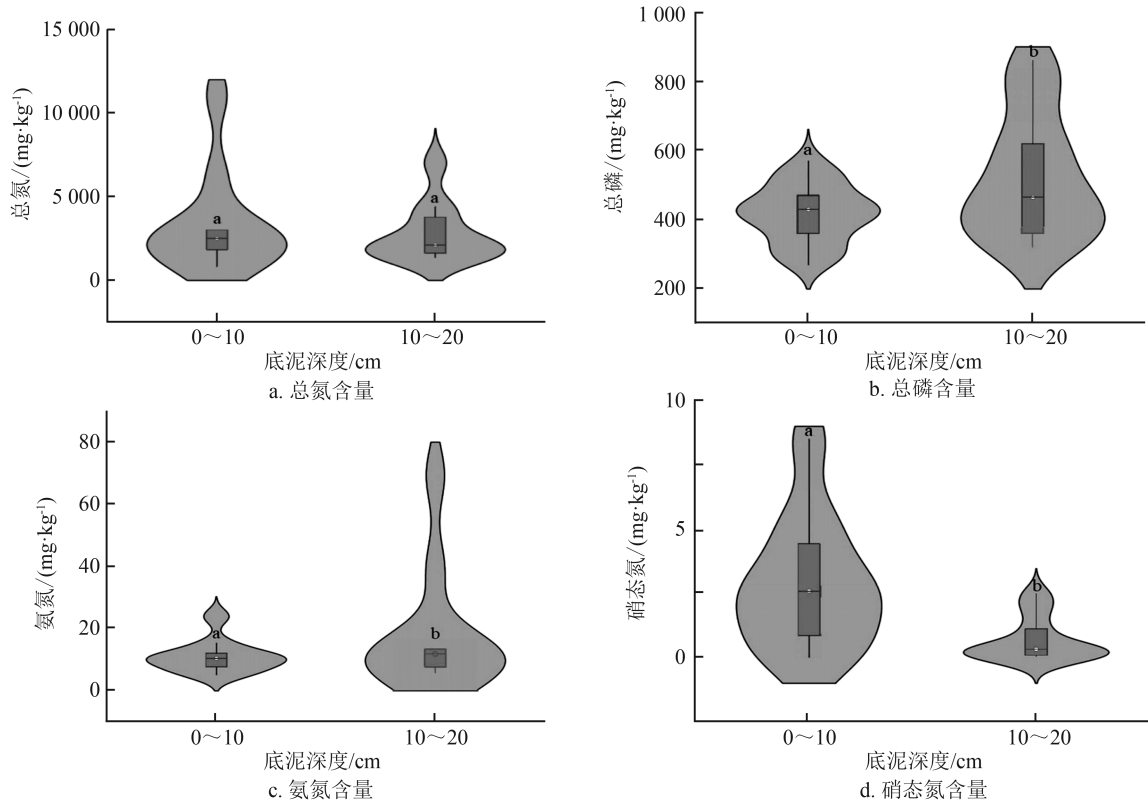


图1 甘曲湿地不同深度底泥氮磷含量

2.3 甘曲湿地水生植物理化指标

由表2可知,芦苇株高为 185.21±27.70 cm、胸径为 0.63±0.11 cm;杉叶藻株高为 67.40±11.33 cm、胸径为 0.70±0.11 cm;眼子菜叶长为

6.56±1.25 cm、叶宽为 2.48±0.57 cm。图2显示,芦苇、杉叶藻和眼子菜全氮含量存在显著差异,由大到小依次为杉叶藻、眼子菜、芦苇,而全磷含量差异不明显。

表2 水生植物表型数据

植物	株高/cm	胸径/cm	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm	叶长宽比
芦苇	185.21±27.70	0.63±0.11	26.08±3.41	2.13±0.71	43.08±11.57	14.03±6.31
杉叶藻	67.40±11.33	0.70±0.11	—	—	—	—
眼子菜	—	—	6.56±1.25	2.48±0.57	10.09±3.68	2.76±0.74

