*J. Lake Sci.*(湖泊科学),2025,**37**(6):2173-2188
DOI 10.18307/2025.0632


# 基于浮游植物生物完整性指数的高寒城市湿地生态系统健康评价:以拉萨拉鲁湿地为例*

刘 傲[1,2,3],王 陈[1,2,3],韩梦姣[1,2,3],棚 琼[1,2,3],卫佩佩[1,2,3],安瑞志[1,2,3],巴 桑[1,2,3**],刘 洋[1,2,3**]

(1:西藏大学生态环境学院,青藏高原湿地与流域生态系统实验室,拉萨 850000)
(2:西藏大学生态环境学院,那曲麦地卡高寒湿地生态系统自治区野外科学观测研究站,拉萨 850000)
(3:西藏大学生态环境学院,青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室,拉萨 850000)

**摘 要**:城市湿地发挥着越来越重要的作用,对其生态系统健康进行评价有助于了解湿地的当前状况并采取相应的保护措施。为探究西藏拉萨拉鲁湿地生态系统健康状态及其与水环境因子的关系,于2021年7月(夏季)、10月(秋季)和2022年5月(春季)在拉鲁湿地主要水系采集浮游植物样品并测定水环境因子,鉴定浮游植物物种并计算其细胞丰度和生物量,利用浮游植物形态功能群(MBFG)、水质指数(WQI)和浮游植物生物完整性指数(P-IBI)评价该湿地生态系统健康状态,分析水质及形态功能群的时空分布特征,并探讨了P-IBI值与水环境因子的相关关系。结果表明:(1)基于WQI值评价,拉鲁湿地水质总体为"良好"~"中等",水质存在时空差异,春季最好、秋季次之、夏季最差,东部优于西部。(2)基于P-IBI值评价,拉鲁湿地3个季节整体的水生态健康状态为"健康~亚健康",春季水生态健康状态优于秋季和夏季,中东部样点普遍优于西南部和东北部。(3)P-IBI值与WQI值呈现显著的正相关关系,基于P-IBI评价拉鲁湿地水生态健康状态与WQI评价结果基本一致。溶解氧是影响拉鲁湿地水生态健康状态的主要水环境因子,气温、水量、人类活动和土地利用类型是影响拉鲁湿地水质和水生态健康状态的重要影响因素。(4)春季浮游植物Ⅰ和Ⅲ类功能群丰度随拉鲁湿地水生态健康状况的下降而上升,夏季水体生态健康状况与功能群丰度变化关系不大,秋季Ⅲ和Ⅶ类功能群丰度的增加与水体生态健康状况的下降有显著关联。

**关键词**:拉鲁湿地;浮游植物生物完整性指数;形态功能群;水质指数;生态健康评价

# Health evaluation of alpine urban wetland ecosystems based on phytoplankton biointegrity index: A case study of Lhalu Wetland in Lhasa*

Liu Ao[1,2,3], Wang Chen[1,2,3], Han Mengjiao[1,2,3], Peng Qiong[1,2,3], Wei Peipei[1,2,3], An Ruizhi[1,2,3], Ba Sang[1,2,3**] & Liu Yang[1,2,3**]

(1: *Laboratory of Wetland and Catchment Ecosystem in Tibetan Plateau, School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa* 850000, *P. R. China*)
(2: *Nagqu Mitika Alpine Wetland Ecosystem Field Scientific Observation and Research Station in Tibet Autonomous Region, School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa* 850000, *P. R. China*)
(3: *Key Laboratory of Biodiversity and Environment on the Qinghai-Tibet Plateau, Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa* 850000, *P. R. China*)

**Abstract**: Urban wetlands play an increasingly crucial role, and the health assessment of their ecosystems is an important process

* 2024-09-04 收稿;2025-02-22 收修改稿。
西藏自治区自然科学基金重点项目(XZ202301ZR0055G,XZ202201ZR0046G)、国家自然科学基金项目(32070418,32270473)、青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室开放课题(KLBE2024010)、西藏大学研究生高水平人才培养计划项目(2025-GSP-S104)和2022年中央财政支持地方高校改革发展专项资金(藏财预指[2022]1号)联合资助。
** 通信作者;E-mail: basang2003@utibet.edu.cn, ly@utibet.edu.cn。

that helps us understand the current condition of wetlands and take appropriate protective measures. To explore the ecological health status ofthe Lhalu Wetland and its relationship with water environmental factors, phytoplankton samples were collected and water environmental factors were measured in the main water systems of Lhalu Wetland in July (summer), October (autumn) 2021, and May (spring) 2022. Phytoplankton species were identified, and their cell abundance and biomass were calculated. The ecological health status of the wetland was evaluated using the morphologically-based functional group (MBFG), water quality index (WQI), and phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI). The spatiotemporal distribution characteristics of water quality and morphologically-based functional group, and the correlation between P-IBI values and water environmental factors were analyzed. The research results showed: (1) Based on the WQI values, the overall water quality of Lhalu Wetland was evaluated as "good" to "moderate" with spatial and temporal variations in water quality: it was best in spring, followed by autumn, and worst in summer, and the eastern part was better than the western part. (2) Based on the P-IBI values, the overall water ecological health status of Lhalu Wetland across three seasons was evaluated as "health" to "sub-health", with the spring water ecological health status being superior to autumn, which was superior to summer, and the central-eastern sampling points were generally superior to the south-western and north-eastern parts. (3) The P-IBI values showed a significant positive correlation with the WQI values, and the evaluation of the water ecological health status of Lhalu Wetland based on P-IBI was closely consistent with the results of WQI evaluation. Dissolved oxygen was the main water environmental factor affecting the water ecological health status of Lhalu Wetland, and temperature, water volume, human activities, and land use types were important factors affecting the water quality and water ecological health status of Lhalu Wetland. (4) In spring, the abundance of functional groups Ⅰ and Ⅲ increased as the water ecological health status of Lhalu Wetland declined. In summer, the ecological health status of the water body had little relationship with the changes in the abundance of functional groups. In autumn, the increase in the abundance of functional groups Ⅲ and Ⅶ was significantly associated with the decline in the ecological health status of the water body.

Keywords: Lhalu Wetland; phytoplankton index of biotic integrity; morphologically-based functional group; water quality index; ecological health assessment

城市湿地是指城市区域内的海岸与河口、河岸、浅水湖沼、水源保护区、自然和人工池塘以及污水处理厂等具有水陆过渡性质的生态系统[1]。城市湿地作为城市生态系统的重要组成部分,具有其他城市自然生态系统不可替代的多种生态系统服务功能,能够调节区域气候,过滤及降解空气和水体中的污染物,从而提高城市空气和水环境质量,有效地改善城市生态环境[2-4]。然而,随着城市发展和人口增加,城市湿地生态系统趋于不稳定,逐渐出现面积缩小、斑块破碎化、生物多样性降低和湿地水环境恶化等问题[5-8]。因此,评价城市湿地生态系统健康,分析其主要环境因子,加强城市湿地生态保护和生态恢复迫在眉睫。Karr[9]在1981年最先以鱼类为对象建立了生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)评价河流健康的方法;De Keyser等[10]在2003年将所选生物指标不断扩展并应用到湿地生态健康评价中,逐渐应用于底栖动物[11]、浮游生物[12]和着生藻类[13]等水生生物。

浮游植物作为湿地生态系统中重要的初级生产者,对维持湿地生态系统平衡、物质循环和能量流动具有重要作用,其群落的动态变化可以直接反映湿地水生态环境质量的优劣、水体营养状态[14-17]。近年来,应用浮游植物生物完整性指数(phytoplankton index of biotic integrity,P-IBI)评价水生态健康状况的研究已有诸多报道[18-20],其在不同水体健康评价中的应用效果也得到越来越多的认可。Kruk等[21]首次提出了浮游植物形态功能群(morphologically-based functional group, MBFG)的概念,根据浮游植物的形态特征,将形态相似的藻种划分到同一组,共划分7个功能群,通过形态与功能性特征之间的联系,解释其对生境变化的响应[22]。当水质发生变化时,浮游植物功能群随之改变,因此通过功能群变化可以推断水质的变化[23]。此外,水质指数法(water quality index, WQI)是一种综合多种水质参数的检验结果,用来反映水质状况的无量纲数值,现已被广泛应用于评估地表水及地下水水质,其结果可以解析水体中的主要污染因子,定量评价水体污染程度[24-25]。

西藏拉鲁湿地国家级自然保护区是世界上海拔最高、面积最大的城市天然湿地之一,在控制污染、维持生态平衡、改善城市气候和净化水环境等方面都起着重要作用[24]。至今,有关拉鲁湿地生态健康评价的研究,多集中在基于水环境理化因子[26-27]和浮游植物污染指示种[28]的水质评价,以及基于压力—状态—响应(pressure-state-response, PSR)模型的生态系统健康评价[29],而关于浮游植物生物完整性指数及形态功能群

方面的研究鲜有报道。此外,拉鲁湿地作为高寒城市湿地的代表,具有独特的区域特征和生态特征,如高海拔、低氧环境、极端温度变化、强烈的紫外线辐射以及位于城市内部等[30],这些特征对于探讨 P-IBI 在该类湿地的适用性至关重要。因此,本研究在确立西藏拉鲁湿地浮游植物群落结构现状的基础上,利用浮游植物形态功能群、WQI 和 P-IBI 对其进行生态健康状况评估,以期为相关天然城市湿地的 P-IBI 构建以及生态保护与修复等提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样点设置

