

基于浮游植物的城市湖泊生态健康评价 ——以长江下游铜陵市西湖为例*

王芳^{1,2}, 李永吉³, 马廷婷², 陈辉辉², 王晓龙², 李宽意^{2**}, 吴召仕^{2**}

(1: 桂林理工大学旅游与风景园林学院, 桂林 541004)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 湖南省岳阳市农业科学院水产研究所, 岳阳 414000)

摘要: 为了解铜陵西湖浮游植物群落结构与水生态健康状况, 于2016年9月至2017年7月进行6次调查. 结果显示: (1) 浮游植物共检出6门88种, 总密度变化范围为 $8.20 \times 10^5 \sim 1.60 \times 10^8$ cells/L, 均值为 2.19×10^7 cells/L, 生物量变化范围为1.34~27.76 mg/L, 均值为9.45 mg/L, 优势种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、浮游蓝丝藻(*Planktothrix* sp.) 和微囊藻(*Microcystis* sp.); (2) RDA分析表明浮游植物生物量主要受水温、悬浮物、总氮、亚硝态氮和总磷影响; (3) 浮游植物隶属于22组功能群, 基于功能群的Q指数表明, 铜陵西湖水质整体处于“中等”状态, 7月水生态状况最差, 11月最佳; (4) 依据候选参数与环境因子的相关性, 最终选定生物量、密度和Margalef指数来构建铜陵西湖浮游植物生物完整性指数(P-IBI), 其评估结果与Q指数呈显著正相关, 但P-IBI评估结果(整体为“较差”状态)更为严格. 本研究阐述铜陵西湖浮游植物群落结构特征, 并基于浮游植物Q指数和P-IBI评估其生态健康状况, 相关研究结果可为其水环境管理及城市湖泊生态健康评估提供一定的科学参考.

关键词: 浮游植物; 功能群; 生物完整性指数; 铜陵西湖; 水生态状况评价

Ecological health assessment of urban lake based on phytoplankton—A case study of Lake Xihu, Tongling, lower reaches of the Yangtze River*

Wang Fang^{1,2}, Li Yongji³, Ma Tingting², Chen Huihui², Wang Xiaolong², Li Kuanyi² & Wu Zhaoshi^{2**}

(1: College of Tourism & Landscape Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Fisheries Research Institute, Yueyang Academy of Agricultural Sciences in Hunan Province, Yueyang 414000, P.R.China)

Abstract: In order to establish phytoplankton community structure and assess ecological condition in Lake Xihu (Tongling), 6 times of sampling were conducted from September 2016 to July 2017. A total of 88 phytoplankton species from 6 phyla were identified. The phytoplankton density varied from 8.20×10^5 cells/L to 1.60×10^8 cells/L, and the mean was 2.19×10^7 cells/L. The biomass varied from 1.34 mg/L to 27.76 mg/L, with a mean of 9.45 mg/L. Phytoplankton were mainly dominated by *Microcystis aeruginosa*, *Planktothrix* sp. and *Microcystis* sp.. Phytoplankton biomass was mainly affected by water temperature, suspended solids, total nitrogen, nitrite, and total phosphorus. There were 22 functional groups were identified, and the Q index indicated that the lake was in moderate condition, with the worst and best ecological conditions in July and November, respectively. Three critical indices, i.e., biomass, density, and Margalef, were selected to establish the index of biotic integrity based on phytoplankton (P-IBI) of Lake Xihu, according to the correlations among indices and environmental parameters. Correlation analysis suggested that the P-IBI was significantly and positively correlated with the Q, while the ecological conditions were significantly worse according to the P-IBI (the overall state is low). This study established phytoplankton community structure in Lake Xihu (Tongling),

* 2021-12-19 收稿; 2022-03-27 收修改稿.

国家自然科学基金项目(31930074)和中国科学院科技服务网络计划重点项目(KFJ-STQ-QYZD-156)联合资助.

** 通信作者; E-mail: zswu@niglas.ac.cn.

and evaluated its ecological condition based on Q and P - IBI indices, which will provide a certain reference for its water environment management and ecological condition assessment of lake in urban.

Keywords: Phytoplankton; functional groups; index of biotic integrity; Lake Xihu; ecological condition assessment

由于自然过程、人类活动等原因,湖泊生态破坏日益加重,并出现了生态环境退化、生物多样性降低等问题,水生生态系统健康状况受到严重威胁^[1-2]. 因此,国内外均积极开展水域生态系统监测和健康评估工作^[3-5],但有关研究大多基于理化因子(如单因子和富营养化指数)以及水生生物多样性指数等^[6-7]. 与化学或物理指标相比,生物群落是对水体中各种物理、化学、生物因子的综合和直接反映,更能体现水生生态系统健康状况^[8-9]. 浮游植物作为水生生态系统的初级生产者,生活周期短且对水环境变化反应敏感,常被用于指示水生生态系统健康状况^[10].

根据浮游植物生理、形态和对环境响应机制等特征,Reynolds等^[11]和Padisák等^[12]共划分出39个功能群(function group, FG),各功能群反映特定的生境类型. 基于功能群,Padisák等提出 Q 指数来评估水生生态系统健康状况,并得到广泛应用^[13-14]. 如高国敬等^[15]指出相较于传统的卡尔森营养状态指数评价, Q 指数可以避免丰水期降雨带来的干扰,从而更为准确地评估海南省水库生态状态. 此外,多指标体系法也常用于评估水生生态系统健康状况^[16-17]. 其中,生物完整性指数(IBI)综合了多项群落结构指标,是多指标体系法的重要内容^[18]. IBI 首先以鱼类作为研究对象,而后应用到大型底栖无脊椎动物^[19-20]和附着藻类^[21]等. 近年来,研究者开始关注浮游植物生物完整性指数(P - IBI),如蔡琨等^[22]运用总分类单元数、硅藻门分类单元、Simpson指数等6个指标构建 P - IBI ,对太湖水生生态系统进行了评价.