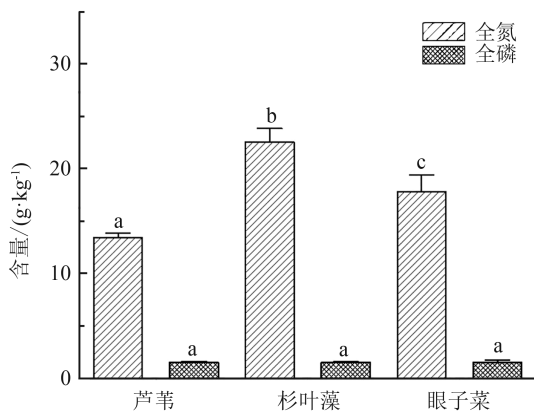


图2 水生植物全氮、全磷含量图

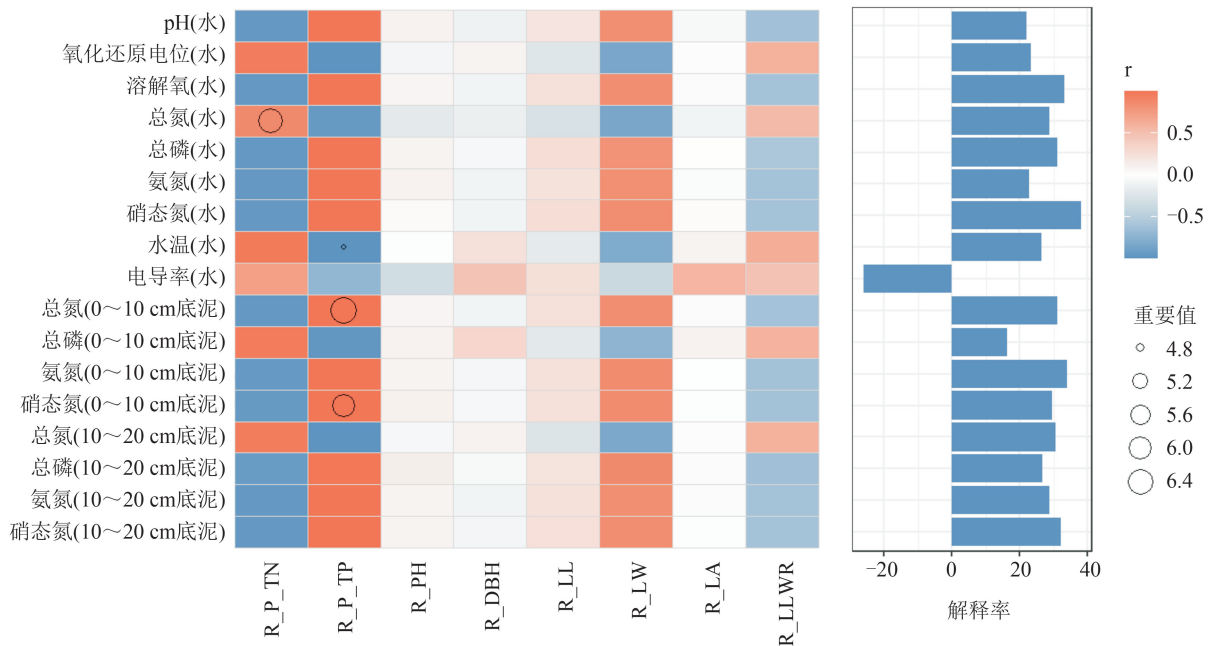
2.4 湿地水生植物—水环境—底泥相关性分析

湿地水生植物与水环境、底泥理化因子的相关性见图3—图5,结果显示,不同水生植物与环境因子之间的相关性存在差异。

芦苇表型性状、氮磷含量与水体理化指标及不同深度底泥氮磷含量相关性分析显示:芦苇全氮与水体氧化还原电位、总氮、水温、电导率、0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总氮呈正相关,而与水体 pH、溶解氧、总磷、氨氮、硝态氮,0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总磷、氨氮、硝态氮呈负相

关。芦苇全磷含量与水体 pH、溶解氧、总磷、氨氮、硝态氮,0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总磷、氨氮、硝态氮呈正相关,而与水体氧化还原电位、总氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总氮呈负相关。芦苇叶宽与水体 pH、溶解氧、总磷、氨氮、硝态氮,0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总磷、氨氮、硝

