

基于浮游植物完整性指数的阳澄湖生态健康状态评价*

张顺婷 刘凌[#] 黄艳芬 姜丰
(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要 为探究在以中华绒螯蟹养殖为主的情况下阳澄湖浮游植物群落结构与湖泊生态系统健康状态,于 2022 年 7 月(夏)和 12 月(冬)进行 2 次浮游植物样品采集和水环境因子测定,构建浮游植物完整性指数(P-IBI)体系,评价阳澄湖健康状况。结果表明:P-IBI 评价显示阳澄湖夏、冬季的健康状态分别为一般、健康状态;夏季健康状况从优至劣依次为东湖、西湖、中湖,冬季则为西湖、中湖、东湖。P-IBI 与透明度、流速、硝态氮、总氮呈极显著正相关($P < 0.01$),与 pH、水温、磷酸盐、叶绿素 a 和高锰酸盐指数呈极显著负相关($P < 0.01$)。水环境因子直接或间接驱动了浮游植物群落结构和生物完整性的变化。

关键词 阳澄湖 浮游植物 功能群 浮游植物完整性指数 健康评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.02.012

Ecological health status evaluation of Yangcheng Lake based on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI)
ZHANG Shunting, LIU Ling, HUANG Yanfen, JIANG Feng. (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098)

Abstract: In order to establish phytoplankton community structure and assess ecological health in Yangcheng Lake, where stocked densely with Chinese mitten crab, 2 times of phytoplankton sampling and water environmental factors measuring were conducted in July (summer) and December (winter) 2022. A preliminary phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) was developed to evaluate the health of Yangcheng Lake. Results showed that P-IBI evaluation showed the health status of Yangcheng Lake in summer and winter was average and healthy, respectively. In summer, the health status in descending order was east lake, west lake, and central lake, while in winter it was west lake, central lake, and east lake. P-IBI was significantly positively correlated with transparency, flow rate, nitrate nitrogen, and total nitrogen ($P < 0.01$), and negatively correlated with pH, water temperature, phosphate, chlorophyll-a, and permanganate index ($P < 0.01$). The variation of phytoplankton community structure and biotic integrity were driven directly or indirectly by water environmental factors.

Keywords: Yangcheng Lake; phytoplankton; functional groups; phytoplanktonic index of biotic integrity; health assessment

湖泊作为陆地表层系统各要素相互作用的节点^[1],具有提供水源、养殖水产、维护生物多样性等生态功能。随着人类活动的加剧,水质恶化及水生植被退化导致湖泊生态系统服务价值迅速降低^[2]。浮游植物调查有利于富营养化评价和控制,而浮游植物生物完整性指数(P-IBI)是评价湖泊健康状况的重要手段,其有效解决了以往单纯利用理化指标表征水环境健康状况的局限性^[3]。

基于 P-IBI 的湖泊水生生态健康评价在国内已有诸多报道^[4-5],但多以林氏分类法作为浮游植物的划分依据,P-IBI 与功能群相结合的研究鲜有报道。功能群划分法综合考虑了浮游植物的形态、生态及

生理特征,能直观反映特定环境下最能适应环境选择压力且最具资源竞争优势的种类^[6],在识别浮游植物对环境因子的响应上较林氏分类法更具优势^[7]。

阳澄湖系古太湖残留,以水草为水生植物优势种,是长江下游地区典型的浅水草型湖泊^[8]。近年来,淡水虾蟹的高密度网围养殖加速了湖泊富营养化。为探究该湖在中华绒螯蟹养殖为主情况下浮游植物群落结构及生态系统健康状态,本研究基于 2 个季节的监测数据构建 P-IBI,对阳澄湖的水生态状况进行评价,以期对阳澄湖富营养化治理及水质提升方面提供参考依据。

第一作者:张顺婷,女,1999 年生,硕士研究生,研究方向为生态水文与水环境保护。[#] 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.52170160、No.51879085)。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

综合阳澄湖的地形特征、围网养殖情况及出入湖河流分布,全湖布设了 16 个采样点(见图 1),其中西湖 5 个(Y1~Y5)、中湖 5 个(Y6~Y10)、东湖 6 个(Y11~Y16)。