西藏拉鲁湿地国家级自然保护区(29°39′46″~29°41′06″N, 91°03′49″~91°06′51″E)位于拉萨市城区的西北方向,东西长、南北短,平均海拔达 3645 m,总面积为 1220 $hm^2$[31]。该研究区域属于高原温带半干旱季风气候,阳光充足,日照时间长,空气干燥且蒸发量大,全年降水主要集中在 6—9 月,年均温度为 7.5 ℃,年均湿度为 45%。地形整体上呈现北高南低、东高西低,从东至西地面坡度约为 3‰~5‰,从而使水从东部流入西部[27]。拉鲁湿地东面与拉萨市城关区拉鲁乡居民区接壤,北面为高山,西面以当热路和与北面高山的交界处为终点,南面紧邻拉萨市城区,来自夺底、娘热两大沟的水系(泥沙河)、天然降水以及纳金电站的尾水为湿地补给水源。

根据拉鲁湿地地理特征、生境差异和水流状况,共设置 42 个具有代表性的样点(图 1),各样点的基本信息在文献[31]中已进行详细的描述,分别于 2021 年 7 月(夏季)、2021 年 10 月(秋季)和 2022 年 5 月(春季)进行浮游植物样品的采集和水环境因子的测定。

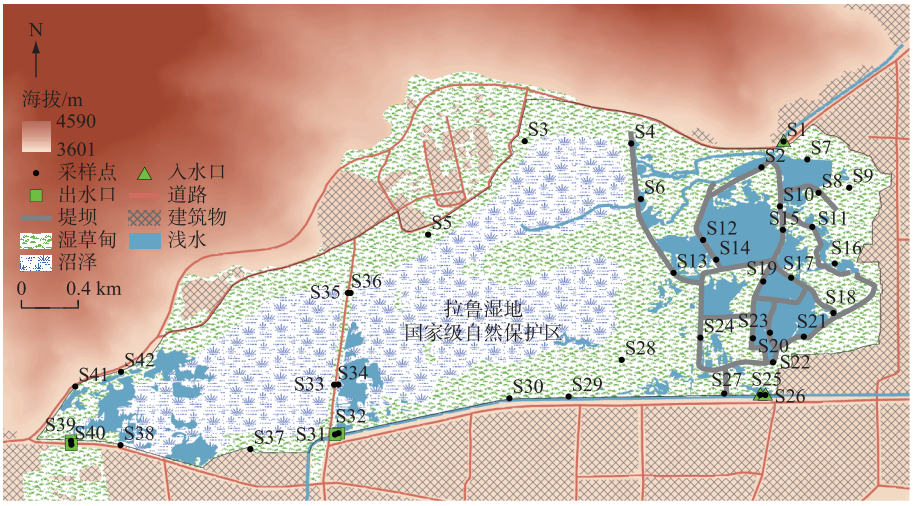


图 1 拉鲁湿地采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lhalu Wetland

### 1.2 样品采集与处理

1.2.1 浮游植物样品的采集、鉴定和计数　浮游植物样品的采集、鉴定和计数方法参照相关文献[31-35]。定性样品现场使用孔径 64 μm 的 25#浮游生物网在水面下 0.5 m 处作“∞”型捞取 8~10 min,过滤浓缩至 50 mL 装入样本瓶,并立即用 4% 的甲醛溶液固定保存;定量样品在水面下 0.5 m 处采集 1 L 混合水样,现场立即用 15 mL 鲁哥氏剂固定,带回实验室沉淀 48 h 后浓缩至 30 mL。计数时,移取 0.1 mL 浓缩匀液至 0.1 mL 计数框,在 OLYMPUS CX23 显微镜下进行物种鉴定,每个样品计数 2~3 次。浮游植物生物量利用每种浮游植物合适的体积公式将浮游植物丰度转化为生物量(鲜重),并假设其比重为 1.0,即生物量为浮游植物丰度乘以各自体积的平均湿重[36-37]。形态功能类群的分类参考 Kruk 等[21],将浮游植物种类划分为 7 个类群(Ⅰ~Ⅶ)。

1.2.2 水体理化因子的测定 现场使用 HI98195 高精度便携式多参数综合水质测试仪(HANNA,意大利)测定水体酸碱度(pH)、电导率(EC)、总溶解盐(TDS)、盐度(Salt)及水温(WT);使用 HI98193 微电脑溶解氧测定仪(HANNA,意大利)测定溶解氧(DO);使用 HI98703 微电脑多量程浊度测定仪(HANNA,意大利)测定浊度(TUR);使用 HI83399 水质检测仪(HANNA,意大利)测定氨氮($NH_3$-N)浓度;并分别进行 3 个平行检测。

### 1.3 WQI 分析方法

水质指数(WQI)的计算公式[38]为:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \tag{1}$$

式中,$n$ 为评价的水质参数总项数,$C_i$ 为归一化后分配给参数 $i$ 的值,$P_i$ 为分配给各参数的相对权重(表 1),WQI 值的分布范围在 0~100 之间,将水质评价等级划分为 5 个级别[39-40]:优秀[90, 100)、良好[70, 90)、中等[50, 70)、差[25, 50)、非常差[0, 25)。

表 1 参数的相对权重($P_i$)和归一化因子($C_i$)

Tab. 1 The relative weights ($P_i$) and the normalization factors ($C_i$) of parameters

| 变量 | 相对权重($P_i$) | 归一化因子($C_i$) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| pH | 1 | 7 | 7~8 | 7~8.5 | 7~9 | 6.5~7 | 6~9.5 | 5~10 | 4~11 | 3~12 | 2~13 | 1~14 |
| EC/(μS/cm) | 1 | <750 | <1000 | <1250 | <1500 | <2000 | <2500 | <3000 | <5000 | <8000 | ≤12000 | >12000 |
| DO/(mg/L) | 4 | ≥7.5 | >7 | >6.5 | >6 | >5 | >4 | >3.5 | >3 | >2 | ≤1 | <1 |
| TUR/NTU | 2 | <5 | <10 | <15 | <20 | <25 | <30 | <40 | <60 | <80 | ≤100 | >100 |
| TDS/(mg/L) | 2 | <100 | <500 | <750 | <1000 | <1500 | <2000 | <3000 | <5000 | <10000 | ≤20000 | >20000 |
| $NH_3$-N/(mg/L) | 3 | <0.01 | <0.05 | <0.1 | <0.2 | <0.3 | <0.4 | <0.5 | <0.75 | <1 | ≤1.25 | >1.25 |

### 1.4 P-IBI 评价体系的构建

基于 P-IBI 构建主要包括参照点与受损点的确定、候选指标的筛选、P-IBI 指数的计算和体系构建。

1.4.1 参考点的选取 综合参考程帅等[41-42]的划分方法,经过对研究区域内各样点的实地考察和分析,选择受人类活动干扰程度较小,并且 WQI 大于 80 的点位作为参照点,其余点位作为受损点。

1.4.2 候选指标的筛选 在参照 P-IBI 相关研究的基础上[19-20],结合本研究中拉鲁湿地的浮游植物群落特征,尽可能全面地选取对水生态环境变化较为敏感的 28 个藻类生物参数作为 P-IBI 的候选指标(表 2)。首先进行候选指标分布范围分析,统计候选指标参数值的分布范围,超过 95% 点位为 0 的参数、分布范围过小以及波动过大的指标,进行剔除。然后进行判别能力分析,对剩余指标在参考点和受损点的分布做箱体图,比较各参数在参考点和受损点的 25%~75% 分位数范围。箱体无重叠,四分位重叠指数 IQ= 3;箱体有重叠,但中位线不在对方箱体内,IQ=2,仅一个中位线在对方箱体范围之内,IQ=1,若各自中位线都在对方箱体范围之内,IQ=0。对 IQ ≥ 2 的候选参数进行 Pearson 相关性分析,若任意两个参数之间的相关系数 $|r|>0.75$,则认为该对参数存在显著相关性,应删去其中信息量较少的一个参数[43-44]。经过相关性分析后的剩余候选参数即作为构建 P-IBI 评价体系的核心指标。

1.4.3 P-IBI 指数的计算和体系构建 P-IBI 各核心指标的分值计算采用比值法[45],对于干扰越强、数值越小的参数,该指数的分值等于实际参数值除以所有点该参数值的 95% 分位数;对于干扰越强、数值越大的参数,以所有点该参数值的 5% 分位数作为最佳期望值进行计算,该指数的分值=(最大值-本点参数实际值)/(最大值-最佳期望值)。各点的 P-IBI 指数值等于该点各指数分值之和,按照上述方法进行参数分值的计算,分值分布在 0~1 之间,如果分值大于 1 则记为 1[46]。最后以参照点 P-IBI 数值分布的 25% 分位数作为健康评价标准,对于小于健康标准值的分布范围进行四等分,分别代表“亚健康”、“一般”、“较差”和“极差”4 个等级。