由于生态系统的差异性,针对特定研究区域建立切实可行的评估体系显得尤为重要. 城市湖泊生态系统的自身独特性——水流缓慢、水容量小且自净能力差,使之难以确立未受干扰的参照点^[23],如何构建其生态健康评估体系仍需进一步研究. 铜陵西湖作为城市总体规划的基础,位于铜陵市西湖新区中央,环绕西湖规划有大型市级文化、体育运动场馆和行政办公场所^[24-26]. 由于受人类活动干扰较大,且有关的水生态状况资料极少,不利于铜陵西湖的生态健康评估和保护. 因此,本研究在确立铜陵西湖浮游植物群落结构现状的基础上,运用 Q 指数和 P - IBI 对其进行生态健康状况评估,以为相关城市湖泊的 P - IBI 构建以及生态健康评估、保护和修复等提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点布设

铜陵西湖湖区面积约1.61 km². 根据地形等特征,本研究在湖区共布设4个点位(图1),于秋(2016年9月和11月)、冬(2017年1月)、春(2017年3月和5月)、夏(2017年7月)四季开展6次水环境和浮游植物调查.

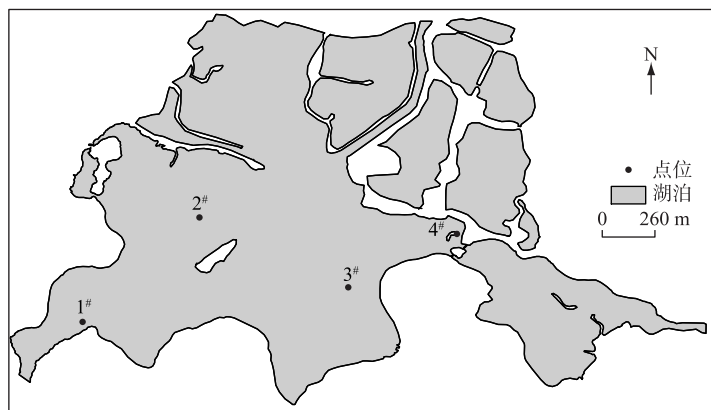


图1 铜陵西湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Xihu (Tongling)

1.2 样品采集与分析

现场使用多参数水质监测仪测定水体表层温度(WT)、电导率(Cond)、酸碱度(pH)、浊度(Tur)和溶解氧(DO),使用塞氏透明度盘测定水体透明度(SD),总氮(TN)、总磷(TP)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_3 -N)、悬浮颗粒物(SS)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})参照《水和废水监测分析方法》测定^[27],叶绿素 a (Chl. a)用热乙醇法测定^[28]。

浮游植物定量样品取混合水样 1 L,加入 1% 体积的鲁哥试剂固定,静置 48 h 后,浓缩定容至 30 mL,在光学显微镜下进行种类鉴定和计数。浮游植物种类鉴定参照《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[29]。每个样品计数重复 3 次,取其平均值(误差范围小于 $\pm 15\%$),生物量(Biomass)测定采用体积转化法。

1.3 功能群 Q 指数

Q 指数计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \cdot F_i \right) \quad (1)$$

式中, n 为浮游植物功能群的数量, N 为总生物量, n_i 为第 i 个功能群的生物量, F_i 为第 i 个功能群的赋值。依据 Q 指数将水生态健康状况划分为 5 个等级:0~1 为“极差”,1~2 为“较差”,2~3 为“中等”,3~4 为“良好”,4~5 为“优秀”^[13,30]。

1.4 浮游植物生物完整性指数

铜陵西湖 P - IBI 的建立分两步:构建和测试^[31],本研究将前 4 次和后 2 次数据分别用于 P - IBI 构建和测试。参照国内外 P - IBI 研究实例^[22,32-35],选取 25 个常用于反映浮游植物群落结构特征的指标作为候选参数。除 Biomass 和 Chl. a 外,其他参数均基于密度计算。基于累计决定系数(Cumulative_ R^2)和相关指数(CoI),确立构建 P - IBI 的核心生物参数^[8,36]。Cumulative_ R^2 和 CoI 分别如(2)和(3)所示。

$$\text{Cumulative}_R^2 = \sum_{i=1}^n r_{s,i}^2 \quad (2)$$

式中, $r_{s,i}$ 为候选参数和环境因子 i 之间的 Spearman 相关系数, n 为环境因子的数量。

$$\text{CoI} = \frac{(\text{Cumulative}_R^2 \cdot S)}{n^2} \quad (3)$$

式中, S 为 $P < 0.05$ 的 $r_{s,i}$ 数量。Cumulative_ R^2 的范围为 0~ n ,CoI 值范围为 0~1,数值越大,代表候选参数与环境因子的相关性越高。

此外,本文还通过计算营养硅藻指数(TDI)^[37]、种群质量指数(QGS)^[38]、蓝藻指数(CyI)^[39]、运动性硅藻百分比(PMD)^[40]和综合营养状态指数(TLI)^[41]来验证所构建 P - IBI 的适用性。 P - IBI 核心参数均进行 1~5 的标准化,其均值即为最终的 P - IBI 得分。 P - IBI 等级划分标准同 Q 指数^[42-43]。

1.5 数据分析

浮游植物群落与环境因子的冗余分析使用 R 4.0.3 完成,由程序包 vegan 实现。单因素方差分析由 SPSS 22.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 理化因子与浮游植物群落结构特征