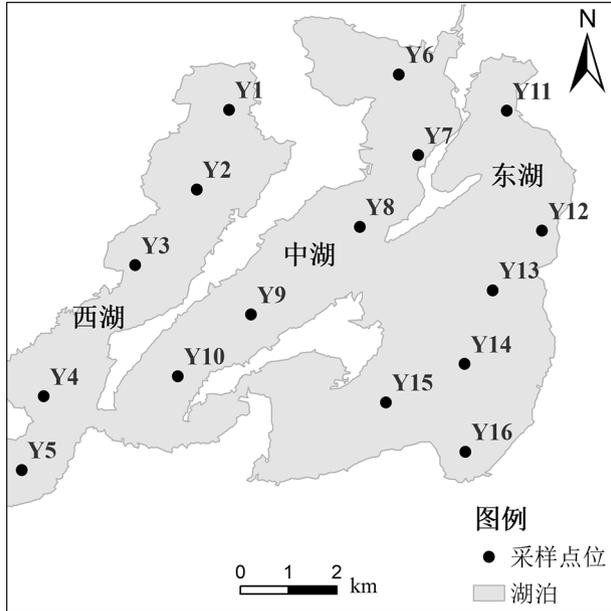


图 1 阳澄湖采样点布设

Fig.1 Layout of sample sites in the Yangcheng Lake

1.2 样品采集与测定

于 2022 年 7 月(夏季)和 12 月(冬季)进行 2 次采样。现场采用 YSI 6600 V2 多参数水质检测仪测水温、pH、溶解氧(DO)、电导率(EC)、总溶解固体(TDS),LGY-II 流速仪测流速(FV),塞氏盘测透明度(SD)。采用热乙醇萃取分光光度法测定叶绿素 a(Chl.a)。参照文献[9]测定总磷(TP)、磷酸盐、氨氮、硝态氮、总氮(TN)和高锰酸盐指数。浮游植物通过光学显微镜鉴定并计数,鉴定种类参考文献[10]、[11]。

1.3 数据处理及分析

1.3.1 综合营养状态指数(TLI)评价

以 Chl.a 浓度作为基准参数,选取 TP、TN、SD 和高锰酸盐指数为附加环境参数,运用 TLI 法对阳澄湖水体营养状况进行评价。TLI 根据 5 个参数的营养状态指数乘以各自的权重后求和得出,计算公式详见文献[12]。湖泊营养状态分级规定:TLI \leq 30 为贫营养;30<TLI \leq 50 为中营养;50<TLI \leq 60 为轻度富营养;60<TLI \leq 70 为中度富营养;TLI>70 为重度富营养。

1.3.2 数据处理

地图使用 ArcMap 10.4 绘制;非参数检验、单因素方差分析及 Spearman 相关性分析等借助 IBM SPSS Statistics 27 处理,设定差异极显著($P < 0.01$)、差异显著($P < 0.05$);其他图表利用 Excel 2016 统计。

2 结果与分析

2.1 阳澄湖水环境因子特征

由表 1 可见,阳澄湖夏季水温、pH、磷酸盐、TP、Chl.a 和高锰酸盐指数均大于冬季,SD、硝态氮和 TN 呈现出夏季低、冬季高的特征。空间分布上,夏季西湖、东湖水温差异显著,DO 差异极显著,中湖、东湖高锰酸盐指数差异显著,TP 差异极显著;冬季西湖、中湖 Chl.a 差异显著,西湖、东湖的 SD、磷酸盐、硝态氮和 TN 差异显著,西湖、东湖和西湖、中湖的 DO 均差异极显著。阳澄湖夏、冬季 TLI 均值分别为 57.90、49.11,分别处于轻度富营养、中营养状态。

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物种类组成及功能群划分

此次季节性调查共鉴定出浮游植物 8 门 104 属 289 种,其中绿藻门(Chlorophyta)以 41 属 114 种占绝对优势(占 39.4%),其余依次为硅藻门(Bacillariophyta)29 属 61 种(占 21.1%)、裸藻门(Euglenophyta)5 属 56 种(占 19.4%)、蓝藻门(Cyanophyta)11 属 24 种(占 8.3%)、金藻门(Chrysophyta)8 属 13 种(占 4.5%)、甲藻门(Pyrophyta)5 属 10 种(占 3.5%)、隐藻门(Cryptophyta)2 属 8 种(占 2.8%)和黄藻门(Xanthophyceae)3 属 3 种(占 1.0%),浮游植物群落结构为绿-硅-裸藻型。根据 PADISÁK 等[13]提出的功能群划分方法将阳澄湖浮游植物归入 28 组功能群,其中 B、C、D、E、F、G、H1、J、LM、Lo、M、MP、N、P、Q、SN、T、Tc、W1、W2、WS、X1、X2、X3 和 Y 为两季共同出现的功能群,H2、K 和 S2 为夏季丰水期特有。

