

基于浮游植物生物完整性指数的拉萨拉鲁湿地生态系统健康评价*

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关键的作用, 其生态系统的健康评价更是一个重要的过程, 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进行了浮游植物样品的采集和水环境因子的测定, 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) 和浮游植物完整性指数 (P-IBI) 评价该湿地生态健康状态, 分析水质及形态功能群的时空分布特征、P-IBI 值与水环境因子的相关性。研究结果表明: (1) 基于 WQI 值评价拉鲁湿地水质总体“良好 ~ 中等”, 水体质量存在时空差异: 春季优于秋季优于夏季, 东部优于西部。(2) 基于 P-IBI 值评价拉鲁湿地三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优于夏季, 中东部样点普遍优于西南部和东北部。(3) 浮游植物生物完整性指数 (P-IBI) 值与水质指数 (WQI) 值呈现出显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 基于 P-IBI 评价拉鲁湿地水生态健康状态与 WQI 评价结果接近一致, 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。(4) 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

Assessment of the Ecosystem Health of Lhalu Wetland (Lhasa) Based on the Phytoplankton Index of Biotic Integrity*

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 that helps

* 2024-09-04 收稿; 2025-02-24 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) 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。

** **通讯作者; Email: basang2003@utibet.edu.cn, ly@utibet.edu.cn

us understand the current condition of wetlands and take appropriate protective measures. To explore the ecological health status of the 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 show: (1) Based on the Water Quality Index (WQI) values, the overall water quality of Lhalu Wetland is evaluated as "good to moderate," with spatial and temporal variations in water quality: spring is superior to autumn, which in turn is superior to summer, and the eastern part is superior to the western part. (2) Based on the Phytoplankton Index of Biotic Integrity (P-IBI) values, the overall water ecological health status of Lhalu Wetland across three seasons is evaluated as "health to sub-health," with the spring water ecological health status being superior to autumn, which is superior to summer, and the central-eastern sampling points are generally superior to the south-western and north-eastern parts. (3) The Phytoplankton Index of Biotic Integrity (P-IBI) values show a significant positive correlation with the Water Quality Index (WQI) values ($P < 0.05$), and the evaluation of the water ecological health status of Lhalu Wetland based on P-IBI is closely consistent with the results of WQI evaluation. Dissolved oxygen (DO) is the main water environmental factor affecting the water ecological health status of Lhalu Wetland ($P < 0.05$), and temperature, water volume, human activities, and land use types are 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" increases as the water ecological health status of Lhalu Wetland declines. In summer, the ecological health status of the water body has little relationship with the changes in the abundance of functional groups. In autumn, the increase in the abundance of functional groups "III" and "VII" is significantly associated with the decline in the ecological health status of the water body.

Key words: 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之内的海岸与河口、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]。其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,降解及过滤空气和水体中的污染物,从而提高城市空气和水环境质量,有效的改善城市生态环境^[2-4]。然而,随着城市的发展和人口的增加,使得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、生物多样性程度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,分析其主要的的环境因子,提高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,2003年Dekeyser和Karr^[10]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十分重要的作用,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^[21]等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)是一种综合几个水质参数的检验结果,用来反映水质的一个无量纲数值,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主要污染因子,定量评价水体污染的程度^[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,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的积极作用^[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],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居于城市内部等^[30],这些特征对于探讨浮游植物生物完整性指数(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、水质指数(WQI)和浮游植物完整性指数(P-IBI)对其进行生态健康状况评估,以期对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(91°03'49"~91°06'51"E, 29°39'46"~29°41'06"N)位于拉萨市城区的西北方向,东西长,南北短,平均海拔高度达3645 m,总面积1220 hm²^[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,西面则以当热路和与北面高山的交接处为终点,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),各点的基本信息见附表I,分别于2021年7月(夏季)、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。