表 2 拉鲁湿地 P-IBI 候选指标及对干扰的预期响应方向

Tab. 2 P-IBI candidate metrics and their expected directions of response to disturbance in Lhalu Wetland

| 序号 | 指标 | 单位 | 描述 | 对干扰的响应 |
|---|---|---|---|---|
| M1 | 浮游植物分类单元数 | 个 | 浮游植物门类数目 | 增大 |
| M2 | 浮游植物总物种数 | 种 | 种水平上的物种数量 | 减小 |
| M3 | 硅藻门物种数 | 种 | 硅藻门下物种的数量 | 减小 |
| M4 | 蓝藻门物种数 | 种 | 蓝藻门下物种的数量 | 减小 |
| M5 | 绿藻门物种数 | 种 | 绿藻门下物种的数量 | 减小 |
| M6 | 硅藻门物种数占比 | % | 硅藻门物种数/藻类总物种数×100% | 减小 |
| M7 | 蓝藻门物种数占比 | % | 蓝藻门物种数/藻类总物种数×100% | 减小 |
| M8 | 绿藻门物种数占比 | % | 绿藻门物种数/藻类总物种数×100% | 减小 |
| M9 | 非硅藻门物种数 | 种 | 非硅藻门下物种的数量 | 增大 |
| M10 | Shannon-Wiener 多样性指数 | | $H'=-\sum P_i\times \ln P_i$ | 减小 |
| M11 | Margalef 丰富度指数 | | $D=(Ns-1)/\ln N$ | 减小 |
| M12 | Pielou 均匀度指数 | | $E=H'/\ln Ns$ | 减小 |
| M13 | 浮游植物总丰度 | cells/L | 藻类的总细胞数 | 增大 |
| M14 | 硅藻门丰度占比 | % | 硅藻门的细胞数/藻类的总细胞数×100% | 增大 |
| M15 | 蓝藻门丰度占比 | % | 蓝藻门的细胞数/藻类的总细胞数×100% | 增大 |
| M16 | 绿藻门丰度占比 | % | 绿藻门的细胞数/藻类的总细胞数×100% | 增大 |
| M17 | 蓝藻门+绿藻门丰度占比 | % | 蓝藻门和绿藻门细胞数/藻类的总细胞数×100% | 增大 |
| M18 | 藻类总生物量 | mg/L | 藻类总的生物量 | 增大 |
| M19 | 硅藻门生物量 | mg/L | 硅藻门生物量 | 增大 |
| M20 | 蓝藻门生物量 | mg/L | 蓝藻门生物量 | 增大 |
| M21 | 绿藻门生物量 | mg/L | 绿藻门生物量 | 增大 |
| M22 | 蓝藻门+绿藻门生物量 | mg/L | 蓝藻门+绿藻门总生物量 | 增大 |
| M23 | 硅藻门生物量占比 | % | 硅藻门生物量/藻类总生物量×100% | 增大 |
| M24 | 蓝藻门生物量占比 | % | 蓝藻门生物量/藻类总生物量×100% | 增大 |
| M25 | 绿藻门生物量占比 | % | 绿藻门生物量/藻类总生物量×100% | 增大 |
| M26 | 蓝藻门+绿藻门生物量占比 | % | (蓝藻门+绿藻门总生物量)/藻类总生物量×100% | 增大 |
| M27 | 运动性硅藻丰度占比 | % | (舟形藻属+双菱藻属+双壁藻属+菱形藻属细胞数)/藻类的总细胞数×100% | 增大 |
| M28 | 硅藻商 | | 中心纲细胞数/羽纹纲细胞数 | 增大 |

### 1.5 数据处理与分析

利用 ArcGIS 10.8 软件绘制拉鲁湿地样点分布图及水生态健康评价结果图,采用反距离权重插值法绘制 WQI 时空分布图。利用 Excel 2016 软件统计浮游植物物种数、丰度和生物量,使用 R4.1.3 软件计算生物多样性指数,使用 SPSS 25.0 软件对 P-IBI 候选指标进行相关性分析。P-IBI 候选指标过程中的箱体图、MBFG 功能群组成、P-IBI 值与环境因子的相关性以及 P-IBI 与 MBFG 的相关性分析均采用 Origin 2022 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于 WQI 值的水质时空变化特征

拉鲁湿地不同季节水体 WQI 值的时空分布如图 2 所示。各采样点平均 WQI 值春季、夏季、秋季分别为(85.61±6.62)、(74.56±7.84)、(77.89±9.07),水质评价等级总体为“良好”~“中等”。从季节整体水质来看,春季最好、秋季次之、夏季最差。从样点分布来看,3 个季节 WQI 值均表现出在湿地东北部和西南部偏低、中东部偏高的特征,春季拉鲁湿地 WQI 值由东向西递减,夏季和秋季的变化趋势几乎一致,从东向西呈现先降低后升高再降低的趋势。

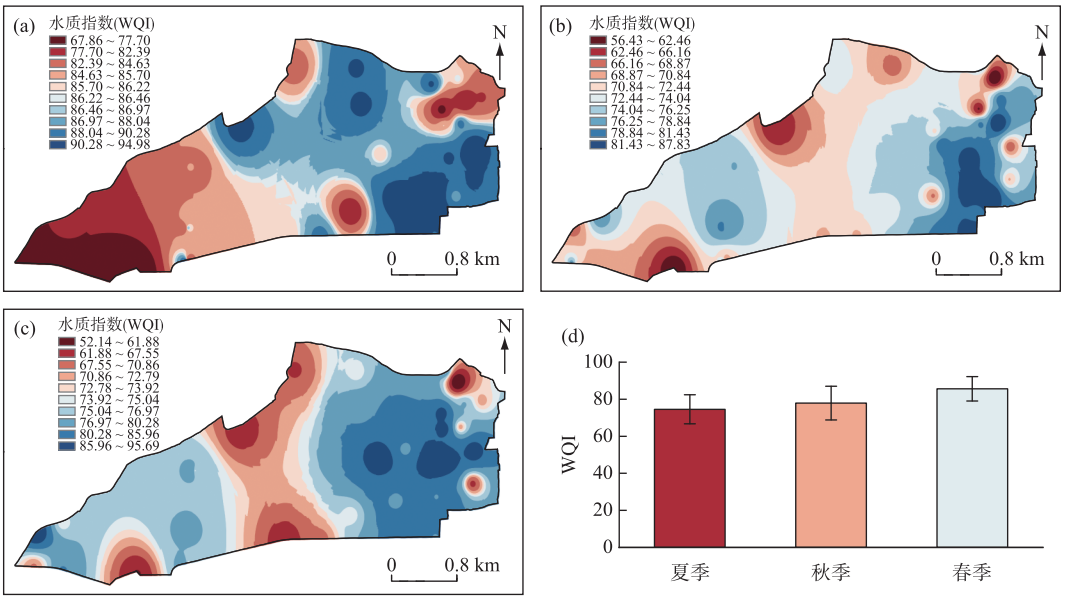


图 2 拉鲁湿地 WQI 值的时空分布(a:春季;b:夏季;c:秋季;d:季节平均)

Fig. 2 Spatial-temporal distribution of WQI values in Lhalu Wetland (a:spring; b:summer; c:autumn; d:seasonal mean)

### 2.2 浮游植物 MBFG 组成

将浮游植物丰度按功能群分组统计,绘制 3 个季节各点位相对丰度堆积图(图 3)。3 个季节均以Ⅵ类功能群占主导地位,总细胞丰度在春季达到最大(544.16×10$^5$ cells/L),夏季最小(259.78×10$^5$ cells/L);Ⅱ类功能群在 3 个季节中相对丰度均最小,春季、夏季和秋季分别为 0.20%、1.15%和 0.49%;Ⅴ类功能群秋季相对丰度最高,丰度也达到最大;春季和夏季浮游植物丰度总体较低,但Ⅳ和Ⅶ类功能群相对丰度增大,Ⅰ和Ⅴ类功能群在各样点的相对丰度有所下降。3 个季节中Ⅲ类功能群大多分布在拉鲁湿地西部,Ⅳ类功能群出现类似的情况,而相对丰度最高的Ⅵ类功能群在西部较少。

### 2.3 P-IBI 评价体系构建及评价结果

2.3.1 参照点的选取 根据拉鲁湿地 42 个样点的人类活动影响程度和水环境质量,选择人类活动影响程度小且水质指数值大于 80 的点位设为参照点。其中春季 14 个,分别为 S1、S2、S6、S7、S12、S13、S14、S18、S20、S23、S24、S25、S26、S27;夏季 11 个,分别为 S11、S14、S17、S19、S20、S21、S22、S23、S25、S26、S27;秋季 11 个,分别为 S1、S10、S12、S13、S19、S20、S22、S27、S36、S38、S41。

2.3.2 候选指标的筛选和选择 利用参考点与受损点的箱型图 IQ(25%~75%分位数的箱体重叠情况)对 28 个候选指标进行判别能力分析。3 个季节筛选出符合标准的生物参数各 7 个,春季为 M5、M6、M8、M9、M14、M16、M17,夏季为 M2、M5、M8、M11、M16、M21、M25,秋季为 M14、M15、M17、M20、M23、M24、M26(图 4a、b、c)。分别对 3 个季节筛选出的候选指标进行 Pearson 相关分析(表 3、4、5),最终确定春季 P-IBI 指标体系包括 M9、M16、M17 3 个指标;夏季 P-IBI 指标体系包括 M11、M21、M25 3 个指标;秋季 P-IBI 指标体系包括 M15、M20、M23 3 个指标。

2.3.3 指数的计算和体系构建 根据比值法的计算公式,通过将筛选所得的各核心指标计算分值加和,即获得 P-IBI 值,以此确定 P-IBI 指标体系评分标准(表 6)。

2.3.4 拉鲁湿地 P-IBI 评价结果 拉鲁湿地 P-IBI 评价结果如图 4d 所示。春季,42 个样点 P-IBI 值的平均值为 2.29,健康状态等级为“健康”,其中,“健康”等级的样点占 73.8%,“亚健康”等级的样点占 16.7%,“一般”等级的样点占 9.5%;夏季,42 个样点 P-IBI 值的平均值为 1.90,健康状态等级为“健康”,其中,“健康”