2.2.2 阳澄湖优势功能群的季节演替

将至少在 1 个采样点相对丰度>5%的功能类群定义为优势功能群[14],筛选出 16 组优势功能群(B、E、F、G、H1、J、Lo、M、MP、N、P、Tc、W1、X1、X2 和 Y)。优势功能群在时空分布上的差异主要表现在相对丰度变化上,其总体演替趋势为 M/Lo/H1(夏) \rightarrow P/MP/X1(冬)。夏季功能群 M、Lo 和 H1 分别占 25.87%、19.11%和 18.63%;冬季功能群 P、MP 和 X1 分别占 20.82%、19.48%和 10.82%。单

表 1 阳澄湖水环境因子季节变化
Table 1 Seasonal variation of water environmental factors in Yangcheng Lake

季节	湖区	pH	DO/(mg/L)	TDS/(mg/L)	水温/°C	EC/(μS/cm)	SD/m	FV/(m/s)
夏季	阳澄湖	8.88±0.26	6.16±3.11	209.86±21.14	33.79±0.84	422.63±50.64	0.30±0.11	0.01±0
	西湖	8.92±0.28	2.90±0.84	222.00±21.90	34.22±0.26	443.80±44.02	0.26±0.13	0.01±0
	中湖	8.98±0.19	6.85±3.14	210.98±14.08	34.10±1.16	432.60±57.25	0.28±0.13	0.01±0.01
	东湖	8.77±0.29	8.31±1.96	198.82±22.44	33.17±0.49	396.67±46.52	0.35±0.08	0.01±0
冬季	阳澄湖	8.16±0.15	6.66±0.96	216.38±9.86	7.18±1.13	434.38±20.33	0.50±0.31	0.04±0.01
	西湖	8.13±0.17	7.73±0.67	213.60±8.73	7.42±1.73	428.40±17.37	0.79±0.35	0.04±0.01
	中湖	8.24±0.18	6.56±0.56	212.20±6.42	6.92±0.77	424.80±12.28	0.41±0.19	0.04±0
	东湖	8.10±0.10	6.01±0.56	220.43±11.46	7.26±0.86	443.71±23.44	0.39±0.22	0.04±0
季节	湖区	磷酸盐/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	氨氮/ (mg/L)	硝态氮/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	高锰酸盐指数/ (mg/L)	Chl.a/ (μg/L)
夏季	阳澄湖	0.07±0.02	0.13±0.04	0.10±0.02	0.09±0.05	0.73±0.47	5.09±0.98	43.16±38.03
	西湖	0.08±0.01	0.13±0.03	0.10±0.02	0.08±0.04	0.93±0.61	5.38±0.98	47.98±45.98
	中湖	0.07±0.02	0.16±0.03	0.09±0.02	0.09±0.04	0.80±0.45	5.67±0.37	61.40±43.98
	东湖	0.06±0.01	0.10±0.02	0.11±0.02	0.09±0.06	0.50±0.30	4.37±1.00	23.93±17.35
冬季	阳澄湖	0.04±0.02	0.11±0.05	0.18±0.12	1.14±0.25	1.84±0.39	2.39±0.32	3.76±1.71
	西湖	0.06±0.01	0.11±0.01	0.29±0.15	1.31±0.14	2.02±0.39	2.22±0.15	4.61±1.24
	中湖	0.05±0.02	0.10±0.02	0.15±0.07	1.20±0.30	2.04±0.26	2.52±0.38	2.46±1.67
	东湖	0.03±0.01	0.10±0.07	0.12±0.08	0.97±0.17	1.64±0.40	2.40±0.34	3.62±2.04

因素方差分析结果表明,各湖区优势功能群总生物量季节性差异不显著($P > 0.05$)。从组成上看,呈现出西湖 M/Lo/H1(夏)→X2/MP/Y(冬)、中湖 M/Lo/H1(夏)→P/X1/MP(冬)、东湖 MP/P/Tc(夏)→MP/P(冬)的演替特征。