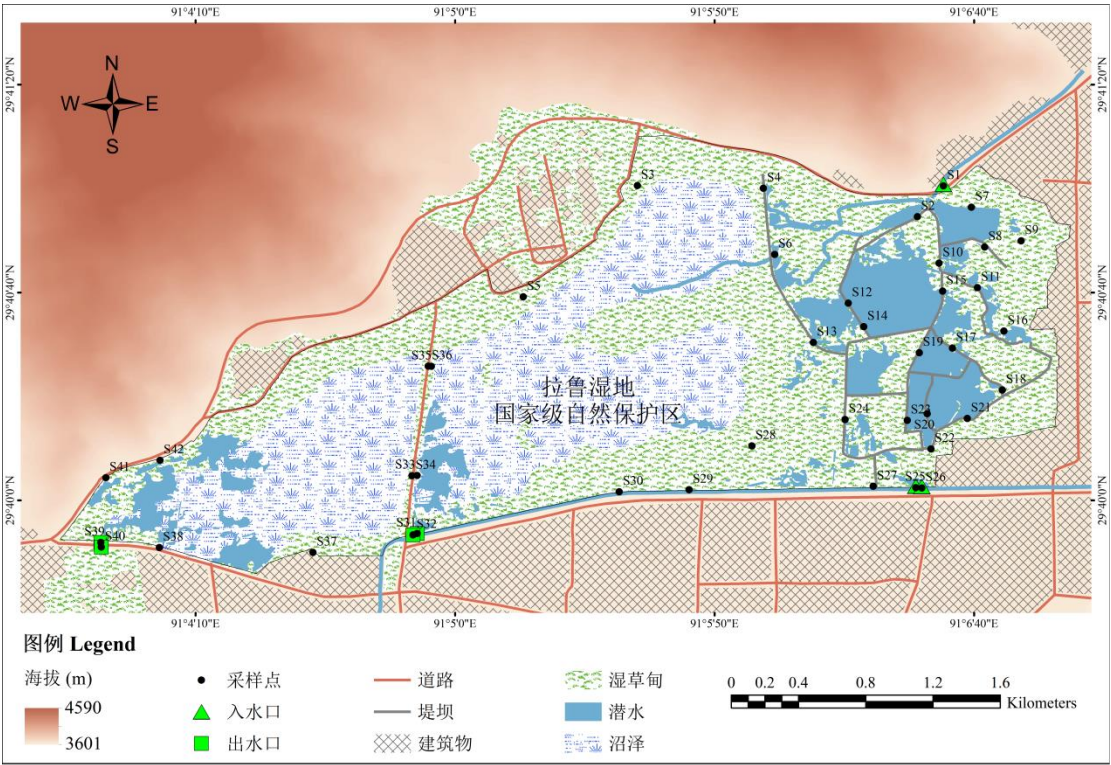


图1 拉鲁湿地采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lhalu Wetland

1.2 样品采集与处理

1.2.1 浮游植物的样品采集、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0.5m处作“∞”型捞取8~10min,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 0.5m 处采集 1L 混合水样，现场立即用 15 mL 鲁哥氏碘液固定，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的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^[9]，其将浮游植物种类划分为 7 个类群（I、II、III、IV、V、VI和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）测得溶解氧（DO）；使用 HI98703 微电脑多量程浊度测定仪（HANNA，意大利）测得浊度（TUR）；使用 HI83399 水质检测仪（HANNA，意大利）测定氨氮（NH₄⁺-N）；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 the parameters

变量 Variables	权重 Weight (<i>P_i</i>)	归一化因子 Normalization factor (<i>C_i</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	1	<750	<1000	<1250	<1500	<2000	<2500	<3000	<5000	<8000	≤12,000	>12,000
DO	4	≥7.5	>7	>6.5	>6	>5	>4	>3.5	>3	>2	≤1	<1
TUR	2	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<40	<60	<80	≤100	>100
TDS	2	<100	<500	<750	<1000	<1500	<2000	<3000	<5000	<10,000	≤20,000	>20,000
NH ₄ ⁺ -N	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

基于浮游植物的生物完整性指数的构建主要分为：参照点与受损点的确定、候选指标的筛选和选择、P-IBI 指数的计算和体系构建等步骤。

1.4.1 参考点的选取 综合参考程帅^[41]与冯治远^[42]等人的划分方法，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，并且水质指数（WQI）大于 80 的点位作为参照点，其余点位作为受损点。

1.4.2 候选指标的筛选和选择 在参照浮游植物完整性指数相关研究的基础上^[19,20]，结合本研究中拉鲁湿地的浮游植物群落特征，尽可能全面的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。若箱体无重叠，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；各自中位线都在对方箱体范围之内，IQ=0。对于 IQ≥2 的候选参数进行 pearson 相关性分析，对于两参数间|*r*|>0.75 的，认为二者显著相关，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 浮游植物完整性指数 (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, 按照上述的方法进行参数分值的计算, 分值分布在 0 ~ 1, 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 4 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 metries 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
Number	Index	Unit	Describe	Response to interference
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	硅藻门物种数百分比	%	硅藻门物种数/藻类总物种数*100%	减小
M7	蓝藻门物种数百分比	%	蓝藻门物种数/藻类总物种数*100%	减小
M8	绿藻门物种数百分比	%	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	浮游植物总密度	cells/L	藻类的总细胞数	增大
M14	硅藻门密度百分比	%	硅藻门的细胞数/藻类的总细胞数*100%	增大
M15	蓝藻门密度百分比	%	蓝藻门的细胞数/藻类的总细胞数*100%	增大
M16	绿藻门密度百分比	%	绿藻门的细胞数/藻类的总细胞数*100%	增大
M17	蓝藻门+绿藻门密度占比	%	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	硅藻门生物量百分比	%	硅藻门生物量/藻类总生物量*100%	增大
M24	蓝藻门生物量百分比	%	蓝藻门生物量/藻类总生物量*100%	增大
M25	绿藻门生物量百分比	%	绿藻门生物量/藻类总生物量*100%	增大
M26	蓝藻门+绿藻门生物量百分比	%	蓝藻门+绿藻门总生物量/藻类总生物量*100%	增大
M27	运动性硅藻密度百分比	%	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 ArcGIS10.8 软件绘制拉鲁湿样点分布图及水生态健康评价结果图, 反距离权重插值法绘制水质指数 (WQI) 时空分布图。利用 Excel2016 软件统计浮游植物物种数、细胞丰度和生物量, 利用 R4.1.3 软件计算多样性指数, SPSS25.0 软件对浮游植物生物完整性指数候选指标进行相关性分析, 浮游植物生物完整