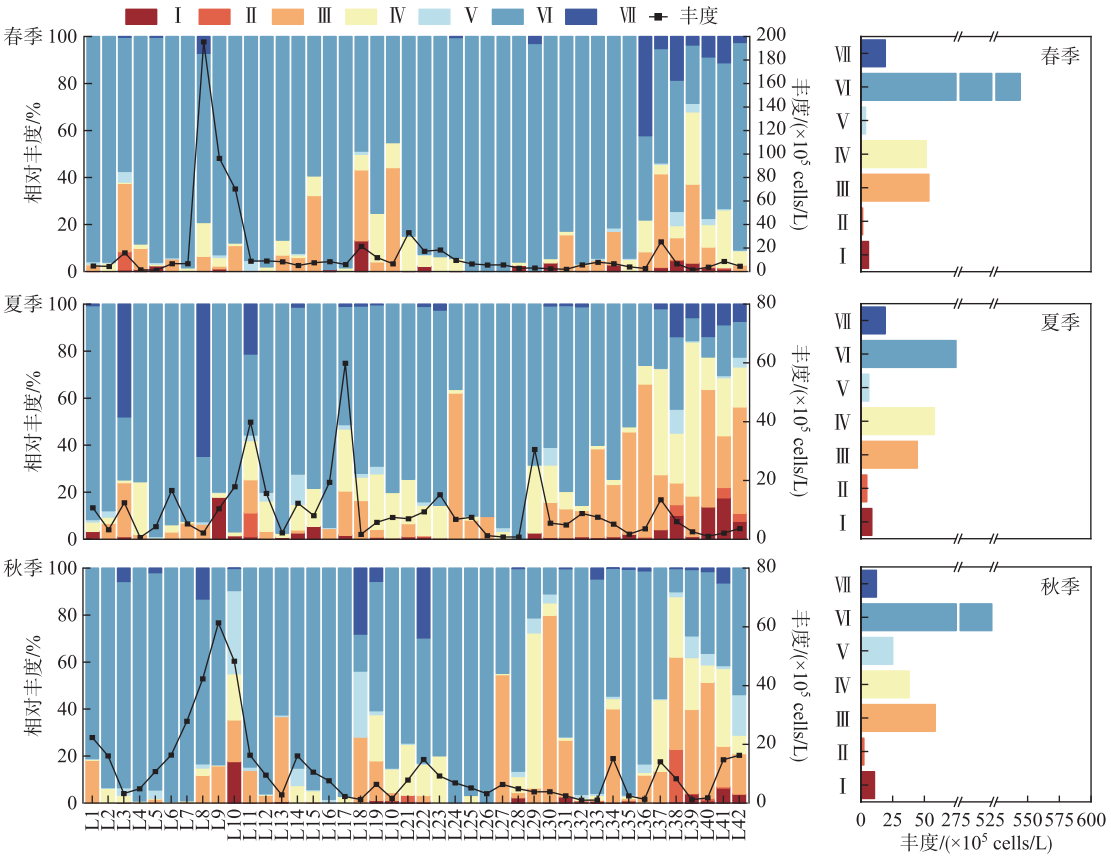


图 3 拉鲁湿地浮游植物 MBFG 组成

Fig. 3 Composition of phytoplankton MBFG in Lhalu Wetland

表 3 春季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab. 3 Pearson correlation analysis of candidate indicators in spring

| | M5 | M6 | M8 | M9 | M14 | M16 | M17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M5 | 1 | | | | | | |
| M6 | −0.771** | 1 | | | | | |
| M8 | 0.937** | −0.707** | 1 | | | | |
| M9 | 0.770** | −0.971** | 0.634** | 1 | | | |
| M14 | −0.576** | 0.757** | −0.498** | −0.752** | 1 | | |
| M16 | 0.753** | −0.488** | 0.753** | 0.461** | −0.535** | 1 | |
| M17 | 0.566** | −0.719** | 0.493** | 0.712** | −0.996** | 0.547** | 1 |

** 表示 $P<0.01$。

等级的样点占 71.4%,“亚健康”等级的样点占 28.6%;秋季,42 个样点 P-IBI 值的平均值为 1.98,健康状态等级为“健康”,其中,“健康”等级的样点占 76.2%,“亚健康”等级的样点占 21.4%,“一般”等级的样点占 2.4%。整体上看,拉鲁湿地生态健康状态为“健康”~“亚健康”,从 3 个季节平均 P-IBI 值看,春季水质最好、秋季次之、夏季最差,中东部样点普遍优于西南部和东北部。

表 4 夏季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab. 4 Pearson correlation analysis of candidate indicators in summer

| | M2 | M5 | M8 | M11 | M16 | M21 | M25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M2 | 1 | | | | | | |
| M5 | 0.576** | 1 | | | | | |
| M8 | 0.303 | 0.929** | 1 | | | | |
| M11 | 0.971** | 0.571** | 0.304 | 1 | | | |
| M16 | 0.265 | 0.793** | 0.819** | 0.304 | 1 | | |
| M21 | 0.533** | 0.572** | 0.399** | 0.435** | 0.256 | 1 | |
| M25 | 0.177 | 0.746** | 0.804** | 0.183 | 0.839** | 0.426** | 1 |

** 表示 $P<0.01$。

表 5 秋季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab. 5 Pearson correlation analysis of candidate indicators in autumn

| | M14 | M15 | M17 | M20 | M23 | M24 | M26 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M14 | 1 | | | | | | |
| M15 | −0.788** | 1 | | | | | |
| M17 | −0.974** | 0.817** | 1 | | | | |
| M20 | −0.489** | 0.286 | 0.387* | 1 | | | |
| M23 | 0.916** | −0.642** | −0.866** | −0.464** | 1 | | |
| M24 | −0.782** | 0.827** | 0.749** | 0.461** | −0.816** | 1 | |
| M26 | −0.869** | 0.641** | 0.887** | 0.325* | −0.943** | 0.767** | 1 |

** 表示 $P<0.01$。

表 6 基于 P-IBI 分值的拉鲁湿地健康评价等级标准

Tab. 6 Health assessment grading for the Lhalu Wetland based on P-IBI

| 分级 | 极差 | 差 | 一般 | 亚健康 | 健康 |
|---|---|---|---|---|---|
| P-IBI | <0.43 | [0.43, 0.87) | [0.87, 1.30) | [1.30, 1.74) | ≥ 1.74 |

### 2.4 P-IBI 与环境因子、WQI 值的相关性分析

对拉鲁湿地 P-IBI 值、WQI 值和水环境因子(pH 除外)进行 lg ($x$+1)转换,然后进行相关性分析,结果如图 5 所示。其中,P-IBI 值与 DO 呈显著正相关($P<0.05$),P-IBI 值与 WQI 值呈显著正相关($P<0.05$),其他水环境因子与 P-IBI 值均无显著相关性($P>0.05$)。

### 2.5 P-IBI 与 MBFG 功能群的相关性分析

P-IBI 与浮游植物形态功能类群相关性分析结果显示(图 6),春季 P-IBI 值分别与Ⅰ和Ⅲ类功能群丰度均呈极显著负相关($P<0.01$);夏季 P-IBI 值则与 MBFG 功能群丰度无显著相关性;秋季 P-IBI 值与Ⅲ和Ⅶ类功能群丰度呈极显著负相关($P<0.01$),与Ⅵ类功能群丰度呈显著负相关($P<0.05$),与其他功能群丰度无显著相关性。

## 3 讨论

### 3.1 基于 WQI 值的水质时空变化特征

拉鲁湿地的水体 WQI 的时空分布特征揭示了该地区水质的季节性变化和空间分布模式。从季节性变化来看:春季平均 WQI 值最高,达到 85.61;夏季平均 WQI 值最低,为 74.56,这可能与夏季较高的温度和较强的人类活动有关[24];秋季 WQI 值处于两者之间,为 77.89,水质状况处于春季和夏季之间。从水质评价等级看:所有季节的水质评价等级均达到了“中等”以上,说明拉鲁湿地的整体水质状况是乐观的。春季有最