2.3 P-IBI 体系构建及健康评价结果

2.3.1 参照点的设置

阳澄湖在人口聚集、湖泊围垦等因素干扰下接纳了大量点源、面源污染物,水质长期处于富营养化水平,基本无绝对的清洁参照点。因此,通过 TLI 判断采样点的受干扰程度,选取 7 个 $TLI < 48.40$ 的采样点作为参照点,其余 25 个采样点组成受损点。

2.3.2 候选指标的选取

筛选出在 90% 采样点不为零的 12 个功能群,包括 B、C、D、F、Lo、MP、N、P、W1、W2、X1 和 Y 功能群。选取功能群的物种数、密度百分比、生物量及其他对干扰反应敏感的 42 个候选参数,综合反映浮游植物物种丰富度、群落结构组成和群落营养结构 3 类特征。

2.3.3 核心指标筛选

(1) 分布范围分析:计算各候选参数在参照点的平均值、25% 分位数、中位数、75% 分位数及标准差,剔除标准差过大、数据较离散的指标(浮游植物总密度);剔除随干扰强度增强数变化而不灵敏的 9 个指标(B、C、Lo、P、W2 和 Y 功能群的物种数,D、W2 和 X1 功能群的生物量)。

(2) 箱线图判别能力分析:通过箱线图 25%~

75% 分位数的箱体重叠情况(IQ)对余下的 32 个指标进行比较,保留能反映参照点与受损点间差异($IQ \geq 2$)的指标;W1 功能群物种数(M1)、Pielou 均匀度指数(M2)、B 功能群密度百分比(M3)、F 功能群密度百分比(M4)、W1 功能群密度百分比(M5)、W2 功能群密度百分比(M6)、Y 功能群密度百分比(M7)、前 3 优势功能群密度百分比(M8)、Lo 功能群生物量(M9)、P 功能群生物量(M10)、W1 功能群生物量(M11)和浮游植物总生物量(M12),将它们纳入相关性分析。

(3) 相关性分析:对不完全符合正态分布的 12 个候选参数采用 Spearman 方法分析指标间的信息重叠度,结果见表 2。高度相关的指标(相关系数绝对值 > 0.75)中,M1、M2 及 M12 涵盖的信息更丰富,优先保留。最终确定阳澄湖 P-IBI 体系由 9 个核心指标(M1~M4、M6~M8、M10 和 M12)构成。

2.3.4 P-IBI 指标分值计算及健康评价标准

以参照点 P-IBI 的 25% 分位数作为健康评价标准,三分法、四分法和比值法对评价参照点的准确率分别为 71.4%、84.0% 和 85.7%,对评价受损点的准确率分别为 71.4%、88.0% 和 92.0%。最终确定采用比值法进行 P-IBI 指标计算和健康评价标准的建立。根据候选指标对干扰的胁迫响应,表现为下降的参数分值 = 实测值/所有采样点参数值的 95% 分位数,表现为上升的参数分值 = (最大值 - 实测值)/(最大值 - 所有采样点参数值的 5% 分位数),结果见表 3。计算各分值并累计求和获得各采样点的

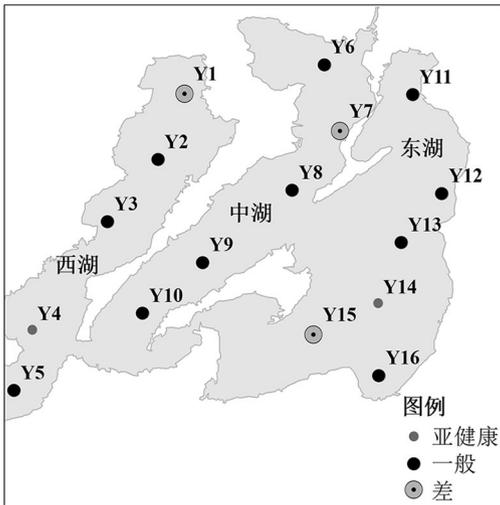
表 2 候选参数的 Spearman 相关性¹⁾
Table 2 Spearman correlation of candidate parameters