2.1.1 理化因子 铜陵西湖水体呈弱碱性,TN 月均值变化范围为 3.89~6.16 mg/L,而 TP 月均值介于 0.13~0.30 mg/L 之间。与 TP 一致, COD_{Mn} 均值在 2017 年 7 月最高,2016 年 11 月最低。 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 月均值范围分别为 0.02~0.64 和 0.65~3.81 mg/L,两者均在 2017 年 5 月最高。 NO_3^- -N 和 Chl. a 月份均值范围分别为 0.51~4.03 mg/L 和 0.62~124.57 $\mu\text{g/L}$ 。空间上,各理化因子值差异均较小,其中 TN 浓度均值变化范围为 4.54~5.95 mg/L,在 1[#] 点位浓度最高,其次为 2[#] 点位。与 TN 一致,1[#] 和 2[#] 点位的 TP 浓度较高。

2.1.2 浮游植物种类组成 调查共发现浮游植物 88 种,隶属于 6 门 45 属。绿藻门种类最多,共有 35 种(39.77%);其次是裸藻门(26.14%);蓝藻门和硅藻门各发现 12 种和 11 种;隐藻门和甲藻门种类数均较少,共占总种类数的 7.95%。优势种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、浮游蓝丝藻(*Planktothrix* sp.) 和微囊

藻 (*Microcystis* sp.), 优势度分别为 0.13、0.044 和 0.035。

2.1.3 浮游植物密度和生物量时空变化 时间上,浮游植物总密度和蓝藻密度均在 2017 年 7 月最高,分别为 8.63×10^7 和 8.51×10^7 cells/L(图 2A),最低值分别为 1.13×10^6 和 2.16×10^5 cells/L,且均出现在 2016 年 11 月。此外,蓝藻对 2016 年 9 月和 2017 年 5 月的总密度贡献同样较大,相对密度分别为 83.51% 和 63.89%。隐藻相对密度在 2017 年 1 月超过 80%。裸藻和甲藻密度均在 2017 年 3 月最高。与密度不同,生物量最高值出现在 2017 年 3 月,为 19.60 mg/L(图 2B)。裸藻是引起总生物量时间差异的主要原因,其次是蓝藻和甲藻。

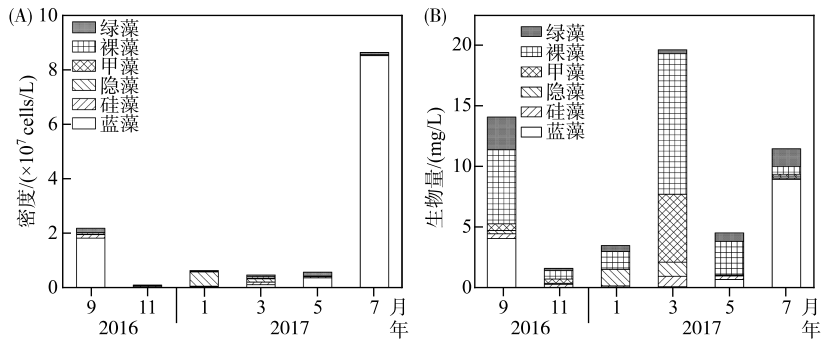


图 2 铜陵西湖浮游植物密度(A)和生物量(B)时间变化

Fig.2 Temporal variations of phytoplankton density (A) and biomass (B) in Lake Xihu (Tongling)

空间上,浮游植物密度最高值出现在 1[#] 点位 (4.60×10^7 cells/L),且多个门类密度均在该点位最高,最低值出现在 4[#] 点位(图 3A)。浮游植物平均生物量为 9.11 mg/L,最高值和最低值同样分别出现在 1[#] 点位 (12.50 mg/L) 和 4[#] 点位 (7.86 mg/L,图 3B)。密度方面,蓝藻占绝对优势,相对密度为 65.58%~79.69%。裸藻对生物量的贡献较大,相对生物量为 37.97%~49.47%。

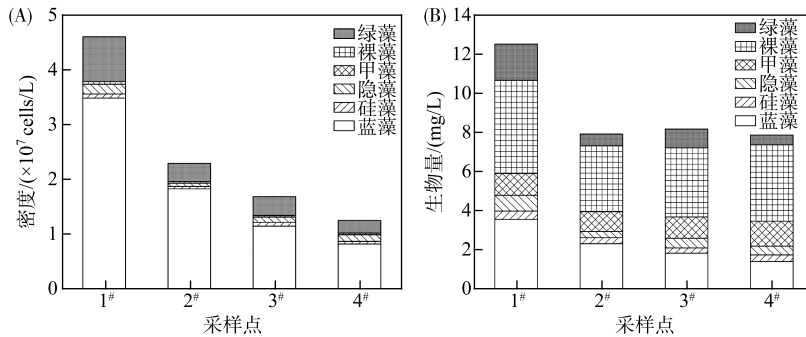


图 3 铜陵西湖浮游植物密度(A)和生物量(B)空间变化

Fig.3 Spatial variations of phytoplankton density (A) and biomass (B) in Lake Xihu (Tongling)

2.1.4 浮游植物功能群组成 铜陵西湖浮游植物可归纳为 22 组功能群,通过频率分析,功能群 B、J、L₀、M、P、S₂、W₁、X₁、Y 的出现频率均大于 50%,为常见功能群;功能群 D、G、MP、S₁、W₂、X₂ 的出现频率均为 20%~50%,仅出现在其适宜的生态环境;功能群 L_m、N、T、TC 的出现频率均小于 5%,为罕见功能群。

2.1.5 功能群时空变化 选择相对生物量超过 5% 的浮游植物功能群为该时期的优势功能群,超过 50% 为绝对优势功能群。优势功能群随时间演替趋势为:W₁+S₂+G(2016 年 9 月)→W₁+L₀+P+Y(2016 年 11 月)→W₁+Y+P+X₂(2017 年 1 月)→W₁+L₀+Y(2017 年 3 月)→W₁+S₂+J+W₂(2017 年 5 月)→M+S₂+G(2017 年 7 月)(图 4A)。功能群 W₁ 基本占据优势地位,且在 2017 年 3 月和 5 月占绝对优势,相对生物量分别达到 59.2% 和 53.8%。