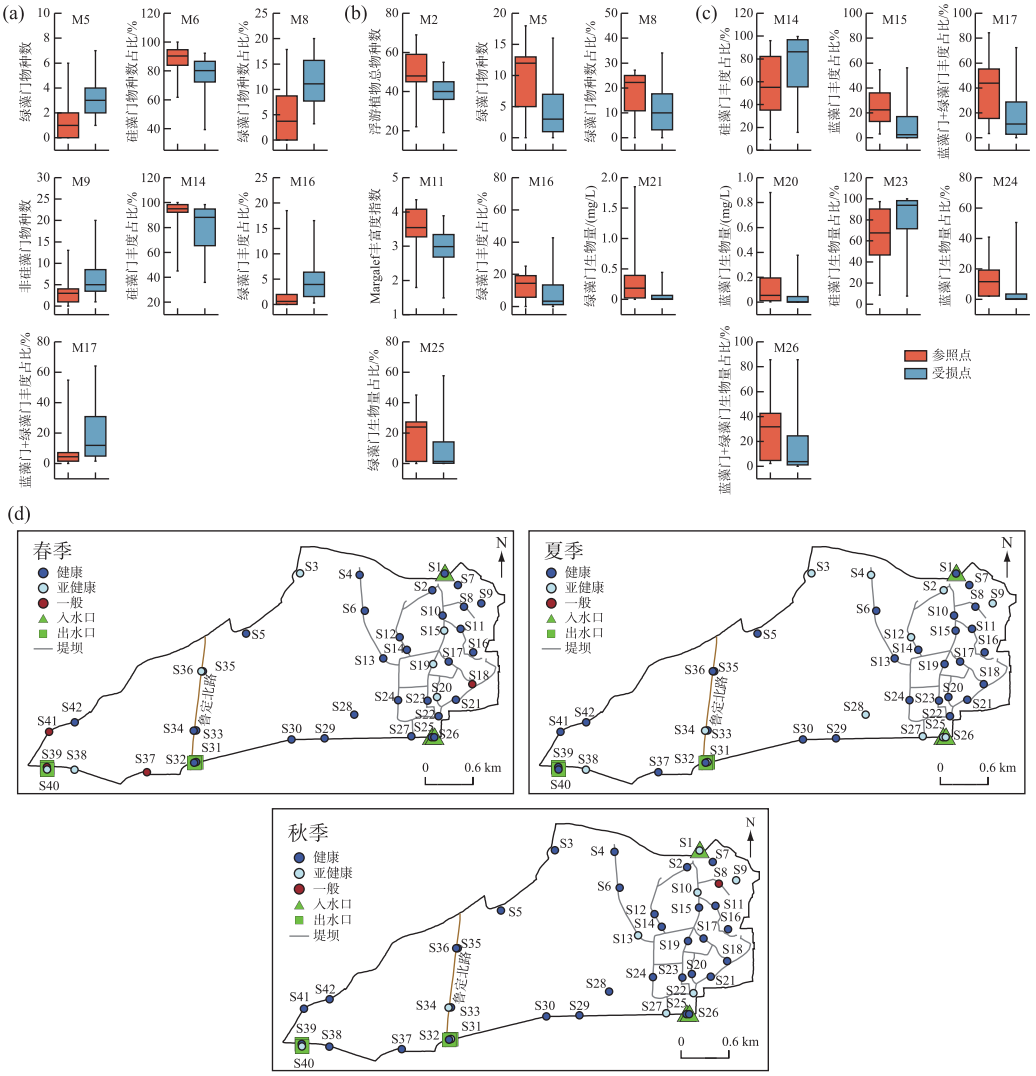


图 4 候选指标的筛选结果(a:春季;b:夏季;c:秋季)和拉鲁湿地水生态健康评价(d)

Fig. 4 Screening results of candidate indicators (a:spring; b:summer; c:autumn) and ecological health assessment results in the Lhalu Wetland (d)

多的“优秀”点,春季特有的环境因素及人为因素,如这期间拉鲁湿地采取封禁措施,禁止外人入内,开放时间在每年的 5－10 月,所以春季水质状况最好。从空间分布来看,湿地东北部和西南部的 WQI 值偏低,而中东部的 WQI 值偏高,这与这些区域的水文地质条件、人类活动强度以及植被覆盖等因素有关。拉鲁湿地东北部为人类活动的聚集地,出水口则在拉鲁湿地西南部[47]。从方向性变化看:春季 WQI 值呈现出由东向西递减的趋势,可能是由春季特有的水文循环模式造成;而夏季和秋季的 WQI 值变化趋势几乎一致,从东向西呈现出先降低后升高再降低的趋势,这可能与季节性的水流动态和水质净化过程有关。拉鲁湿地水流方向总体由北向南、由东向西,且中部存在大面积的沼泽[48]。拉鲁湿地的水质状况在不同季节和不同地理位置表现出明显差异。夏季水质相对较差,需制定针对性的管理措施;而秋季和春季虽然水质相对较好,但仍需持续监测和维护,以保持湿地生态系统的健康和稳定。此外,湿地的东北部和西南部可能需要特别保护和管理,以提高这些区域的水质。

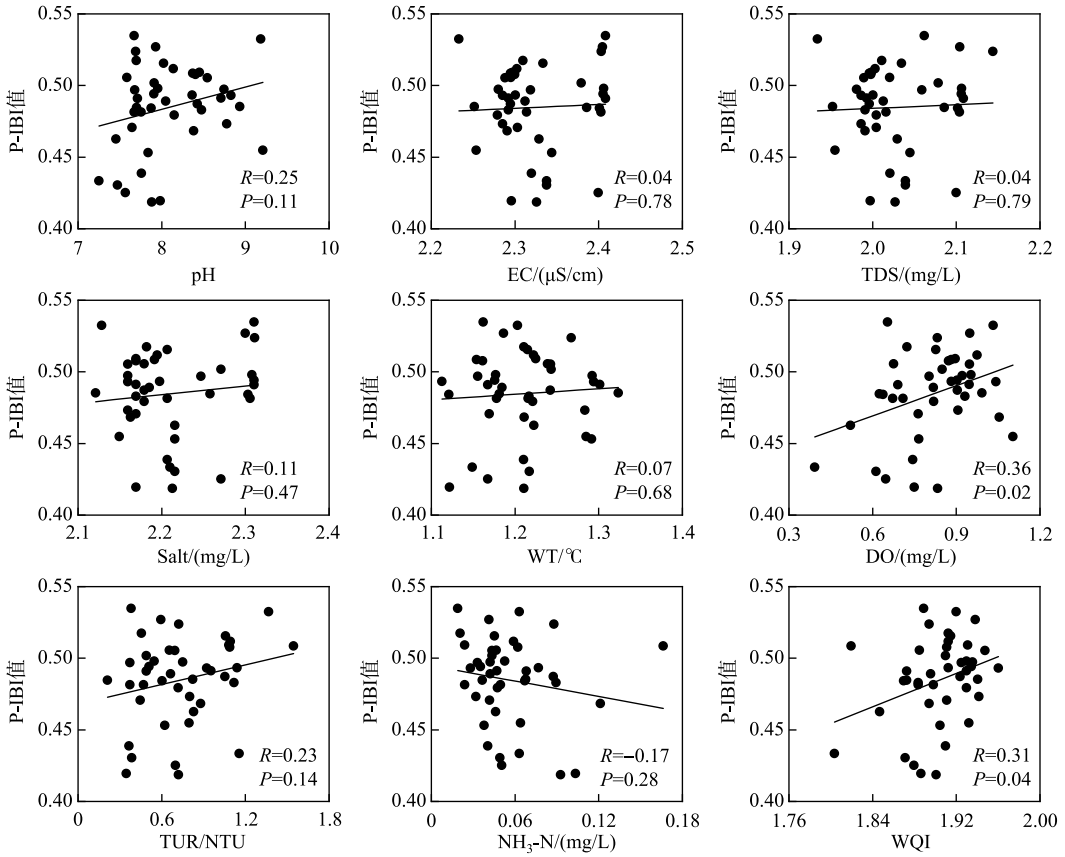


图 5 拉鲁湿地 P-IBI 值与环境因子、WQI 值的相关性

Fig. 5 Correlation between P-IBI values and water environmental factors, WQI values in the Lhalu Wetland

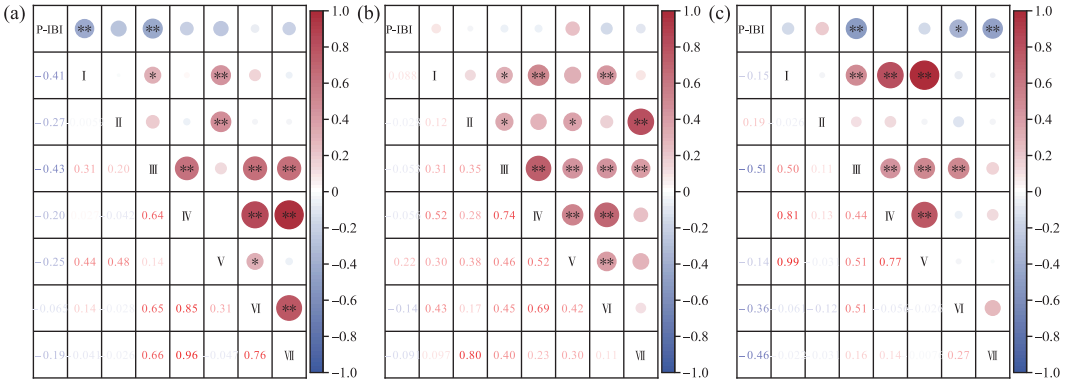


图 6 拉鲁湿地 P-IBI 值与浮游植物 MBFG 的相关性(a:春季;b:夏季;c:秋季;* $P$<0.05, ** $P$<0.01)

Fig. 6 Correlation between P-IBI values and MBFG of phytoplankton in Lhalu Wetland (a: spring; b: summer; c: autumn; * $P$<0.05, ** $P$<0.01)