指标	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
M1	1.00											
M2	-0.12	1.00										
M3	0.30	0.42 *	1.00									
M4	-0.04	0.49 * *	0.50 * *	1.00								
M5	0.21	0.86 * *	0.44 *	0.44 *	1.00							
M6	-0.01	0.56 * *	0.53 * *	0.40 *	0.57 * *	1.00						
M7	-0.12	0.70 * *	0.20	0.45 * *	0.73 * *	0.49 * *	1.00					
M8	-0.23	-0.69 * *	-0.49 * *	-0.54 * *	-0.61 * *	-0.39 *	-0.38 *	1.00				
M9	0.57 * *	-0.60 * *	-0.06	-0.29	-0.41 *	-0.23	-0.48 * *	0.13	1.00			
M10	0.32	-0.57 * *	-0.13	-0.22	-0.51 * *	-0.25	-0.55 * *	0.16	0.58 * *	1.00		
M11	0.88 * *	-0.22	0.17	-0.11	0.10	-0.07	-0.21	-0.21	0.62 * *	0.45 * *	1.00	
M12	0.61 * *	-0.67 * *	-0.03	-0.39 *	-0.54 * *	-0.44 *	-0.64 * *	0.17	0.77 * *	0.55 * *	0.65 * *	1.00

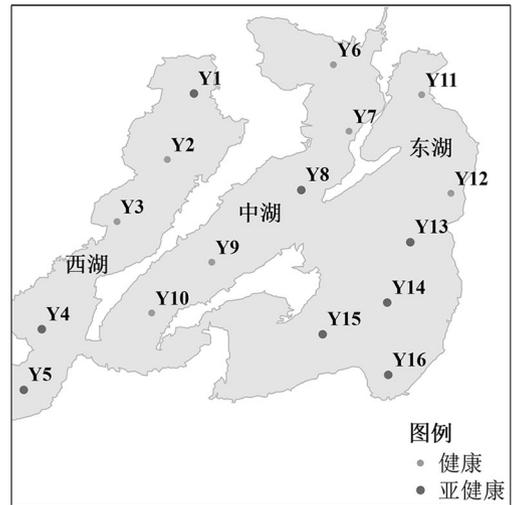
注:¹⁾“* *”表示极显著相关,“*”表示显著相关。表 4 同。

表 3 比值法计算 P-IBI 指标分值的公式
Table 3 Formulas for calculating P-IBI index scores by ratio scoring method

核心参数	最大值	5%分位数	95%分位数	分值计算公式	胁迫响应
M2	0.92	0.43	0.91	实测值/0.91	下降
M3	14.15	0.01	7.35	实测值/7.35	下降
M4	8.00	0.03	5.85	实测值/5.85	下降
M6	3.05	0	2.75	实测值/2.75	下降
M7	15.95	0.02	11.68	实测值/11.68	下降
M1	19.00	1.55	15.45	$(19.00 - \text{实测值}) / (19.00 - 1.55)$	上升
M8	94.82	49.75	85.32	$(94.82 - \text{实测值}) / (94.82 - 49.75)$	上升
M10	6.86	0.01	3.08	$(6.86 - \text{实测值}) / (6.86 - 0.01)$	上升
M12	258.69	0.69	196.72	$(258.69 - \text{实测值}) / (258.69 - 0.69)$	上升



(a) 阳澄湖夏季P-IBI评价结果



(b) 阳澄湖冬季P-IBI评价结果

图 2 阳澄湖健康评价结果

Fig.2 Health assessment results of Yangcheng Lake

P-IBI。以参照点 P-IBI 分布的 25%分位数的值(即 5.85)作为健康标准的阈值,利用四等分法确定阳澄湖健康评价标准:健康(≥ 5.85)、亚健康($4.39 \sim < 5.85$)、一般($2.93 \sim < 4.39$)、差($1.46 \sim < 2.93$)、极差(< 1.46)。

2.3.5 阳澄湖健康评价

健康评价结果显示,阳澄湖处于亚健康状态,冬季健康状态优于夏季。夏季 P-IBI 均值为 3.63,处于一般状态,16 个采样点中亚健康 2 个、一般 11 个、差 3 个(见图 2),健康状况从优至劣依次为东湖

表 4 P-IBI 与水环境因子相关性
Table 4 Correlation between P-IBI and water environmental factors

项目	pH	DO	TDS	水温	EC	SD	FV
P-IBI	-0.722 * *	0.157	0.139	-0.812 * *	0.181	0.523 * *	0.755 * *
项目	磷酸盐	TP	氨氮	硝态氮	TN	高锰酸盐指数	Chl.a
P-IBI	-0.495 * *	-0.330	0.291	0.723 * *	0.665 * *	-0.804 * *	-0.787 * *

(3.82)、西湖(3.68)、中湖(3.37);冬季 P-IBI 均值为 5.98,处于健康状态,16 个采样点中健康 8 个、亚健康 8 个,健康状况从优至劣依次为西湖(6.26)、中湖(6.18)、东湖(5.59)。