态氮呈正相关,而与水体氧化还原电、总氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总氮呈负相关。水体总氮是对芦苇全氮影响较高的理化因子,水温、0~10 cm 深度底泥总氮和硝态氮是对芦苇全磷影响较高的理化因子。水体硝态氮、溶解氧,0~10 cm 深度底泥氨氮、10~20 cm 深度底泥硝态氮对芦苇相关理化指标的解释力较高。

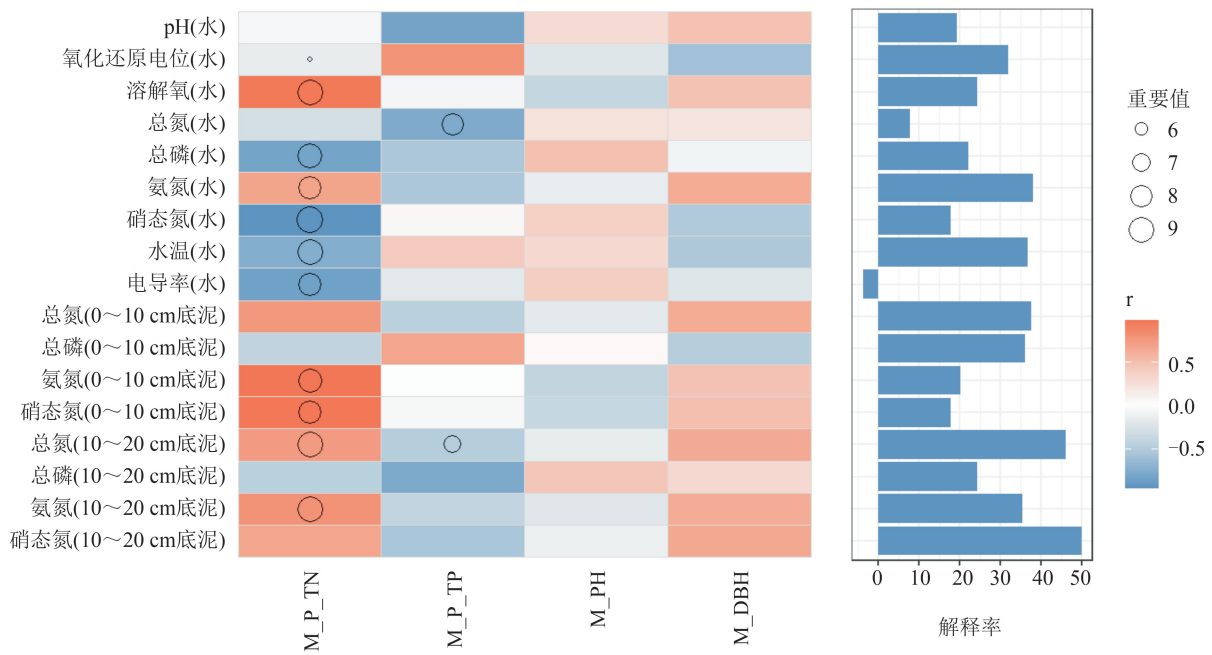


图中左侧为相关性热图,颜色深浅和正负表示相关性强弱和方向,圆圈大小代表变量的重要性;右侧的条形图阐述的是水体理化指标和不同深度底泥理化指标对水生植物表型指标和氮磷含量的总解释量,下同。图下 R_P_TN 为芦苇全氮含量;R_P_TP 为芦苇全磷含量;R_PH 为芦苇株高;R_DBH 为芦苇胸径;R_LL 为芦苇叶长;R_LW 为芦苇叶宽;R_LA 为芦苇叶面积;R_LLWR 为芦苇叶长宽比。