空间上, W1、S2、M、L₀、Y、G 和 H1 为优势功能群, 功能群 W1 是各点位的主要优势类群(图 4B), 相对生物量介于 36.8%~46.9%之间, 主要代表性藻属为裸藻属、鳞孔藻属和扁裸藻属。

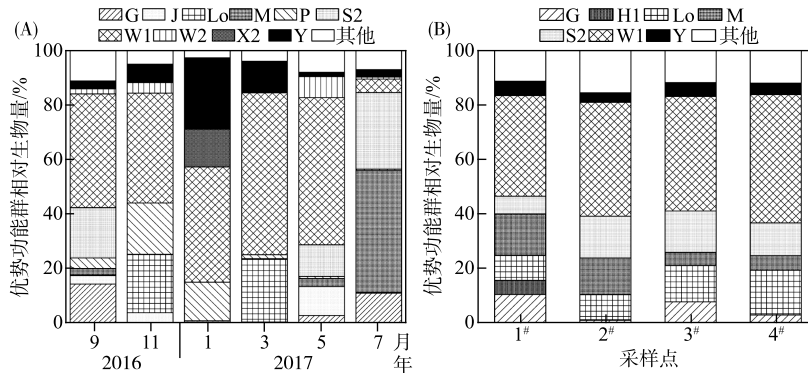


图 4 浮游植物优势功能群相对生物量时间(A)和空间(B)变化
Fig.4 Temporal (A) and spatial (B) variations of relative biomass for phytoplankton dominant functional groups

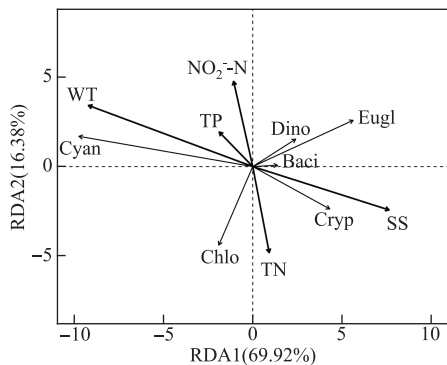


图 5 铜陵西湖浮游植物生物量与环境因子的 RDA 分析
(Cyan: 蓝藻门; Chlo: 绿藻门; Bacil: 硅藻门; Cryp: 隐藻门; Eugl: 裸藻门; Dino: 甲藻门)

Fig.5 RDA analysis of phytoplankton biomass and environment factors in Lake Xihu (Tongling)

2.2 浮游植物与环境因子的关系

选取铜陵西湖浮游植物各门类生物量及 14 个环境因子, 进行去趋势对应分析(DCA), 结果表明排序轴长度小于 3. 经 RDA 分析确定出具有显著解释性的环境因子为 WT、SS、TN、NO₂-N 和 TP(图 5). 第一、第二排序轴特征值分别为 0.1566 和 0.0367, 累计解释了 86.30% 的生物量信息. 此外, 第一排序轴与 SS、TN 呈正相关, 与 WT、NO₂-N、TP 呈负相关; 第二排序轴与 WT、NO₂-N、TP 呈正相关, 与 SS、TN 呈负相关。

2.3 水生态健康状况评价

2.3.1 功能群 Q 指数 从 Q 指数来看, 铜陵西湖整体处于“中等”状态. 时间上, Q 指数平均值变化范围为 1.27~3.18, 2017 年 5 月和 7 月 Q 指数较低, 为“较差”状态; 2016 年 11 月 Q 指数相对较高, 为“良好”状态(图 6A). 空间上, Q 指数介于 2.04~2.43 之间, 最低值出现在 1# 点位, 最高值出现在 3# 点位(图 6B).

2.3.2 P-IBI 指数 根据构建阶段的数据库, 分析本研究中 14 个环境因子之间的相关性, 结果表明各因子间无显著相关性, 因此均用于 Col 和 Cumulative_R² 计算中(表 1).

根据构建阶段的 Col 值排序, 选出前 10 个候选参数, 即 Biomass、Chl.a、物种丰富度(Species richness)、有效物种数(Hill N₀)、Kothe 指数、密度(Density)、Gleason 指数、Margalef 指数、Fisher 指数和 Odum 指数. 综合考虑这 10 个候选参数构建与测试阶段的 Col 和 Cumulative_R² 值, 选出排名前 5 的参数, 分别为 Biomass、Chl.a、Density、Margalef 指数和 Gleason 指数. Biomass 和 Chl.a 均代表生物量, 但前者的 Col 和 Cumulative_R² 值均高于后者. 此外, 虽然 Margalef 指数和 Gleason 指数的 Col 值和 Cumulative_R² 值一致, 但 Margalef 指数广泛用于生态状况评估. 因此, 本文最终选用 Biomass、Density 和 Margalef 指数构建铜陵西湖 P-IBI, 其标准化方法参考沈治蕊^[44]、况琪军^[10]和詹玉涛^[45]的评价标准(表 2). 与其他单项评估指标相比, P-IBI 的 Col 和 Cumulative_R² 值均远大于其它单项指标。

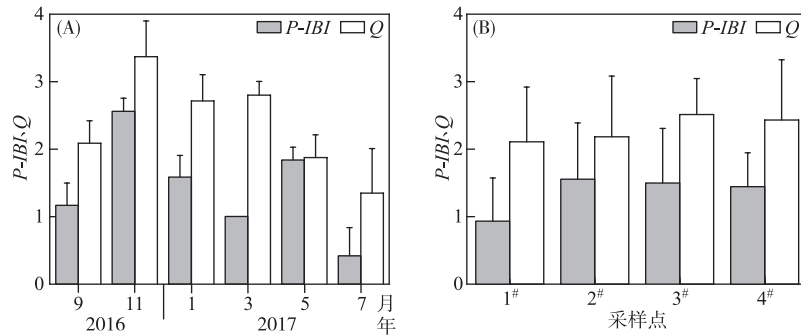


图 6 铜陵西湖 $P-IBI$ 和 Q 指数的时间 (A) 和空间 (B) 变化

Fig.6 Temporal (A) and spatial (B) variations of the $P-IBI$ and Q index in Lake Xihu (Tongling)