### 3.2 P-IBI 评价拉鲁湿地水生态健康状况

春季 P-IBI 值平均为 2.29,表明湿地处于“健康”等级。春季的水生态健康状态分布显示,有部分样点

处于“亚健康”和“一般”等级,这可能意味着湿地生态系统在春季时面临一定的压力,但仍保持一定的健康水平。夏季 P-IBI 值平均为 1.90,健康状态等级仍为“健康”,但平均 P-IBI 值低于春季,这表明夏季湿地的总体生态健康状态有所下降。这可能与季节性的环境变化和人类活动有关,如温度升高、降水量变化和人类活动加强等。秋季 P-IBI 值平均为 1.98,与夏季相比略有上升,表明拉鲁湿地生态系统健康状态在秋季有所恢复。拉鲁湿地是典型的高寒城市湿地,具有低氧低温的特点,在此环境下水温可能代替营养盐成为浮游植物生长的主要影响因子。水温较低时会限制某些浮游植物的生长,当以温度等外力条件作为主要的影响因素时,浮游植物种群之间的竞争能力将被削弱[49],群落内部可以达到相对的动态平衡,群落结构趋于稳定。水中 DO 浓度也在一定程度上受水温的影响而间接影响着浮游植物的生长[50],使得拉鲁湿地春季和秋季水生态健康状态较夏季好。李晓东等[51]和刘惠秋等[20]在雅鲁藏布江中上游及中游地区利用 P-IBI 进行水生态健康评价,评价结果均为春季水质最好、夏季次之、秋季最差,与本文对拉鲁湿地的研究结果一致。此外,拉鲁湿地虽为高寒城市湿地,但也属于雅鲁藏布江中游区域,因此本文利用 P-IBI 对拉鲁湿地的水生态健康评价也具有一定的可行性。基于 P-IBI 评价,拉鲁湿地中东部样点水质普遍优于西南部和东北部,与 WQI 评价结果类似,受到地理位置、水文条件和人类活动等多种因素的影响[52]。拉鲁湿地中东部样点位于其内部区域,受人类活动干扰程度小,拥有更适宜的环境和地理条件,生态健康状态更好;西南部位于出水口处,有利于污染物的富集;东北部虽然位于进水口处,但此处有拉鲁湿地国家级自然保护区的重要出入口(北环路出入口),人类活动强度较高。拉鲁湿地为城市湿地,西南部及东北部紧邻居民地,造成拉鲁湿地西南部和东北部湿地生态健康状态较差。拉鲁湿地南部和北部虽然距离居民地也很近,但是南部居民地与拉鲁湿地之间有中干渠作为屏障,东部的居民地与拉鲁湿地中间则有一定范围的草甸和树林作缓冲,从而对湿地生态健康状态影响较小,这表明土地利用类型的变化也是影响拉鲁湿地生态健康状态空间变化的重要因素。此外,湿地的沼泽化可能导致水动力阻隔严重,影响湿地的水环境保护及修复(如清淤、水生植物收割等),从而使湿地本身存在一定的内源性污染,造成春季进水口水质达到“健康”,出口为“亚健康”或“一般”。整体上,拉鲁湿地的生态健康状态呈现出从“健康”到“亚健康”的趋势。春季 P-IBI 平均值最高,这可能与春季生物多样性的增加和生态系统活力的提高有关[53]。然而,随着季节的推移,健康状态逐渐下降,这可能与环境压力的增加、生物多样性的减少等因素有关。拉鲁湿地在每年的 10 月份(秋季)封禁后,直到次年 5 月份(春季)才对外开放。人类活动强度的增加和气温的升高都会造成湿地所承受的环境压力增加,从而导致健康状态逐渐下降。夏季上游来水量大,同时沿途经过城区时有大量生活污水的排入,这些生活污水随流沙河和北干渠流入湿地内部,也是造成拉鲁湿地夏季生态健康状态下降的重要因素之一[54]。鉴于春季是湿地生态健康状态相对较好的季节,可以考虑在春季加强生态恢复和保护措施,以维持或提升湿地的生态健康水平。对于夏季和秋季出现的生态健康下降趋势,需要进一步研究其原因,并制定相应的管理策略,如改善水质、控制人类活动干扰、恢复植被等。考虑到拉鲁湿地水质空间分布的不均匀性,应针对不同区域制定差异化的管理措施,特别是对于西南部和东北部这些生态健康状态较差的区域,需要更多的关注和投入。同时,应进一步研究影响拉鲁湿地生态健康状态的季节性和空间性因素,以及这些因素如何相互作用,探索有效的生态恢复和保护措施,特别是针对当前生态健康状态较差的区域。通过对拉鲁湿地生态健康状况的季节和空间分析,可以更好地理解湿地生态系统的健康状况,并为湿地的管理和保护提供科学依据。

### 3.3 P-IBI 与环境因子、WQI 值的相关性

拉鲁湿地的 P-IBI 值与 DO 水平呈正相关($P<0.05$),表明较高的 DO 水平与湿地生态系统的健康状态密切相关[55]。DO 是水生生态系统中的一个重要指标,它直接关系到水生生物的生存和代谢活动。较高的 DO 水平通常意味着水体中有足够的氧气供应,有利于支持多样化的生物群落,从而促进湿地生态系统的健康[56-57]。因此,保护和提高湿地水体的 DO 水平对于维护湿地生态健康至关重要。此外,P-IBI 值与 WQI 也呈显著的正相关关系($P<0.05$)。WQI 是一个综合指标,反映了水体中多种污染物的总体水平[58]。较高的 WQI 值意味着水质较好,而较高的 P-IBI 值则表明湿地生态系统较为健康,这进一步证实了水质是影响湿地生态系统健康的关键因素。因此,控制和减少水体污染,提高水质,对于保护和恢复湿地生态系统具有重要意义。值得注意的是,除了 DO 和 WQI 之外,其他水环境因子与 P-IBI 值之间没有发现显著的相关性($P>$

0.05)。这可能表明在拉鲁湿地,高海拔、低温的环境造成 DO 和水质状况是影响湿地生态健康的主要因素,而其他水环境因子对生态系统健康的影响可能较小,或者它们的影响可能被 DO 和 WQI 所掩盖。然而,这一结果并不意味着其他水环境因子不重要,它们可能在特定的环境条件下或与其他因子相互作用时发挥关键作用。基于上述分析,建议湿地管理者重视 DO 和水质的监测与保护。具体措施包括但不限于:优化湿地的水文管理,以维持适宜的 DO 水平;加强污染源控制,减少污染物的输入,以及定期监测 WQI,及时发现和应对水质下降的问题。

尽管某些水环境因子的相关性不显著,但未来仍需在特定条件下深入考察其对湿地生态健康的影响,以及它们如何共同影响湿地生态系统的健康。同时,考虑到生态系统的复杂性,未来还可以考虑生物因素、气候条件、土地利用变化等其他可能影响湿地生态健康的因素。未来的研究和管理工作应当继续关注这些关键的水环境指标,以确保湿地生态系统的健康和可持续发展。

### 3.4 P-IBI 与 MBFG 功能群的相关性

拉鲁湿地浮游植物的功能群丰度分布情况为研究湿地生态系统季节性变化和生物群落结构提供了重要依据。研究表明,Ⅵ类功能群更适宜在温度偏低的水体中生长,这与拉鲁湿地地处高原地区,全年平均气温较低的特征相符[59]。春季浮游植物总细胞丰度最高,达到 $544.16\times10^5$ cells/L,而夏季丰度最低,为 $259.78\times10^5$ cells/L,这种差异可能与温度、光照和营养盐的季节性变化有关[59]。Ⅱ类功能群在 3 个季节中所占比例最小,这可能意味着这些功能群对拉鲁湿地的环境条件更为敏感,或在湿地生态系统中具有特殊功能。Ⅴ类功能群在秋季的占比和丰度均达到最大,远超春季和夏季,这可能与秋季特有的环境条件(如温度降低、光照减少等因素)有关[22]。夏季和春季Ⅳ和Ⅶ类功能群的占比增大,而Ⅰ和Ⅴ类功能群的占比有所下降,反映了不同功能群对季节性环境变化的不同适应性[60]。从空间分布特征来看,Ⅲ和Ⅳ类功能群主要分布在拉鲁湿地的西部,而占比较大的Ⅵ类功能群在西部的分布明显低于东部,这种空间分布可能与湿地内部的水动力学、营养盐分布以及水环境质量的空间变化有关[61-62]。拉鲁湿地的浮游植物功能群分布呈现出明显的季节性和空间性差异,这些差异可能与环境因素(如温度、光照、营养盐含量)以及水文条件等有关[63-64]。

3 个季节 P-IBI 值与不同功能群的浮游植物丰度之间的相关性存在显著差异,这可能是由于季节性的环境变化。例如,温度、光照、营养盐含量等环境因素的季节性变化可能影响浮游植物的生长和分布[65]。通过 P-IBI 与浮游植物 MBFG 的相关性分析,秋季 P-IBI 值与Ⅲ和Ⅶ类功能群丰度呈现极显著负相关($P<0.01$),说明水生态健康状况越良好,水体中造成水环境污染的浮游植物越少。基于浮游植物 MBFG 的划分,Ⅲ类功能群主要由颤藻和鱼腥藻组成,Ⅶ类功能群主要由微囊藻和平裂藻组成,这两类浮游植物的功能群耐高温和高光强,适合在氮、磷浓度较高的富营养水体中生长,容易形成蓝藻水华,并且能够释放藻毒素,造成水环境污染[50,66]。这也是造成秋季 P-IBI 值与Ⅲ和Ⅶ类功能群丰度呈现极显著负相关的原因。春季 P-IBI 值与Ⅰ和Ⅲ类功能群丰度呈现极显著负相关($P<0.01$),Ⅰ类功能群主要由高比表面积的小型种类构成,如色球藻目、绿球藻目以及极细的丝状藻类。它们的体型小,生长速度快,吸收营养盐迅速,沉降速率低,可能对水质变化具有较高的敏感性,是水质状况变化的早期指示者。春季,许多水生生态系统中的生物活动进入活跃期,此时水质的恶化可能对浮游植物的组成和生态功能产生重要影响。秋季变化的环境条件(如温度下降、光照减少和营养盐可用性改变)可能对Ⅶ类功能群的生存与繁殖造成压力。进一步表明,P-IBI 评估水生态健康的结果较为准确可靠,P-IBI 评价体系能够反映拉鲁湿地的浮游植物 MBFG 结构变化,揭示湿地水生态健康状况及水污染风险程度,预测水质的整体状态。