性指数（P-IBI）候选指标过程中的箱体图、MBFG 功能群组成、P-IBI 值与环境因子相关性以及 P-IBI 与 MBFG 功能群的相关性分析利用 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

拉鲁湿地不同时期水体 WQI 值的时空分布如图 2 所示。各采样点平均 WQI 值中，春季值最大，为 85.61 ± 6.62 ，夏季值最小，为 74.56 ± 7.84 ，秋季值中等，为 77.89 ± 9.07 ，水质评价等级均达到“中等”及以上，从季节整体水质看，春季水质优于秋季优于夏季。从样点分布看，三个季节 WQI 值均表现出在湿地东北部 and 西南部偏低、中东部偏高，春季拉鲁湿地 WQI 值由东向西递减，夏季和秋季的变化几乎一致，从东至西呈现出先降低后升高再降低的趋势。

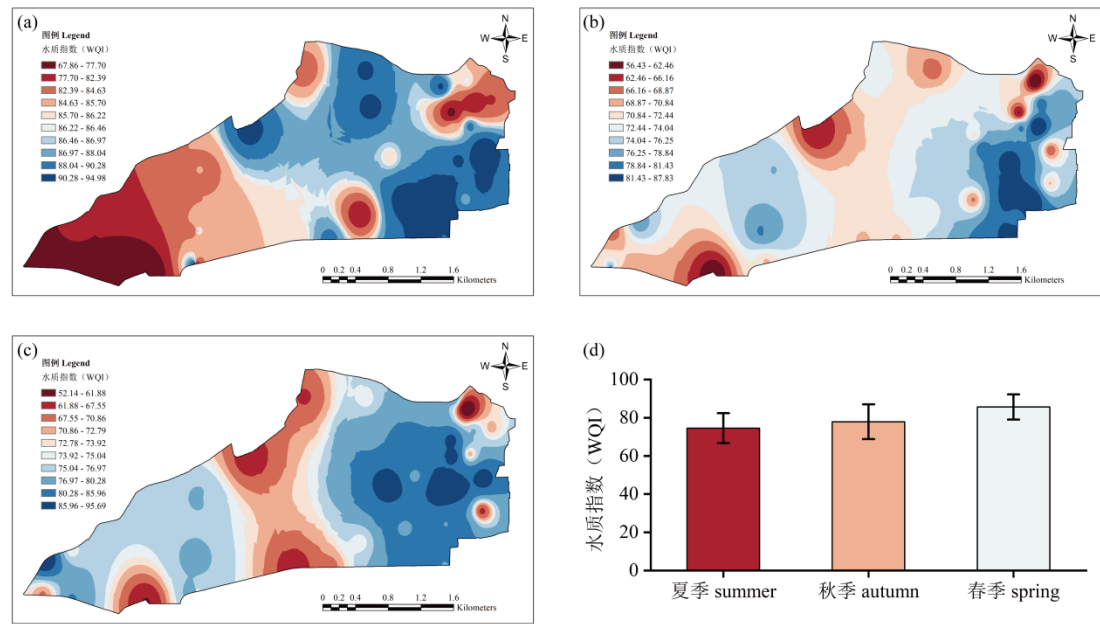


图 2 拉鲁湿地 WQI 值时空分布 (a.春季; b.夏季; c.秋季; d.季节平均 WQI 值)

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

2.2 浮游植物 MBFG 功能群组成

将浮游植物丰度按功能群分组统计，绘制三个季节各点位丰度百分比堆积图（图 3）。三个季节均以“VI”类功能群占主导地位，总细胞丰度在春季达到最大 ($544.16 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)，夏季最小 ($259.78 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)；“II”类功能群在三个季节中占的比例均最小，分别为春季 0.20%、夏季 1.15%、和秋季 0.49%；“V”类功能群秋季占比最高，丰度也达到最大；春季和夏季，藻类密度总体较低，但“IV”和“VII”类功能群丰度占比增大，“I”和“V”类功能群在各点的丰度占比有所下降。三个季节中“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，而占比最多的“VI”类功能群在西部占比较少。