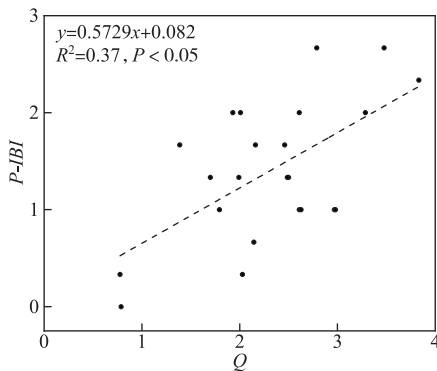
表 1 浮游植物生物完整性指数的候选参数和其它单项参数的相关系数 (CoI) 与 累计决定系数 ($Cumulative_R^2$)

Tab.1 The correlation index (CoI) and the $Cumulative_R^2$ values of selected and excluded indices for the phytoplankton index of biotic integrity ($P-IBI$) and other single indices

指标分类	候选参数	相关系数 CoI		累计决定系数 R^2		
		构建组	测试组	构建组	测试组	
筛选的参数	Biomass	0.117	0.221	3.838	6.188	
	Chl.a	0.037	0.365	2.396	7.152	
	Density	0.036	0.284	2.347	6.953	
	Margalef	0.035	0.201	2.304	6.551	
	Gleason	0.035	0.201	2.304	6.551	
	Fisher	0.035	0.201	2.271	6.551	
	Odum	0.008	0.275	1.497	6.739	
	Evenness E_3	0.003	0.282	0.679	6.920	
	McIntosh	0	0.271	0.810	6.642	
	Hill N_1	0.005	0.230	0.982	6.450	
	排除的参数	Shannon H	0	0.230	0.982	6.450
		Evenness E_4	0	0.230	0.982	6.450
		Brillouin	0	0.230	0.982	6.450
Evenness E_5		0	0.230	0.908	6.450	
Menhinick		0	0.222	0.990	6.214	
Species richness		0.037	0.075	2.389	4.868	
Hill N_0		0.037	0.075	2.389	4.868	
Kothe		0.037	0.075	2.389	4.868	
McNaughton		0	0.228	0.733	6.391	
Evenness E_1		0.003	0.262	0.634	6.431	
Hill N_2		0	0.214	0.810	5.980	
Simpson		0	0.214	0.810	5.980	
Hurbert		0	0.134	0.810	5.237	
Evenness E_2	0.004	0.094	0.810	4.622		
Berger-Parker	0	0.017	0.683	3.275		
$P-IBI$		0.135	0.375	3.780	7.343	
其他单项参数	TDI	0.065	0	2.551	1.112	
	CyI	0.048	0.257	2.329	6.292	
	TLI	0.031	0.364	2.043	7.134	
	QGS	0.015	0.013	1.426	2.506	
	PMD	0	0.015	1.134	2.965	

表2 用于 P - IBI 计算的参数标准化方法^[10,44-45]Tab.2 Normalization factors of the indices used in the calculation of the P - IBI ^[10,44-45]

	赋分	Biomass	Density	Margalef
对环境的响应方式		+	+	-
分值范围	5	<0.1	< 3×10^5	>5
	4	0.1~1	$3 \times 10^5 \sim 10^6$	4~5
	3	1~3	$10^6 \sim 9 \times 10^6$	3~4
	2	3~5	$9 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7$	2~3
	1	5~10	$4 \times 10^7 \sim 10^8$	1~2
	0	>10	> 10^8	<1

图7 铜陵西湖 P - IBI 与 Q 指数的相关关系Fig.7 Relationship between the P - IBI and Q index in Lake Xihu (Tongling)

从整体来看, P - IBI 均值为 1.38, 以“较差”状态为主(占有数据的 47.83%), 其次是“极差”状态. 2016 年 11 月 P - IBI 均值为 2.56, 水生态状态最佳(“中等”), 其他月份均处于“较差”或“极差”状态, 特别是 2017 年 7 月(均值为 0.42, 图 6A). 空间上, 1[#] 点位 P - IBI 均值为 0.93, 处于“极差”状态, 其他点位均处于“较差”状态(图 6B).

P - IBI 与 Q 指数呈显著正相关($r = 0.61$, $P < 0.05$; 图 7). 时间上, 两者均指示秋季(2016 年 11 月) 水生态状况最佳, 夏季最差. 空间上, 1[#] 点位 P - IBI 与 Q 指数均低于其他点位. 但是, 各点位和各月份的 Q 指数均值都高于相对应的 P - IBI 均值.

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征及驱动因子分析

浮游植物生长及群落结构演替主要受光照、温度、营养盐等影响^[46-47]. 浮游植物适宜的生长温度因种类而异, 一般情况下, 蓝藻、绿藻喜高温, 硅藻、隐藻嗜低温^[48]. 铜陵西湖浮游植物密度峰值出现在夏季, 水温较高造成浮游植物(特别是蓝藻) 较快生长. 最高生物量出现在春季(2017 年 3 月), 且在秋季(2016 年 9 月) 取得另一峰值, 这可能是由于该水体春秋季节适宜个体较大的裸藻和甲藻生长, 并成为优势种. 悬浮物通过降低水下光照条件, 阻碍光的传递, 间接影响浮游植物生长^[49-50]. 本研究中, 隐藻和裸藻生物量与 SS 呈正相关, 可能表明这两个门类对低光有一定的适应能力, 且悬浮物可能

会携带一定量的有机质, 从而促进其门类细胞的生长^[51]. 此外, 营养盐的不足或过量都会影响浮游植物的生长和群落结构^[52].