## 4 结论

本研究为相关天然城市湿地的 P-IBI 构建以及生态保护与修复提供一定的参考依据。基于 WQI 值评价,拉鲁湿地水质总体为“良好”~“中等”,水质存在时空差异:春季最好、秋季次之、夏季最差,东部优于西部。基于 P-IBI 值评价,拉鲁湿地 3 个季节整体的水生态健康状态为“健康”~“亚健康”,春季水生态健康状态最优、秋季次之、夏季最差,中东部样点普遍优于西南部和东北部。拉鲁湿地 P-IBI 值与 WQI 值呈现显著正相关关系($P<0.05$),基于 P-IBI 评价拉鲁湿地水生态健康状态与 WQI 评价结果基本一致,DO 是影响拉

鲁湿地水生态健康状态的主要水环境因子($P<0.05$),气温、水量、人类活动和土地利用类型是影响拉鲁湿地水质和水生态健康状态的重要影响因素。春季Ⅰ和Ⅲ类功能群丰度随拉鲁湿地水生态健康状况的下降而上升,夏季水体生态健康状况与功能群的丰度变化关系不大,秋季Ⅲ和Ⅶ类功能群丰度的增加与水体生态健康状况的下降有显著相关。

基于研究结果,我们建议政府部门制定相关法律法规,通过减少农业、工业和城市径流中的污染物排放,保护湿地入水河流水质,并在湿地内部建立缓冲区以减少污染物直接进入湿地。同时,应制定适应性管理策略,通过提高湿地的连通性和多样性来增强其对气候变化的适应性。

## 5 参考文献


[1] Wang JH, Lv XG. Urban wetland: Its concept, ecological services and protection. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, (4): 555-560. [王建华, 吕宪国. 城市湿地概念和功能及中国城市湿地保护. 生态学杂志, 2007, (4): 555-560.]

[2] Wang HX. The functions and values of urban wetlands. *Geography Teaching*, 2008, (4): 5-7. [王海霞. 城市湿地的功能与价值. 地理教学, 2008, (4): 5-7.]

[3] Su MR, Chen C, Yang ZF. Research review on the advances in evaluating urban wetland ecosystem profitabilities. *Journal of Safety and Environment*, 2012, **12**(4): 147-154. DOI: 10.1007/s11783-011-0280-z. [苏美蓉, 陈晨, 杨志峰. 城市湿地生态系统服务功能评估研究进展. 安全与环境学报, 2012, **12**(4): 147-154.]

[4] Liu LF, Zhang W. Urban wetland's microclimate regulation function and its spatial gradient effect in city. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2024, **46**(4): 133-142. [刘洛甫, 张伟. 城市湿地的小气候调节功能及其空间梯度效应. 西南大学学报: 自然科学版, 2024, **46**(4): 133-142.]

[5] Chen D, Liu W, TianJ *et al*. Evaluating the ecological and environmental impact of urbanization in the greater toronto area through multi-temporal remotely sensed data and landscape ecological measures. In: Jiang B, Yao XB eds. Geospatial analysis and modelling of urban structure and dynamics. Dordrecht: Springer Science, Business Media B. V., 2010: 251-264.

[6] Cui BS, Yang ZF. Temporal-spatial scale characteristic of wetland ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1): 121-125. [崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 121-125.]

[7] Western D. Human-modified ecosystems and future evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, **98**(10): 5458-5465. DOI: 10.1073/pnas.101093598.

[8] Liu YB, Cai X, Yao CS. Summary of evaluation on urban freshwater ecosystem services. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(25): 13936-13939. [刘耀彬, 蔡潇, 姚成胜. 城市河湖水域生态服务功能价值评价的研究现状与进展. 安徽农业科学, 2010, **38**(25): 13936-13939.]

[9] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.

[10] De Keyser ES, Kirby DR, Ell MJ. An index of plant community integrity: Development of the methodology for assessing prairie wetland plant communities. *Ecological Indicators*, 2003, **3**(2): 119-133. DOI: 10.1016/S1470-160X(03)00015-3.

[11] Wang BX, Yang LF, Hu BJ *et al*. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1481-1490. DOI: 10.1007/s10971-005-6694-y. [王备新, 杨莲芳, 胡本进等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, **25**(6): 1481-1490.]

[12] Wen W, Li SS, Feng TH *et al*. Ecological health assessment of the middle and lower Hanjiang River based on plankton integrity. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(4): 85-91. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202211160460. [文威, 李双双, 冯桃辉等. 基于浮游生物完整性的汉江中下游生态健康评价. 水生态学杂志, 2023, **44**(4): 85-91.]

[13] Yin XW, Qu XD, Li QN *et al*. Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(6): 1677-1691. DOI: 10.2307/1467493. [殷旭旺, 渠晓东, 李庆南等. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, **32**(6): 1677-1691.]

[14] An RZ, Pan CM, Tabalazhen *et al*. Vertical distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Lake Basomtso, Tibet, China. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 86-101. DOI: 10.18307/2021.0114. [安瑞志, 潘成梅, 塔巴拉珍等. 西藏巴松错浮游植物功能群垂直分布特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 86-101.]

[15] Torres MA, Barros MP, Campos SCG *et al*. Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **71**(1): 1-15. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2008.05.009.

[16] Li L, Zhao RZ, Qiu XZ. Seasonals substitution characteristics and driving factors of phytoplankton dominant functional groups in Taiyangshan Wetland. *Environmental Monitoring in China*, 2023, **39**(4): 133-146. [李霖, 赵睿智, 邱小琮. 太阳山湿地浮游植物优势功能群季节演替特征及驱动因子分析. 中国环境监测, 2023, **39**(4): 133-146.]

[17] Thomas MK, Fontana S, Reyes M *et al*. The predictability of a lake phytoplankton community, over time-scales of hours to years. *Ecology*

*Letters*, 2018, **21**(5): 619-628. DOI: 10.1111/ele.12927.

[18] Chen Q, Ma RB, Tan JW. Construction of phytoplankton integrity index and assessment of water ecological health in Mingcui Lake. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2024, (1): 127-131. [陈琪, 马瑞兵, 谭嘉伟. 鸣翠湖浮游植物完整性指数构建及水生态健康评价. 中南农业科技, 2024, (1): 127-131.]

[19] Sheng XR, Luo ZL, Sun G *et al*. Development and verification of the phytoplankton biological integrity index—A case study in Yongding River in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(2): 489-500. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0295.

[20] Liu HQ, Li XD, Yang Q *et al*. Evaluation on water ecological health in middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River based on phytoplankton-index of biotic integrity. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37**(9): 109-117. [刘惠秋, 李晓东, 杨清等. 基于浮游植物完整性指数的雅鲁藏布江中上游河流水生态健康评价. 干旱区资源与环境, 2023, **37**(9): 109-117.]

[21] Kruk C, Huszar VLM, Peeters ETHM *et al*. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 614-627. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02298.x.

[22] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al*. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI: 10.18307/2015.0102. [胡韧, 蓝于倩, 肖利娟等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]

[23] Zhu YQ, Lyu J, Li QZ *et al*. Seasonal variation of phytoplankton community and its relationship with environment in subtropical reservoirs: A comparison between two methods of functional groups classification. 2019, **30**(6): 2079-2086. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201906.030.

[24] Xu RS, Pang Y, Luo J *et al*. Water quality evaluation and spatial-temporal distribution characteristics of the East Route of the South-to-North Water diversion project in Jiangsu Province based on WQI. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 5227-5234. DOI: 10.13227/j.hjkx.202309174. [徐若诗, 逄勇, 罗缙等. 基于 WQI 的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征. 环境科学, 2024, **45**(9): 5227-5234.]

[25] Lu Z, Huang HQ, Xu LG *et al*. Application of WQI method for water quality evaluation of Poyang Lake based on entropy weight. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, **33**(4): 30-34. [鲁照, 黄河清, 徐力刚等. 基于熵权的 WQI 法在鄱阳湖水质评价中的应用. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(4): 30-34.]

[26] Li LT, Shao B, Zhuomaquxi *et al*. Analysis of spatial-temporal variation characteristics and pollution source of water quality comprehensive conditions in Lalu Wetland, Tibet. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, **50**(12): 67-74, 78. [李梁婷, 邵蓓, 卓玛曲西等. 西藏拉鲁湿地水质综合状况时空变化特征及污染源分析. 安徽农业科学, 2022, **50**(12): 67-74, 78.]

[27] Tian HX, Wang JJ, Zhou L *et al*. Water quality status and pollution assessment of lhalu wetland in Tibet in different periods. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(6): 198-206. DOI: 10.13205/j.hjgc.202106030. [田瀚鑫, 王佳俊, 周磊等. 西藏拉鲁湿地不同时期水质现状及污染评价. 环境工程, 2021, **39**(6): 198-206.]

[28] Ma WQ, Chen JL, Zhang YQ *et al*. Indicator species of phytoplankton pollution and water quality evaluation in Lalu Wetland, Tibet. *Tibet Science and Technology*, 2023, (4): 13-22. [马文强, 陈俊霖, 张艳秋等. 西藏拉鲁湿地浮游植物污染指示种及水质评价. 西藏科技, 2023, (4): 13-22.]