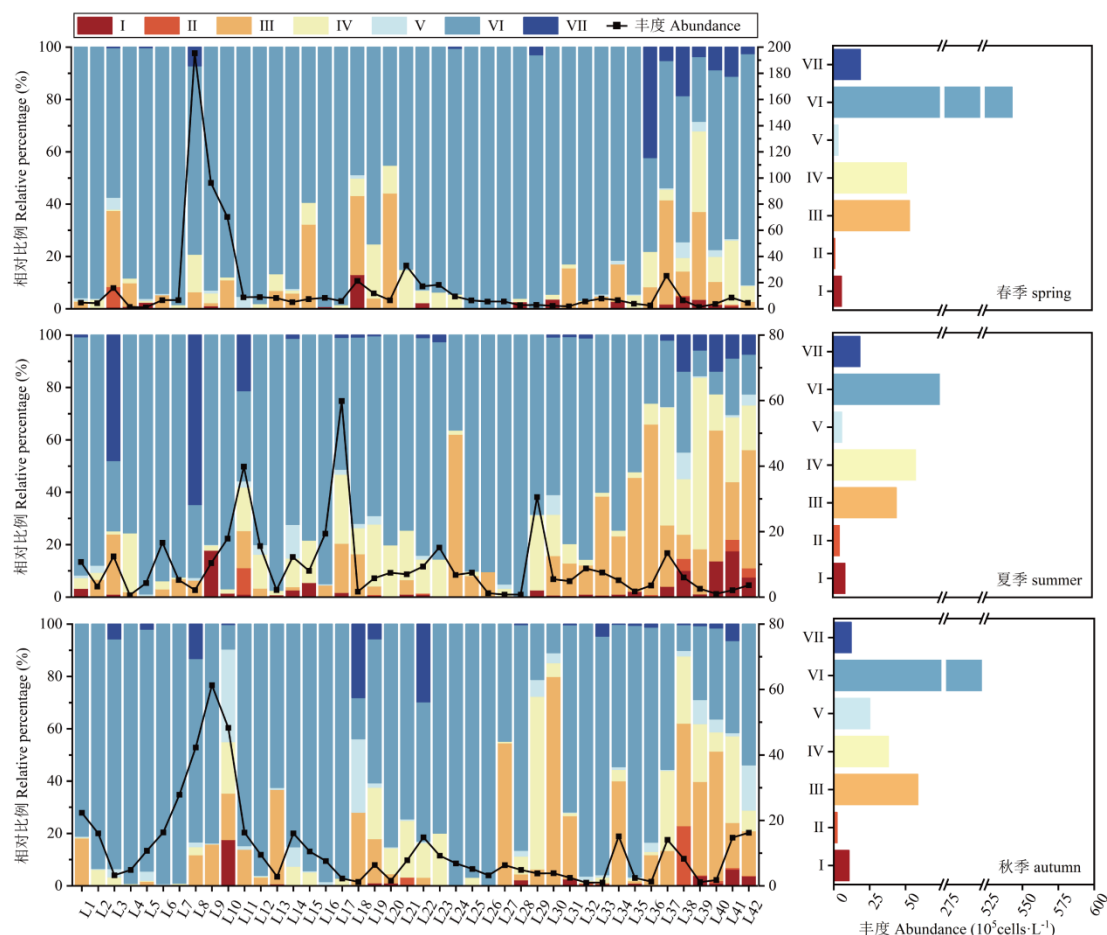


图3 拉鲁湿地 MBFG 功能群组成

Fig.3 Composition of MBFG of phytoplankton in Lhalu Wetland

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, 三个季节筛选出符合标准的生物参数各 7 个, 春季: M5、M6、M8、M9、M14、M16、M17, 夏季: M2、M5、M8、M11、M16、M21、M25, 秋季: M14、M15、M17、M20、M23、M24、M26 (图 4a、图 4b、图 4c)。分别对三个季节筛选出的候选指标进行 Pearson 相关分析 (表 3、表 4、表 5), 对于两个指标间相关系数 $|r|$ 大于 0.75 的, 优先保留信息含量大的指标, 剔除其中一个候选指标。最终确定春季 P-IBI 指标体系由 M9、M16、M17 共 3 个指标构成; 夏季 P-IBI 指标体系由 M11、M21、M25 共 3 个指标构成; 秋季 P-IBI 指标体系由 M15、M20、M23 共 3 个指标构成。

2.3.3 指数的计算和体系构建 根据比值法的计算公式, 通过计算, 将筛选所得的各核心指标计算分值加和, 即获得 P-IBI 值。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 4 等分, 确定 P-IBI 指标体系评分标准 (表 6)。

表 3 春季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab.3 Pearson correlation analysis of candidate indicators during spring season							
	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 4 夏季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab.4 Pearson correlation analysis of candidate indicators during summer season							
	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 5 秋季候选指标的 Pearson 相关分析

Tab.5 Pearson correlation analysis of candidate indicators during autumn season							
	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 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