3.2 城市湖泊生态健康状况评价

湖泊生态健康评价方法主要分为两类: 生物监测法和多指标体系评价法^[16-17, 53]. 基于浮游植物, 本文选取 Q 指数, 并构建 P - IBI 评估体系, 通过这 2 种指数评估铜陵西湖生态健康状况. 基于浮游植物功能类群及其对环境响应机制特征等, Q 指数能较准确地评价水生态状况^[30]. P - IBI 代表了群落组成与结构, 能定量描述人类干扰与生物特性之间的关系, 包含多种对人类干扰敏感的一组生物指标, 并将其综合成一个数值^[54]. IBI 分为先验法和后验法^[55], 参照点的选择是先验法的核心, 但由于城市湖泊受人活动影响严重, 很难找到原始或未受干扰的区域作为参照点. 后验法通过对候选参数做多变量分析, 利用统计工具克服参照点的不足^[32, 55-57], 适用于城市湖泊等受人类干扰较大水体的生态健康状况评价.

本研究以铜陵西湖为例, 根据候选参数与环境因子的相关性, 选出 Biomass、Density 和 Margalef 指数作为核心参数. Biomass^[34, 58]、Density^[22, 32, 42] 和 Margalef 指数^[34, 42-43] 广泛用于 P - IBI 评价体系构建, 且常作为单项指标评价生态状况. P - IBI 评价结果显示, 铜陵西湖秋季(2016 年 11 月) 生态状况最佳而夏季最差, 这与 Q 指数评价结果一致. 此外, P - IBI 与 Q 指数呈显著正相关, 在一定程度上说明浮游植物可以有效用于铜陵西湖生态健康状况评估. 但在时空尺度上, P - IBI 均低于 Q 指数, 表明其评价结果更为严格. 时间上, 两者变化趋势的差异主要表现在 2017 年 3 月, P - IBI 和 Q 指数均值分别为 1.00 和 2.80, 主要由于 2017 年 1-3 月总生物量急剧升高, 其中, 隶属于赋分较高的功能群 L_0 和 $W1$ 相对生物量分别增加了 22.93% 和 16.99%, 导致

P-IBI 降低而 *Q* 指数升高。

当前,我国城市湖泊的健康评价多集中于水质和水生生物多样性指标^[55]。以 TN、TP 和 COD_{Mn} 为主要评价指标,铜陵西湖依次处于劣 V 类、V ~ 劣 V 类、III ~ 劣 V 类水质,与前人研究结果基本一致^[25-26]。然而,从 DO 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 来看,铜陵西湖水质分别处于 I ~ III 类和 III ~ 劣 V 类,各指标评价结果差异较大。从 3 种常见的多样性指数来看,Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数均值依次为 1.59、0.94 和 0.58,分别表明铜陵西湖处于中污染、重污染和轻污染状态。时间上,单一指数间的评估结果跨度也较大,以 11 月为例,上述 3 种指数依次显示铜陵西湖处于清洁、中污染、重污染。由此可见,单一水质和多样性指标无法准确评估铜陵西湖的生态状况。此外,李茜等^[59]研究表明,单因子评价法中各因子互不联系,无法全面反映水体状况。顾毓蓉等^[55]研究也指出,由于生物多样性忽略了不同物种对干扰的耐受性和生态保守性,无法真实反映城市湖泊的生物完整性。因此对于城市湖泊,应综合考虑水生生物的多项指标,构建合理的评估体系,从而较为准确地反映其水生态健康状况。

4 结论

本文以铜陵西湖为例,利用浮游植物评价其生态健康状况。结果表明,浮游植物密度和生物量均值分别为 2.19×10^7 cells/L 和 9.45 mg/L,WT、SS、TN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 TP 是影响生物量的主要环境因子。基于功能群的 *Q* 指数表明,铜陵西湖整体处于“中等”状态。*P-IBI* 由 Biomass、Density 和 Margalef 指数构成,其与 *Q* 指数均可有效评估铜陵西湖生态健康状况,但 *P-IBI* 结果(整体为“较差”状态)更为严格。时间上,两者均表现出秋季(2016 年 11 月)水生态健康状况最佳,而夏季最差。空间上,*P-IBI* 与 *Q* 指数均在 1# 点位最差(“中等”状态)。

5 参考文献

- [1] Ho JC, Michalak AM, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670. DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7.
- [2] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI:10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [3] Romero E, le Gendre R, Garnier J *et al.* Long-term water quality in the lower Seine; Lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environmental Science & Policy*, 2016, **58**: 141-154. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.01.016.
- [4] Wu ZS, Lai XJ, Li KY. Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu Basin (China) using water quality index. *Ecological Indicators*, 2021, **121**: 107021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107021.
- [5] Tan Q, Ma QQ, Li BB *et al.* Ecological health assessment of the upper reaches of the Yangtze River, based on biotic integrity index of phytoplankton. *Freshwater Fisheries*, 2017, **47**(3): 97-104. [谭巧, 马芊芊, 李斌斌等. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康. 淡水渔业, 2017, **47**(3): 97-104.]
- [6] Thakur RK, Jindal R, Singh UB *et al.* Plankton diversity and water quality assessment of three freshwater lakes of Mandi (Himachal Pradesh, India) with special reference to planktonic indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(10): 8355-8373. DOI: 10.1007/s10661-013-3178-3.
- [7] Liu LF, Zhou XH, Gao J *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Dajiuhe wetland of Shennongjia Alpine. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 417-430. DOI: 10.18307/2018.0213. [刘林峰, 周先华, 高健等. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 417-430.]
- [8] Wu NC, Schmalz B, Fohrer N. Development and testing of a phytoplankton index of biotic integrity (*P-IBI*) for a German lowland river. *Ecological Indicators*, 2012, **13**(1): 158-167. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.05.022.
- [9] Wang BX, Yang LF, Liu ZW. Index of biological integrity and its application in health assessment of aquatic ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(6): 707-710. [王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价. 生态学杂志, 2006, **25**(6): 707-710.]
- [10] Kuang QJ, Ma PM, Hu ZY *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(2): 87-91. [况琪军, 马沛明, 胡征宇等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.]