图3 芦苇表型性状和氮磷含量与水体及底泥理化指标相关性热图

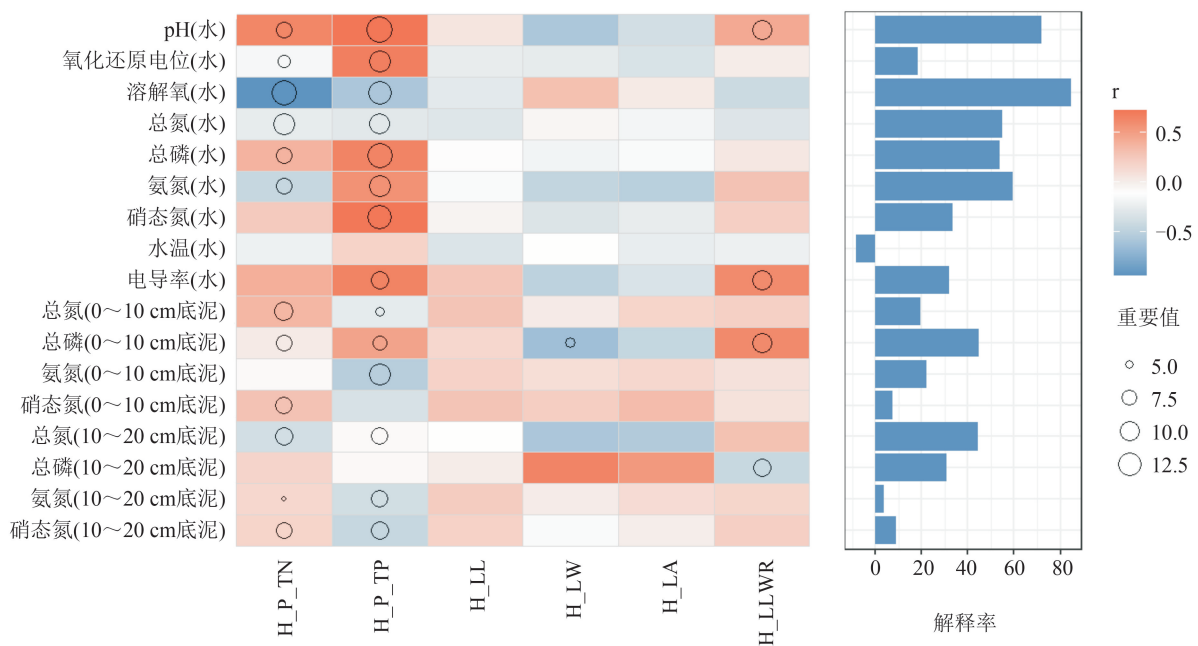
杉叶藻表型性状、氮磷含量与水体理化指标及不同深度底泥氮磷含量相关性分析显示:杉叶藻全氮与水体溶解氧、氨氮,0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮呈正相关;而与水体氧化还原电位、总氮、总磷、硝态氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总磷呈负相关。杉叶藻全磷与水体氧化还原电位、水温,0~10 cm 深度底泥总磷呈正相关;与水体 pH、总氮、总磷、氨氮,0~10 cm 深度底泥总氮,10~20 cm 深度底泥总氮、总磷、氨氮、硝态氮呈负相关。杉叶藻胸径与水体 pH、溶解氧、总氮、氨氮,

0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总氮、总磷、氨氮、硝态氮呈正相关;而与水体氧化还原电位、硝态氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷呈负相关。水体氧化还原电位、溶解氧、总磷、氨氮、硝态氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总氮、氨氮是对杉叶藻全氮影响较高的理化因子,水体总氮、10~20 cm 深度底泥总氮是对丰水期杉叶藻全磷影响较高的理化因子。水体氨氮、10~20 cm 深度底泥总氮和硝态氮对杉叶藻理化指标的解释力较高。



M_P_TN 为杉叶藻全氮含量;M_P_TP 为杉叶藻全磷含量;M_PH 为杉叶藻株高;M_DBH 为杉叶藻胸径。

图4 杉叶藻表型性状和氮磷含量与水体及底泥理化指标相关性热图



H_P_TN 为眼子菜全氮含量;H_P_TP 为眼子菜全磷含量;H_LL 为眼子菜叶长;

H_LW 为眼子菜叶宽;H_LA 为眼子菜叶面积;H_LLWR 为眼子菜叶长宽比。

图5 眼子菜表型性状和氮磷含量与水体及底泥理化指标相关性热图

眼子菜表型性状、氮磷含量与水体理化指标及不同深度底泥氮磷含量相关性分析显示:眼子菜全氮与水体 pH、总磷、硝态氮、电导率,0~10 cm深度底泥总氮、总磷、硝态氮,10~20 cm深度底泥总磷、氨氮、硝态氮呈正相关;而与水