2.3.4 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，健康状态为“健康”的样点占 73.8%，“亚健康”的样点占 16.7%，“一般”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，健康状态为“健康”的样点占 71.4%，“亚健康”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，健康状态为“健康”的样点占 76.2%，“亚健康”的样点占 21.4%，“一般”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 ~ 一般，从三个季节平均 P-IBI 值看，春季优于秋季优于夏季，中东部样点普遍优于西南部和东北部。

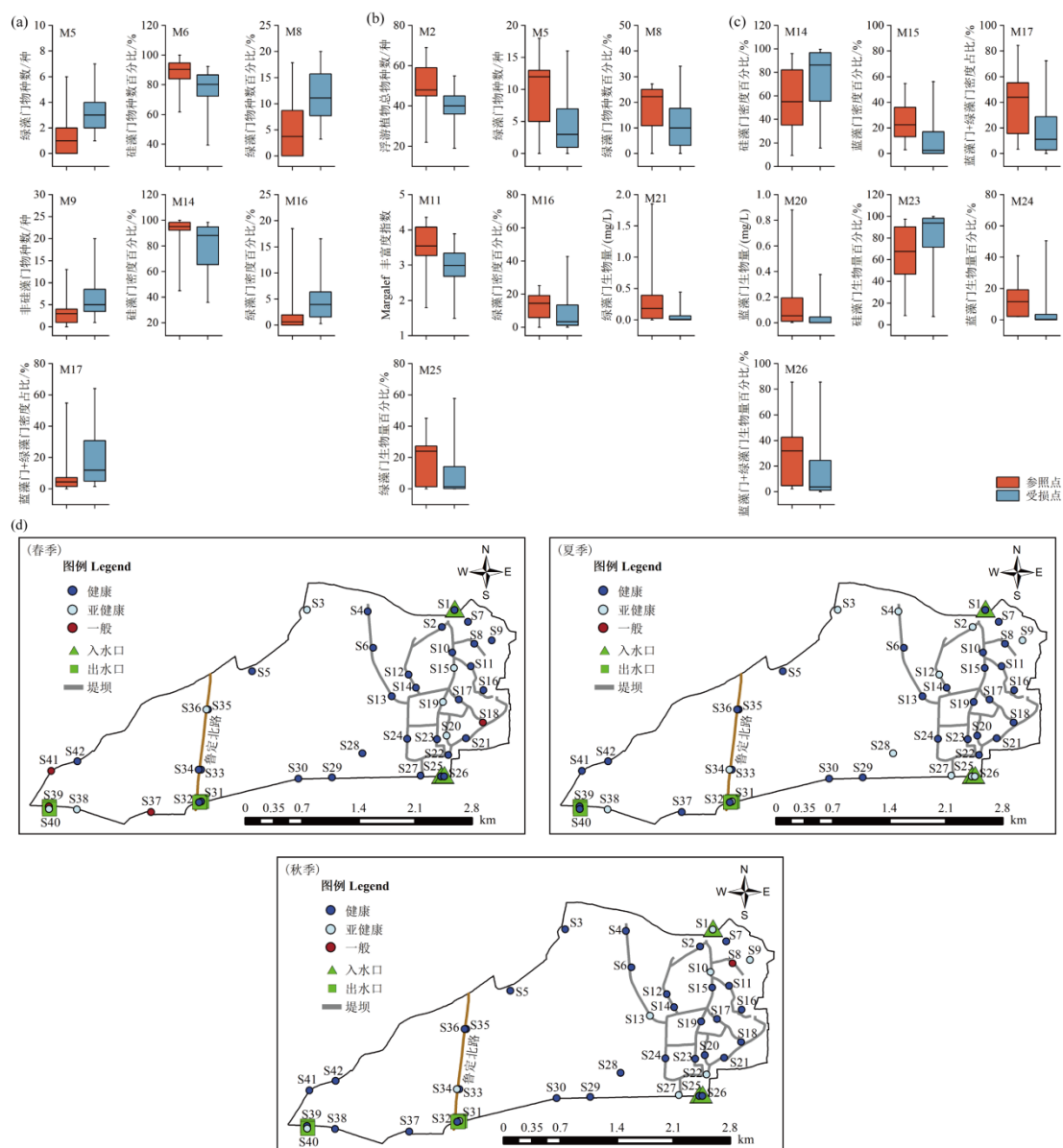


图 4 候选指标的筛选结果 (a.春季; b.夏季; c.秋季) 和拉鲁湿地水生态健康评价 (d)

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

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 ($P < 0.05$), 其它水环境因子与 P-IBI 值均无显著相关性 ($P > 0.05$)。