- [11] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.
- [12] 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.
- [13] Padisák J, Borics G, Grigorszky I *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the water framework directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 1-14. DOI: 10.1007/s10750-005-1393-9.
- [14] Zhang H, Peng YQ, Zou XN *et al.* Characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 380-392. [张辉, 彭宇琼, 邹贤妮等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系. 中国环境科学, 2022, **42**(1): 380-392.]
- [15] Gao GJ, Xiao LJ, Lin QQ *et al.* Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 144-150. [高国敬, 肖利娟, 林秋奇等. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价. 生态科学, 2013, **32**(2): 144-150.]
- [16] Tang T, Cai QH, Liu JK. River ecosystem health and its assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(9): 1191-1194. [唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 2002, **13**(9): 1191-1194.]
- [17] Zhao YW, Yang ZF. River health: Concept, assessment method and direction. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(1): 119-124. [赵彦伟, 杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向. 地理科学, 2005, **25**(1): 119-124.]
- [18] Zhao GN, Pan BZ, Li Y *et al.* Research progress on phytoplankton and periphyton ecology of the waterbodies in the Loess Plateau. *Sichuan Environment*, 2021, **40**(3): 235-240. [赵耿楠, 潘保柱, 李艳等. 黄土高原水体浮游藻类与着生藻类生态研究进展. 四川环境, 2021, **40**(3): 235-240.]
- [19] Wang BX. Water quality bioassessment using benthic macroinvertebrates [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. [王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究 [学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2003.]
- [20] Huang Q, Gao JF, Cai YJ *et al.* Development and application of benthic macroinvertebrate-based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 649-659. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.09.014.
- [21] Kireta AR, Reavie ED, Sgro GV *et al.* Planktonic and periphytic diatoms as indicators of stress on great rivers of the United States: Testing water quality and disturbance models. *Ecological Indicators*, 2012, **13**(1): 222-231. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.06.006.
- [22] 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.]
- [23] Xiao XY, Long WW, Liu ZW *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environmental factors in typical landscape lakes of Ji'an, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(4): 934-941. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201604.005. [肖小雨, 龙婉婉, 柳正葳等. 吉安地区典型景观湖泊浮游植物群落特征及其与水环境因子的关系. 生态学杂志, 2016, **35**(4): 934-941.]
- [24] Zhu GJ, Tian ZH. Planning practice of green ecological urban area: A study on the planning of West Lake in Tongling New Area. *Construction Technology*, 2014, (24): 61-64. [朱根节, 田中华. 绿色生态城区规划实践——铜陵西湖新区规划编制研究. 建设科技, 2014, (24): 61-64.]
- [25] Wang CF, Wu JH. Current situation of water environment quality of Lake West wetland park in Tongling. *Technological Innovation and Application*, 2016, (26): 150. [王朝飞, 吴建华. 铜陵西湖湿地公园水环境质量现状. 科技创新与应用, 2016, (26): 150.]
- [26] Zhong JW, Wu H, Chen YS. Research on urban wetland ecological restoration strategies based on collaborative development—A case study of west lake wetland park in Tongling. *Chinese Landscape Architecture*, 2020, **36**(7): 93-98. DOI: 10.19775/j.cla.2020.07.0093. [钟嘉伟, 吴韩, 陈永生. 基于协同发展为导向的城市新区湿地生态修复策略研究——以铜陵西湖城市湿地公园为例. 中国园林, 2020, **36**(7): 93-98.]
- [27] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Water and wastewater monitoring and analysis methods: 4th edition. Beijing: China Envi-

- ronmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [28] Chen YW, Chen KN, Hu YH. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 550-552. DOI:10.18307/2006.0519. [陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.]
- [29] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [30] 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.]
- [31] Sang C. Water quality assessment of the Irtysh River in Xinjiang Uygur Autonomous region based on the water quality index (WQI) and the indices of biotic integrity(periphyton and zoobenthos) [Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. [桑轸. 基于水质指数与生物完整性指数(周丛藻类和底栖动物)的新疆额尔齐斯河水质评价[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2020.]
- [32] Wu ZS, Kong M, Cai YJ *et al.* Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 395-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.216.
- [33] Xiao SS, Hao YB, Liu JD *et al.* Aquatic ecological health assessment of Qiantang River Basin in Zhejiang Province by phytoplankton index of biotic integrity. *Fisheries Science*, 2021, **40**(5): 740-749. [肖善势, 郝雅宾, 刘金殿等. 应用生物完整性指数评价钱塘江流域——浙江段水生态系统健康. 水产科学, 2021, **40**(5): 740-749.]
- [34] Wang X, Guo KJ, Li XX *et al.* Construction of phytoplanktonic index of biotic integrity and evaluation of water ecological health in Dianshan Lake, China. *Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences*, 2021, **50**(1): 39-49. [王霞, 郭凯娟, 李晓旭等. 淀山湖浮游植物生物完整性指数的构建及水生态健康评价. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2021, **50**(1): 39-49.]
- [35] Spatharis S, Tsirtsis G. Ecological quality scales based on phytoplankton for the implementation of Water Framework Directive in the Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(4): 840-847. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.01.005.
- [36] Blanco S, Bécares E, Cauchie HM *et al.* Comparison of biotic indices for water quality diagnosis in the Duero Basin (Spain). *River Systems*, 2007, **17**(3/4): 267-286. DOI: 10.1127/lr/17/2007/267.
- [37] Kelly MG, Whitton BA. The Trophic Diatom Index: A new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology*, 1995, **7**(4): 433-444. DOI: 10.1007/BF00003802.
- [38] Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, Sommer U. Assessing ecological water quality of freshwaters: PhyCoI—A new phytoplankton community Index. *Ecological Informatics*, 2016, **31**: 22-29. DOI: 10.1016/j.eCoInf.2015.11.004.
- [39] Mischke U, Venohr M, Behrendt H. Using phytoplankton to assess the trophic status of German rivers. *International Review of Hydrobiology*, 2011, **96**(5): 578-598. DOI: 10.1002/iroh.201111304.
- [40] Wang X, Zheng BH, Liu LS *et al.* Water quality evaluation of Dongting Lake based on algae integrity index. Proceeding of 2015 annual academic meeting of Chinese society of Environmental Sciences(Volume I), 2015: 1577-1584. [汪星, 郑丙辉, 刘录三等. 基于藻类完整性指数的洞庭湖水质评价. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷), 2015: 1577-1584.]
- [41] Wu J, Jin WL, Chen KL. Analysis of eutrophication characteristics and its main control factors of Lake Yangcheng. *Environmental Protection Science*, 2021, **47**(2): 86-91. [武瑾, 金文龙, 陈亢利. 阳澄湖水体富营养化特征及其主控因子分析. 环境保护科学, 2021, **47**(2): 86-91.]
- [42] Li JP, Dong SK, Liu SL *et al.* Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 316-324. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.029.
- [43] 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.
- [44] Shen ZR, Bian XH, Zhao Y *et al.* Taiping Lake in Xuyuan Park, Nanjing: Eutrophication, treatment & prevention. *J Lake*