体氧化还原电位、溶解氧、总氮、氨氮、水温、10~20 cm深度底泥总氮呈负相关。眼子菜全磷与水体 pH、氧化还原电位、总磷、氨氮、硝态氮、水温、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷呈正相关;与水体溶解氧,0~10 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥氨氮、硝态氮呈负相关。眼子菜叶宽与水体溶解氧,0~10 cm 深度底泥

总氮、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总磷、氨氮呈正相关;而与水体 pH、氧化还原电位、氨氮、硝态氮、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总氮呈负相关。眼子菜叶长宽比与水体 pH、氧化还原电位、总磷、氨氮、硝态氮、电导率,0~10 cm 深度底泥总氮、总磷、氨氮、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮呈正相关;而与水体溶解氧、总氮、水温,10~20 cm 深度底泥总磷呈负相关。水体 pH、氧化还原电位、溶解氧、总氮、总磷、氨氮,0~10 cm 深度底泥总氮、总磷、硝态氮,10~20 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮是对眼子菜全氮含量影响较高的理化因子。水体 pH、氧化还原电位、溶解氧、总氮、总磷、氨氮、硝态氮、电导率,0~10 cm 深度底泥总氮、总磷、氨氮,10~20 cm 深度底泥总氮、氨氮、硝态氮是对眼子菜全磷含量影响较高的理化因子。水体 pH、电导率,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总磷是对丰水期眼子菜叶长宽比影响较高的理化因子。水体溶解氧、pH、氨氮,0~10 cm 深度底泥总磷、10~20 cm 深度底泥总氮对丰水期眼子菜的相关理化指标解释力较大。

3 讨论与结论

3.1 湿地不同深度底泥氮磷含量差异

底泥是水体营养物质的主要蓄积库,其中氮磷等营养物质能通过颗粒物吸附、沉淀等方式蓄存在底泥中,在不同条件下转换,为水生生物的生长提供必要的营养元素^[13]。本研究选择 0~20 cm 深度作为底泥的采样深度,主要基于水体、底泥、水生植物构成的水生态系统,研究内源营养物质释放与水环境和水生植物的相互影响。万晶^[14]指出,底泥营养物质与水环境之间主要以无机态为主,且水环境主要受 10 cm 内的底泥营养物质释放的影响。秦伯强等^[15]根据野外分析调查和波浪水槽室内实验结果表明,太湖水底泥界面物质交换主要发生在底泥表层 5~10 cm 范围内。本研究选取湿地 0~20 cm 深度的底泥进行氮磷等营养物质的垂向分布特征分析。尹德超等^[16]研究表明白洋淀湿地底泥总氮、总磷随深度增加而呈现减小的趋势,且总磷含量随底泥深度变化规律更复杂。刘峰^[17]研究表明养殖

池塘沉积物总氮含量随底泥深度增加呈现减小的趋势,沉积物总磷含量随底泥深度增加呈现增长的趋势。本研究表明甘曲湿地底泥在 0~20 cm 随深度的增加其总磷、氨氮含量呈现增加趋势,而硝态氮含量呈现下降趋势。甘曲湿地 10~20 cm 深度底泥总磷含量高于 0~10 cm,这与刘峰^[17]总磷含量随深度增加呈递增的规律一致,反应了磷的沉积特性。磷在湿地中多以颗粒态的形式沉积于底泥中,表层底泥中总磷含量较深层底泥总磷含量低,反映了表层磷的活化和释放过程较深层底泥活跃^[18]。深层底泥因扰动少、活化释放弱,逐渐积累;而表层底泥更易受植物根系吸收及微生物转化等影响,磷的“源—汇”转换更活跃,导致含量较深层底泥低^[14]。甘曲湿地 0~20 cm 底泥随着深度增加硝态氮含量降低,这可能与湿地水体水动力环境、生物化学条件等的不同其底泥氮含量在垂直分布变化上产生了波动,表层底泥受水生植物残体分解补充了硝态氮,且高原低温环境减缓了硝态氮的反硝化流失,反映出不同水域环境的差异^[17]。