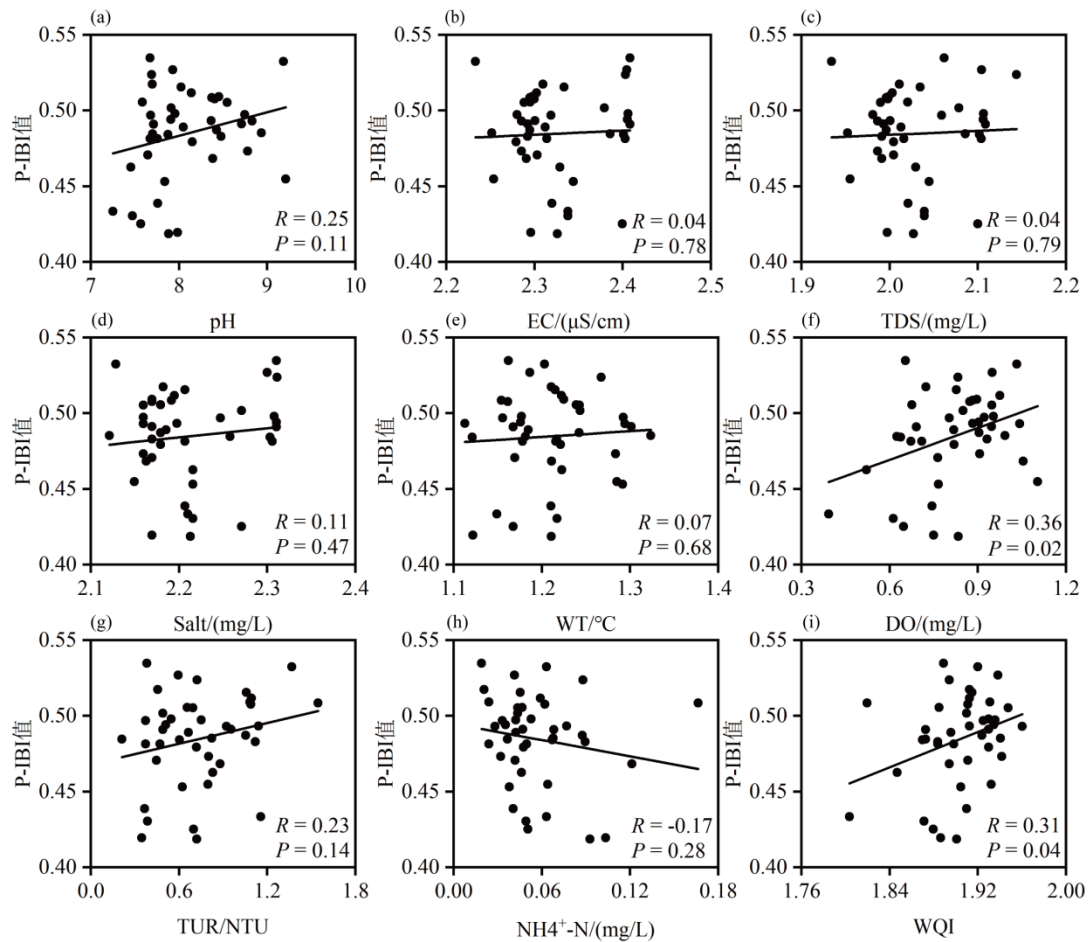


图5 拉鲁湿地 P-IBI 值与环境因子、WQI 值相关性

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

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”类功能群丰度均呈现极显著负相关（ $P < 0.01$ ）；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”类功能群丰度呈现极显著负相关（ $P < 0.01$ ），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。

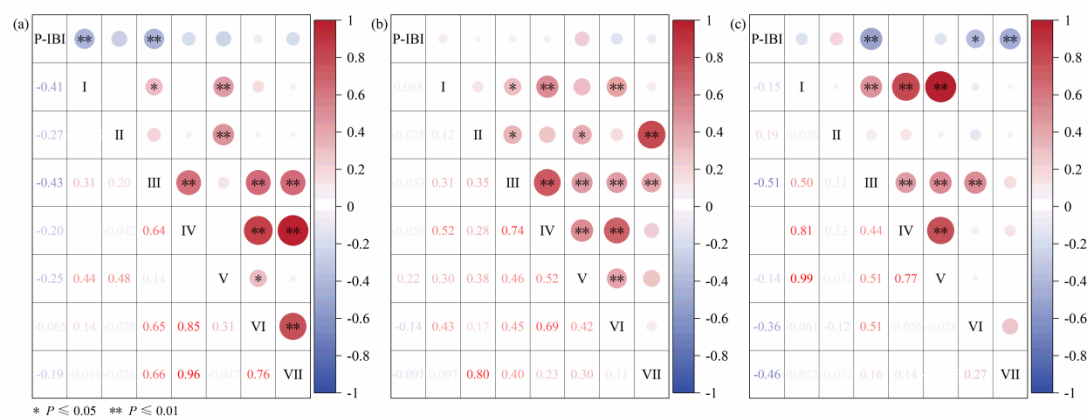


图6 拉鲁湿地 P-IBI 值与 MBFG 功能群相关性 (a.春季; b.夏季; c.秋季)