[29] Yan ZQ, Li Y, Zhang KR *et al*. PSR model-based evaluation on the ecosystem health of Lalu Wetland in Tibet. *Wetland Science & Management*, 2023, **19**(4): 49-53. [闫钟清, 李勇, 张克柔等. 基于 PSR 模型的西藏拉鲁湿地生态系统健康评价. 湿地科学与管理, 2023, **19**(4): 49-53.]

[30] Zhao ZG, Shi XM. Ecosystem evolution of alpine wetland in Tibetan Plateau and consideration for ecological restoration and conservation. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(17): 33-41. [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. 科技导报, 2020, **38**(17): 33-41.]

[31] Liu Y, An RZ, Yang H *et al*. Spatial-temporal distribution characteristics and its driving factors of phytoplankton community in Lhalu Wetland, Tibet, China. *J Lake Sci*, 2024, **36**(2): 403-415. DOI: 10.18307/2024.0216. [刘洋, 安瑞志, 杨号等. 西藏拉鲁湿地浮游植物群落时空分布特征及其驱动因子. 湖泊科学, 2024, **36**(2): 403-417.]

[32] 迟若文. 西藏硅藻图集. 拉萨: 西藏人民出版社, 1990.

[33] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏藻类. 北京: 科学出版社, 1992.

[34] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻. 北京: 科学出版社, 2000.

[35] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类:系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.

[36] Sun J. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(11): 1331-1346. DOI: 10.1093/plankt/fbg096.

[37] Kremer CT, Gillette JP, Rudstam LG *et al*. A compendium of cell and natural unit biovolumes for >1200 freshwater phytoplankton species. *Ecology*, 2014, **95**(10): 2984. DOI: 10.1890/14-0603.1.

[38] Ali Turan Koçer M, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecological Indicators*, 2014, **36**: 672-681. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.09.034.

[39] Pesce SF, Wunderlin DA. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (*Argentina*) on Suquia River. *Water Research*, 2000, **34**(11): 2915-2926. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00036-1.

[40] Kannel PR, Lee S, Lee YS *et al*. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **132**(1/2/3): 93-110. DOI: 10.1007/s10661-006-9505-1.

[41] Cheng S, Zuo XY, Li TQ *et al*. Health assessment of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir area based on phytoplankton index of biotic. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2021, **42**(2): 54-60. [程帅, 左新宇, 李同庆等. 基于浮游植物完整性指数的三峡库区小江河流健康评价. 水利水电快报, 2021, **42**(2): 54-60.]

[42] Feng ZY, Hou YM, Yin K *et al*. Ecological health assessment of the Yellow River mainstem based on benthic macroinvertebrate index of biological integrity. *J Lake Sci*, 2024, **36**(2): 512-522. DOI: 10.18307/2024.0231. [冯治远, 侯易明, 阴琨等. 基于底栖动物生物完整性指数的黄河干流生态健康评价. 湖泊科学,2024, **36**(2): 512-522.]

[43] Cai K, Qin CY, Li JY *et al*. Preliminary study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for lake ecosystem health: A case of Taihu Lake in winter, 2012. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(5): 1431-1441. DOI: 10.5846/stxb201407211483. [蔡琨, 秦春燕, 李继影等. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价——以 2012 年冬季太湖为例. 生态学报, 2016, **36**(5): 1431-1441.]

[44] Zhang YY, Ban X, Li EH *et al*. Evaluating ecological health in the middle-lower reaches of the Hanjiang River with cascade reservoirs using the planktonic index of biotic integrity (P-IBI). *Ecological Indicators*, 2020, **114**: 106282. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106282.

[45] Zhang ST, Liu L, Huang YF *et al*. Ecological health status evaluation of Yangcheng Lake based on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI). *Environmental Pollution & Control*, 2024, **46**(2): 216-220, 261. [张顺婷, 刘凌, 黄艳芬等. 基于浮游植物完整性指数的阳澄湖生态健康状态评价. 环境污染与防治, 2024, **46**(2): 216-220, 261.]

[46] Yang RJ, Feng MQ. Correlation between phytoplankton index of biotic integrity and eutrophication—A case study of Zhangze Reservoir. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2021, **12**(3): 198-208. DOI: 10.13524/j.2095-008x.2021.03.053. [杨锐婧, 冯民权. 浮游植物完整性指数与水体富营养化相关性研究——以漳泽水库为例. 黑龙江大学工程学报, 2021, **12**(3): 198-208.]

[47] Fan ZY, Yuan L, Zhou Y *et al*. Research on the water quality of Dishui Lake and the river into the lake based on WQI method. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, **30**(2): 276-283. DOI: 10.12024/jsou.20200503043. [范泽宇, 袁林, 周亦等. 基于 WQI 法的滴水湖及入湖河道水质研究. 上海海洋大学学报, 2021, **30**(2): 276-283.]

[48] 王佳俊. 拉鲁湿地环境调查分析与污染评价[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.

[49] 马芊芊. 以浮游生物完整性指数评价长江上游干流宜宾至江津段河流健康度[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014.

[50] Bai NJ, Chen L, Jiang YN *et al*. Spatio-temporal characteristics of phytoplankton distribution and the identification of driving factors in the arsenic-contaminated Yangzong Lake. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 147-158. DOI: 10.18307/2019.0114. [白宁静, 陈丽, 蒋伊能等. 阳宗海砷污染背景下浮游植物的时空分布特征及其驱动因子解析. 湖泊科学,2019, **31**(1): 147-158.]

[51] Li XD, Yang Q, Liu HQ *et al*. Response of river ecosystem health status to water environmental factors in the middle reaches of Yarlung Zangbo River. *Environmental Science*, 2023, **44**(9): 4941-4953. DOI: 10.13227/j.hjkx.202211063. [李晓东, 杨清, 刘惠秋等. 雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应. 环境科学, 2023, **44**(9): 4941-4953.]

[52] 鞠永富. 小兴凯湖水生生物多样性及生态系统健康评价[学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.

[53] Tian W, Zhang HY, Zhao L *et al*. Phytoplankton diversity effects on community biomass and stability along nutrient gradients in a eutrophic lake. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(1): 95. DOI: 10.3390/ijerph14010095.

[54] Su SQ, Feng YQ, Zhou HD *et al*. Water quality evaluation and pollution source analysis of Lhalu Wetland in Xizang. *Xizang Science and Technology*, 2024, **46**(8): 20-30. [苏思强, 冯源强, 周会东等. 西藏拉鲁湿地水系水质评价及污染源分析. 西藏科技, 2024, **46**(8): 20-30.]

[55] Zhao HJ, Wang Y, Yang LL *et al*. Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 113-121. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.033.

[56] 陈永亨, 吴颖娟, 谢文彪. 环境化学. 广州: 广东高等教育出版社, 2004.

[57] Xiang H, Sun SH, Sun J *et al*. Analysis of the characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Huashan Lake Wetland. *Yellow River*, 2024, **46**(S1): 78-79, 81. [相华, 孙诗涵, 孙婧等. 华山湖湿地浮游植物群落特征及其与环境因子关系分析. 人民黄河, 2024, **46**(S1): 78-79, 81.]

[58] Li W, Yang, JY, Xiong J *et al*. Water quality evaluation and pollution source analysis of Yani Wetland in Xizang. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(4): 119-131. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202404160132. [李伟, 杨崛园, 熊健等. 西藏雅尼湿地水质评价及污染源分析, 水生态学杂志, 2025, **46**(4): 119-131.]

[59] Liu LZ, Zhu Y, Li BT *et al*. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, **36**(4): 13-20. [刘凌, 朱燕, 李博韬等. 基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价. 水资源保护, 2020, **36**(4): 13-20.]

[60] Wang L, Li X, Ma WX *et al*. Succession Characteristics and water quality responsiveness evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake wa-

ter source ecological purification system. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1265-1275. DOI: 10.13227/j.hjkx.201905068. [王莲, 李璇, 马卫星等. 盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价. 环境科学, 2020, **41**(3): 1265-1275.]

[61] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.

[62] Rangel LM, Soares MCS, Paiva R *et al*. Morphology-based functional groups as effective indicators of phytoplankton dynamics in a tropical cyanobacteria-dominated transitional river-reservoir system. *Ecological Indicators*, 2016, **64**: 217-227. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.12.041.

[63] Li L, Li QH, Jiao SL *et al*. Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir. 2015, **36**(12): 4436-4443. DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.12.015. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应. 环境科学, 2015, **36**(12): 4436-4443.]

[64] Lou T, Lu XX, Liu Y *et al*. Distribution characteristics of three functional groups of phytoplankton in the Lalin River and their relationship with environmental factors. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, **54**(4): 1085-1100. DOI: 10.11693/hyhz20221100301. [娄恬, 陆欣鑫, 刘妍等. 拉林河浮游植物三种功能群分布特征及其与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 2023, **54**(4): 1085-1100.]

[65] Zhu WJ, Pang WT, You QM *et al*. Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring, Huaihe River Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 637-645. DOI: 10.18307/2017.0312. [朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 637-645.]

[66] Ma TT, Fan YM, Li KY *et al*. Ecological health assessment of main estuaries of Lake Taihu based on phytoplankton index of biotic integrity. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(4): 501-508. [马廷婷, 范亚民, 李宽意等. 基于浮游植物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(4): 501-508.]