3.2 湿地水生植物—水环境—底泥相关性

植物的性状与可塑性都是植物与其生存环境相互作用的结果^[19],植物功能性状存在种内及种间差异,同一物种的相同性状在不同生长环境中均存在差异^[20],植物功能性状的特异性是应对环境变化最直接的表现形式^[11]。氮磷是植物生长必不可少的营养元素,同时也是研究湿地生态的重要组成部分^[21]。本研究选取了湿地 3 种优势水生植物,探究了湿地水生植物氮磷含量以及表型指标与湿地底泥、湿地水环境之间的相关性。结果表明:3 种湿地水生植物其全氮含量存在差异性,具体表现为杉叶藻全氮含量最高,眼子菜次之,芦苇全氮含量最低。水体电导率、溶解氧、总氮、总磷、氨氮和硝态氮与湿地水生植物表型性状相关性较强,不同深度底泥氮磷含量与水生植物表型性状也表现出较强的相关性。对比 3 种水生植物表型性状与环境因子之间的相关性,可知眼子菜表型性状与环境因子之间的相关性较杉叶藻和芦苇的相关性更复杂。这可能与眼子菜为沉水植物,其叶片漂浮于水面,更易响应水环境因子的变化有关。

参考文献:

- [1] 刘志伟,李胜男,韦玮,等.近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J].生态学杂志,2019,38(3):856-862.
- [2] YANG L,ZHAO H C,ZUO Z J,et al.Generalitv and shifts in leaf trait relationships between alpine aquatic and terrestrial herbaceous plants on the Xizangan plateau[J].Frontiers in Ecology and Evolution,2021(9):706237.
- [3] 白军红,欧阳华,徐惠风,等.青藏高原湿地研究进展[J].地理科学进展,2004,23(4):1-9.
- [4] 赵志刚,史小明.青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护[J].科技导报,2020,38(17):33-41.
- [5] 白军红,欧阳华,杨志锋,等.湿地景观格局变化研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):36-45.
- [6] 赵志龙,张懿锂,刘林山,等.青藏高原湿地研究进展[J].地理科学进展,2014,33(9):1218-1230.
- [7] ZHANG B,LI Q Y,JING Y H,et al.Alpine wetland distribution patterns and decreasing trends in the Qinghai-Xizangan plateau[J].Science Bulletin,2025,70(21):3509-3511.
- [8] 王磊,马立荣,徐志高,等.林周县甘曲湿地保护与恢复研究[J].绿色科技,2021,23(16):162-165.
- [9] 德吉,李媛,强久巴姆,等.拉萨市林周县甘曲湿地夏、秋季土壤细菌的分离及鉴定[J].西藏大学学报(社会科学版),2016,31(5):10-17.
- [10] 刘国栋.气候变化对高原湿地优势植物生理生态学特性的影响研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [11] 牛孟莹,郭辉军,孙梅,等.滇西北挺水植物黑三棱叶形态性状对环境因子的响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2022,42(4):84-95.
- [12] 普布,陈亚文,张二豪,等.林周县甘曲湿地夏秋季节昆虫群落特征初探[J].西藏科技,2013,35(4):68-71.
- [13] 邢涛,雍毅,张韵洁,等.底泥与衰亡植物营养释放及细菌群落演替差异的比较分析[J].环境科学学报,2022,42(2):409-421.
- [14] 万晶.水-底泥-植物耦合作用对水质影响机理研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [15] 秦伯强,胡维平,高光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J].科学通报,2003,48(17):1822-1831.
- [16] 尹德超,王雨山,祁晓凡,等.白洋淀表层沉积物氮磷分布、储量及污染评价[J].地质通报,2023,42(11):1983-1992.
- [17] 刘峰.仿刺参(*Apostichopus japonicus*)池塘氮磷收支和沉积物特征性氮磷垂直分布的实验研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- [18] 李成瑶,程立,王同飞,等.白洋淀典型区域清淤前后沉积物的氮磷扩散通量研究[J].环境科学学报,2021,41(4):1401-1409.
- [19] 许佳宁.湿地植物多样性及功能性状对土壤水分变化的响应[D].北京:北京林业大学,2016.
- [20] 孙梅,田昆,张贇,等.植物叶片功能性状及其环境适应研究[J].植物科学学报,2017,35(6):940-949.
- [21] 张森.滨海湿地植物功能性状及环境适应策略研究[D].天津:天津理工大学,2016.