- Sci, 1997, **9**(4): 377-380. DOI:10.18307/1997.0415.[沈治蕊, 卞小红, 赵燕等. 南京煦园太平湖富营养化及其防治. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 377-380.]
- [45] Zhan YT, Yang CS, Fan ZN *et al.* Study on interrelation between distribution of phytoplankton and water pollution in Fuxi River. *China Environmental Science*, 1991, **11**(1): 29-33. [詹玉涛, 杨昌述, 范正年. 釜溪河浮游植物分布及其水质污染的相关性研究. 中国环境科学, 1991, **11**(1): 29-33.]
- [46] Zhang X, Yi QT, Xie K *et al.* Nutrient kinetics of dominant species of phytoplankton in the artificial lakes formed from land subsidence by mining activities in the Huainan coalmine subsidence areas. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 713-722. DOI: 10.18307/2018.0313. [张鑫, 易齐涛, 谢凯等. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物优势种的营养动力学. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 713-722.]
- [47] Liu XH, Zhao XX, Gao P *et al.* Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure(2010) in Lake Caizi, Anhui Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 771-779. DOI:10.18307/2012.0519.[刘雪花, 赵秀侠, 高攀等. 安徽菜子湖浮游植物群落结构的周年变化(2010年). 湖泊科学, 2012, **24**(5): 771-779.]
- [48] Ma BS, Xu B, Wei KJ *et al.* Phytoplankton community structure and its relation to environmental conditions in the middle Anning River, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3332-3341. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.030. [马宝珊, 徐滨, 魏开金等. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3332-3341.]
- [49] Dokulil MT, Padisák J. Long-term compositional response of phytoplankton in a shallow, turbid environment, neusiedlersee (Austria/Hungary). *Hydrobiologia*, 1994, **275/276**(1): 125-137. DOI: 10.1007/BF00026705.
- [50] Wu ZS, Cai YJ, Liu X *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.06.008.
- [51] Wang YL, Yao HL, Wu NW *et al.* Phytoplankton and organic-detritus in high-output fish ponds with black carp as the major cultured species. *Journal of Fisheries of China*, 1994, **18**(4): 297-304. [王友亮, 姚宏禄, 吴乃薇等. 主养青鱼高产池塘的浮游植物和有机碎屑. 水产学报, 1994, **18**(4): 297-304.]
- [52] Ma CX, Yu HX. Phytoplankton community structure in reservoirs of different trophic status, Northeast China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, **31**(3): 471-481. DOI: 10.1007/s00343-013-1264-6.
- [53] Li B, Yang GS, Wan RR. Progress on evaluation methods of lake ecosystem health. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, **34**(6): 98-106. [李冰, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展. 水利水电科技进展, 2014, **34**(6): 98-106.]
- [54] Riato L, Leira M, Della BV *et al.* Development of a diatom-based multimetric index for acid mine drainage impacted depressional wetlands. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 214-222. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.181.
- [55] Gu YR, Xue QJ, Wan X *et al.* Aquatic ecosystem state evaluation based on *P-IBI* factor analysis in Songya Lake after ecological restoration. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, **26**(6): 1325-1334. [顾毓蓉, 薛庆举, 万翔等. 基于 *P-IBI* 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况. 应用与环境生物学报, 2020, **26**(6): 1325-1334.]
- [56] Li MM, Luo X, Fu JX *et al.* Study on phytoplanktonic index of biotic integrity (*P-IBI*) assessment for marine ecosystem health: A case of beibu gulf. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(6): 113-121. [黎明民, 骆鑫, 付家想等. 基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价. 中国环境监测, 2018, **34**(6): 113-121.]
- [57] Hu J, Shen Q, Chen MX *et al.* Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(10): 3759-3769. [胡俊, 沈强, 陈明秀等. 基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价. 生态学报, 2019, **39**(10): 3759-3769.]
- [58] 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.]
- [59] Li Q, Zhang JH, Lin LY *et al.* Review on methods of water environmental quality assessment. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, (19): 285-287, 290. [李茜, 张建辉, 林兰钰等. 水环境质量评价方法综述. 现代农业科技, 2011, (19): 285-287, 290.]