Fig.6 Correlation between P-IBI values and MBFG of phytoplankton in Lhalu Wetland (a. spring; b. summer; c. autumn)

3 讨论

3.1 基于 WQI 值的水质时空变化特征

拉鲁湿地的水体水质指数 (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。从季节性变化看: 春季的平均 WQI 值最高, 达到 85.61, 表明春季是一年中水质相对较好的季节。夏季的平均 WQI 值最低, 为 74.56, 这可能与夏季较高的温度和人类活动有关, 导致水质相对较差^[24]。秋季的 WQI 值处于两者之间, 为 77.89, 显示出一个中等水平的水质状况。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”及以上水平, 说明拉鲁湿地的整体水质状况是可观的。春季有最多的“极好”点, 这可能与春季特有的环境因素及人为因素有关, 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。从空间分布看: 湿地东北部和西南部的 WQI 值偏低, 而中东部的 WQI 值偏高, 这可能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, 这可能与春季特有的水文循环模式有关; 而夏季和秋季的 WQI 值变化趋势几乎一致, 从东至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的差异。夏季的水质相对较差, 可能需要更多的关注和管理措施。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的保护和管理, 以提高这些区域的水质。

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”状态。春季的健康状态分布显示, 有部分样点处于“亚健康”和“一般”状态, 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“一般”, 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剧等。秋季: P-IBI 值平均为 1.98, 与夏季相比略有上升, 这可能表明湿地生态系统在秋季有所恢复。拉鲁湿地是典型的高寒城市湿地, 形成了一个低氧低温的环境, 此时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动态平衡, 群落结构趋于稳定, 并且水中溶解氧含量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^[51]和刘惠秋^[20]等人在雅鲁藏布江中上游以及中游地区利用浮游植物完整性指数进行了水生态健康评价, 评价结果均为春季优于夏季优于秋季, 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, 因此本文利用浮游植物完整性指数对拉鲁湿地的水生态健康评价也具有一定的可行性。中东部样点普遍优于西南部和东北部, 与水质指数 (WQI) 结果类似, 这可能与地理位置、水文条件、人类活动等多种因素^[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, 从而支持了更好的生态健康状态; 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, 西南部及东北部则紧邻居民地, 造成拉鲁湿地西南部和东北部湿地生态健康状态较差, 南部和北部虽然距离居民地也很近, 但是南居民地与拉鲁湿地之间有中干渠作屏障, 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, 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再到一般的趋势。春季的平均 P-IBI 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, 直到第二年 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。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态的季节性和空间性分析,我们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 值与溶解氧 (DO) 水平呈正相关($P < 0.05$),这一发现表明,较高的溶解氧水平与湿地生态系统的健康状态密切相关^[55]。溶解氧是水生生态系统中一个重要的指标,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溶解氧水平对于维护湿地生态健康至关重要。此外, P-IBI 值与水质指数 (WQI) 也呈现出显著的正相关关系 ($P < 0.05$)。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,低温的环境造成溶解氧和水质状况是影响湿地生态健康的主要因素,而其他监测的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,我们建议湿地管理者应当重视溶解氧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。未来的研究可以进一步探索未发现显著相关性的水环境因子在特定条件下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,未来的研究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提供了对湿地生态系统季节性变化和生物群落结构的深入了解。研究表明,“VI”类功能群更适宜在温度偏低的水体中生长,这也符合拉萨市地处高原地区,全年平均气温较低的特征^[59]。春季的总细胞丰度最高,达到 $544.16 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,而夏季的丰度最低,为 $259.78 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能与温度、光照和营养盐的季节性变化有关^[59]。“II”类功能群在三个季节中所占比例最小,这可能意味着这类功能群在拉鲁湿地内对环境条件更为敏感,或者在湿地生态系统中扮演着特殊的角色。

“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,这些条件可能更有利于“V”类功能群的生长^[22]。夏季和春季“IV”和“VII”类功能群的丰度占比增大,而“I”和“V”类功能群的占比有所下降,这可能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”类功能群在西部的占比较少,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]。

三个季节 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,这可能与季节性环境变化有关。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 与浮游植物形态功能类群相关性分析, 秋季与“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 功能类群的划分, “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, 这两类功能群的浮游植物耐高温和高光强, 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。春季是许多水生生态系统生物活动开始活跃的时期, 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。秋季的环境条件变化可能对“VII”类功能群的生存和繁衍造成压力, 这种负相关性可能与秋季特有的环境因素有关, 如温度下降、光照减少或营养盐的可用性变化。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 功能群结构变化, 揭示其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