2.4 P-IBI 与水环境因子相关性分析

P-IBI 与水环境因子相关性见表 4。P-IBI 与 SD、FV、硝态氮、TN 呈极显著正相关,与 pH、水温、磷酸盐、Chl.a 和高锰酸盐指数呈极显著负相关,与其他指标相关性不显著。水环境因子直接或间接驱动了浮游植物群落结构和生物完整性变化。

3 讨 论

根据中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn>)发布的《2022 年全国地表水水质月报》,2022 年 7、12 月阳澄湖水水质属轻度污染。P-IBI 评价显示阳澄湖夏、冬季的健康状态分别为一般、健康状态,夏季评价结果与水质现状相符,而冬季存在差异的可能原因是:冬季阳澄湖浮游植物的主要限制因素是水温^[15],耐受低温的 P 功能群在微流动的生境中较活跃^[16],喜暖生境的优势功能群 M、Lo 和 H1 所占的生态位被释放^[17],物种增多且群落结构复杂使得 P-IBI 主要构成参数中功能群 B、F、W2、Y 和 P 的优势性加大,导致评价结果较好。

前期已有的研究表明,pH、SD、Chl.a、硝态氮、TN 和高锰酸盐指数等水环境因子均对阳澄湖浮游植物群落结构造成影响^[18-19]。阳澄湖夏季浮游植物生长旺盛(Chl.a 均值高达 43.16 μg/L);高锰酸盐指数代表有机物含量,丰富的有机物为浮游植物的繁殖提供优良条件,致使湖水 SD 锐减,浮游植物结构单一化,导致 P-IBI 与 SD 呈极显著正相关,与 pH、Chl.a、高锰酸盐指数呈极显著负相关。氮、磷等营养元素是浮游植物生长和分布的限制因子,浮游植物的增长一般与磷呈正相关^[20]。阳澄湖浮游植物群落结构随一定范围内硝态氮、TN 浓度的上升复杂化,与太湖浮游植物群落结构与硝酸盐的关系一致^[21]。

P-IBI 评价反映了水环境变化对阳澄湖水生生物的影响,评价结果能较好反映湖泊水生态健康状况在时空上的变化特征,体现出应用 P-IBI 评价阳

澄湖水生态健康状况具有较好的适用性和可操作性,对于湖泊富营养化治理工作具有一定参考价值。

4 结 论

(1) 阳澄湖共鉴定出浮游植物 8 门 104 属 289 种,浮游植物群落呈绿-硅-裸藻型,优势功能群总体演替趋势为 M/Lo/H1(夏)→P/MP/X1(冬)。

(2) P-IBI 与 SD、FV、硝态氮、TN 呈极显著正相关,与 pH、水温、磷酸盐、Chl.a 和高锰酸盐指数呈极显著负相关。水环境因子直接或间接驱动了浮游植物群落结构和生物完整性的变化。

(3) P-IBI 评价显示,阳澄湖夏、冬季的健康状态分别为一般、健康状态。夏季健康状况从优至劣依次为东湖、西湖、中湖,冬季则为西湖、中湖、东湖。

参考文献:

- [1] 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[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [2] 张修峰,刘正文,谢贻发,等.城市湖泊退化过程中水生生态系统服务功能价值演变评估——以肇庆仙女湖为例[J].生态学报,2007,27(6):2349-2354.
- [3] 朱广伟,许海,朱梦圆,等.三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J].湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
- [4] 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[J].应用与环境生物学报,2020,26(6):1325-1334.
- [5] 王芳,李永吉,马廷婷,等.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[J].湖泊科学,2022,34(6):1890-1900.
- [6] HU R, HAN B, NASELLI FLORES L. Comparing biological classifications of freshwater phytoplankton: a case study from South China[J]. Hydrobiologia, 2013, 701: 219-233.
- [7] 朱为菊,肖明珠,常开心,等.基于功能群分类法的海口市红城湖浮游植物群落特征分析[J].水生态学杂志,2022,43(6):78-84.
- [8] 骆东玲.浅水湖泊富营养化的机理与应对策略——以阳澄湖为例[J].农业环境与发展,2007(3):14-18.
- [9] 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[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 周凤霞.淡水微型生物图谱[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [11] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [12] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002,18(5):47-49.

(下转第 261 页)