我们的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等提供一定的理论依据。基于 WQI 值评价拉鲁湿地水质总体“良好 ~ 中等”, 水体质量存在时空差异: 春季优于秋季优于夏季, 东部优于西部。基于 P-IBI 值评价拉鲁湿地三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优于夏季, 中东部样点普遍优于西南部和东北部。拉鲁湿地浮游植物生物完整性指数 (P-IBI) 值与水质指数 (WQI) 值呈现出显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 基于 P-IBI 评价拉鲁湿地水生态健康状态与 WQI 评价结果接近一致, 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关联。

基于研究结果, 我们建议政府部门制定相关的法律法规, 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, 并在湿地内部实施湿地缓冲区, 减少污染物直接进入湿地。同时制定适应性管理策略, 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. DOI: CNKI:SUN:STXZ.0.2007-04-018. [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. DOI: CNKI:SUN:DLJX.0.2008-04-003. [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: 10.3969/j.issn.1009-6094.2012.04.032. [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. DOI: 10.13718/j.cnki.xdsk.2024.04.013. [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, Tian J *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. *Geospatial analysis and modelling of urban structure and dynamics*, 2010: 251-64.
- [6] Chui BS, Yang ZF. Temporal-spatial scale characteristic of wetland ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, (1): 121-125. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2002.08.009. [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,

(1): 121-125.]

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

[8] Liu YS, Cai X, Yao CS. Summary of Evaluation on Urban Freshwater Ecosystem Services. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(25): 13936-13939. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.25.013. [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): 21-7. DOI: 10.1577/1548-8446(1981)006<0021:AOBIUF>2.0.CO;2.

[10] DeKeyser 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, (6): 1481-1490. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.06.037. [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, (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(06): 1677-1691. DOI: 10.5846/stxb201102090159. [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(06): 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. *Journal of Lake Sciences*, 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 SC *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. Seasonal Substitution Characteristics and Driving Factors of Phytoplankton Dominant Functional Groups in Taiyangshan Wetland. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(4): 133-146. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2023.04.13. [李霖, 赵睿智, 邱小琼. 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 the Phytoplankton Integrity Index and Evaluation of Aquatic Ecological Health in Mingcui Lake. *South-Central Agricultural Science*, 2024, 45(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, 45(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. [盛祥锐, 罗遵兰, 孙光等. 基于浮游植物的生物完整性指数开发与验证——以永定河北京段为例. 环境科学学报, 2024, 44(2): 489-500.]

[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. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2023.215. [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 VL, Peeters ET *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater biology*, 2010, 55(3): 614-27. 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. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 11-23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5427.2015.01.002. [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, Lv 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 2079-2086. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201906.030. [朱忆秋, 吕俊, 李乔臻等. 亚热带水库浮游植物群落的变化及其与环境的关系: 两种功能群分类法的比较. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2079-2086.]
- [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*, 1-13 [2024-08-31]. DOI: 10.13227/j.hjxx.202309174. [徐若诗, 逢勇, 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*, 1-13 [2024-08-31].]
- [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. DOI: 10.19501/j.cnki.1006-2009.2021.04.007. [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, Sao B, Zhuomaquxi *et al.* Analysis of Spatial-temporal Variation Characteristics and Pollution Source of Water Quality Comprehensive Conditions in Lhalu Wetland, Tibet. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(12): 67-74+78. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.12.018. [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.* Pollution Indicator Species of Phytoplankton and Water Quality Assessment in the Lhalu Wetland, Tibet China. *Xizang Science and Technology*, 2023, 45(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, 45(4): 13-22.]
- [29] Yan ZQ, Li Y, Zhang KR *et al.* PSR Model-based Evaluation on the Ecosystem Health of Lhalu Wetland in Tibet. *Wetland Science & Management*, 2023, 19(4): 49-53. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3290.2023.04.10. [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. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.17.003. [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. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2): 403-417. 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, Liu D. 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: Ecological Archives E095-257. *Ecology*, 2014, 95(10): 2984-2984. DOI: 10.1890/14-0603.1.
- [38] Kocer MA, 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): 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(02): 54-60. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2021.02.012. [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 mainstream based on benthic macroinvertebrate index of biological integrity. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(02): 512-529. 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): 512-529.]
- [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 Y, Ban X, Li E *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] Zang 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. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.02.012. [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] 马芋芋. 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. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(01): 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.hjlx.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 H, 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(08): 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2024.S1.037. [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*, 1-15[2024-09-01]. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202404160132. [李伟, 杨岷园, 熊健等. 西藏雅尼湿地水质评价及污染源分析. 水生生态学杂志, 1-15[2024-09-01].]
- [59] Liu L, Zhu Y, Li BT *et al.* Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG. *Water*

Resources Protection, 2020, 36(4): 13-20. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.003. [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 Water Source Ecological Purification System. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1265-1275. DOI: 10.13227/j.hjlx.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] Padišák 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): 1-9. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.

[62] Rangel LM, Soares MC, 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. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4436-4443. DOI: 10.13227/j.hjlx.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. *Journal of Lake Sciences*, 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 YT, 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. DOI:10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0446. [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.]