

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.009

苏州河湖系统浮游植物完整性指数构建及水生生态健康评价

潘伯宁^{1,2}, 李文轩^{1,2}, 徐力刚^{1,2,3}, 蒋名亮¹, 程俊翔¹, 魏凡凯^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 江西 九江 332899)

摘要: 为探究苏州河湖系统水生生态健康状况, 对苏州市 20 个湖泊采样点和 82 个河流采样点的浮游植物群落结构进行了调查, 并选用浮游植物优势种物种数、浮游植物 Simpson 指数、浮游植物细胞总密度、蓝藻生物量占比来表达湖泊浮游植物完整性指数(P-IBI)评价苏州市河湖系统的水生态健康状况。结果表明:2022 年汛期(7 月)和非汛期(10 月)主要湖泊中浮游植物分别为 7 门 108 种和 8 门 97 种, 2023 年汛期(9 月)、非汛期(5 月)分别为 8 门 125 种和 8 门 112 种; 湖泊浮游植物绿藻门物种数最多, 硅藻门次之; 2022 年汛期和非汛期主要河流中浮游植物分别为 8 门 150 种和 8 门 130 种, 2023 年汛期和非汛期分别为 8 门 157 种和 8 门 168 种; 河流浮游植物以绿藻和硅藻为优势种; 各采用点浮游植物功能群丰度和生物量差异明显, 具有显著的空间差异, 汛期浮游植物功能群总丰度和总生物量高于非汛期。

关键词: 完整性指数; 浮游植物; 水生生态健康评价; 苏州河湖

中图分类号: X173; X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0073-08

Construction of phytoplankton index of biotic integrity and evaluation of water ecological health of lake and river systems in Suzhou City

PAN Boning^{1,2}, LI Wenxuan^{1,2}, XU Ligang^{1,2,3}, JIANG Mingliang¹, CHENG Junxiang¹, WEI Fankai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Poyang Lake Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899, China)

Abstract: To explore the water ecological health of lake and river systems in Suzhou City, the phytoplankton community structure of 20 lake sampling points and 82 river sampling points in Suzhou City was investigated. Parameters were selected to express the phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) in the lake, such as the number of dominant species of phytoplankton, the Simpson index of phytoplankton, the total density of phytoplankton cells, and the percentage of cyanobacteria biomass, which were then used to evaluate the water ecological health of river and lake systems in Suzhou City. The results show that during the flood season (in July) and non-flood season (in October) in 2022, 108 species from seven phyla and 97 species from eight phyla of phytoplankton were found in the main lakes, respectively. In 2023, 125 species from eight phyla and 112 species from eight phyla were identified during the flood season (September) and non-flood season (May), respectively, with the highest number of species in the Chlorophyta, followed by the Bacillariophyta. In the main rivers, 150 species from eight phyla and 130 species from eight phyla of phytoplankton were

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFE0106400); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BK20220042); 江西省自然科学基金项目(S20257056); 江西省科技计划项目(20223AEI91008, 20244BCF61001, 20243BBH81035); 中国博士后科学基金项目(2024M751237); 中国科学院南京地理与湖泊研究所项目(NIGLAS2022TJ13, NIGLAS2022GS09)

作者简介: 潘伯宁(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事湖泊水环境水生态研究。E-mail: yese1204@163.com

通信作者: 徐力刚(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要从事湖泊水环境水生态研究。E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

引用本文: 潘伯宁, 李文轩, 徐力刚, 等. 苏州河湖系统浮游植物完整性指数构建及水生生态健康评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 73-80.

PAN Boning, LI Wenxuan, XU Ligang, et al. Construction of phytoplankton index of biotic integrity and evaluation of water ecological health of lake and river systems in Suzhou City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 73-80.

detected during the flood and non-flood seasons in 2022, respectively, and they increased to 157 species from eight phyla and 168 species from eight phyla in 2023, respectively, with Chlorophyta and Bacillariophyta being the dominant species. There are significant spatial differences in the abundance and biomass of phytoplankton functional groups at each sampling point, with higher total abundance and biomass of phytoplankton functional groups during the flood season compared to the non-flood season.

Key words: index of biotic integrity; phytoplankton; water ecological health assessment; lake and river in Suzhou City

浮游植物是水生食物网的基础生产者,对水体的营养循环、生物多样性和生态平衡具有显著影响。浮游植物的种类、密度、生物量和优势种在不同的时间和空间上呈现显著变化,这些变化均与水质状况密切相关。浮游植物群落结构特征对水质的指示作用通常被用来评估水体污染和生态恢复情况。因此,浮游植物在水生态健康评价中扮演着重要角色。目前,水生态健康评价有多种方法:张艳等^[1-2]分别采用随机森林算法、生态系统健康评价方法对浑河进行了水生态健康评价;廖延科等^[3-5]采用浮游植物生物完整性指数(phytoplankton index of biotic integrity, P-IBI)分别对修河、淮河及雅鲁藏布江进行了河湖水生态健康评价;李强等^[6]对淀山湖浮游植物群落的调查及水生态健康评价发现,铜绿微囊藻是淀山水体水华的主要物种,其夏秋季水体呈轻污染;陈琪等^[7]通过构建浮游植物完整性指数指标体系对鸣翠湖水生态健康进行评价,发现冬季水质为优,春、秋季较差,夏季最差。

P-IBI 是一种常用的生态健康评价指标,结合了浮游植物的种类丰富度、群落结构和生物量等参数,由多个敏感性不同的度量指标综合得出,通过评估生物群落的结构和功能来反映生态系统的健康状况。P-IBI 不仅考虑了浮游植物的种类和数量,还结合了群落的多样性和稳定性等指标,能够更全面地反映苏州河湖水生态系统的健康状况,避免单一指标评价可能出现的片面性。苏州河湖水生态状况在不同季节和区域存在着差异,P-IBI 可以根据具体的季节和区域特征,灵活选择和调整评价参数。P-IBI 与传统的水质指标(如氨氮、总磷等)具有一定的相关性,但它们反映的是不同的生态信息。P-IBI 能够从生物群落的角度补充水质指标的不足,为苏州河湖水生态健康的评价提供更为全面的视角。因此,本文基于 2022—2023 年对苏州市 20 个湖泊采样点和 82 个河流采样点进行的水生态调查,探究苏州河湖浮游植物的群落结构,并合理构建基于浮游植物完整性指数的水生态健康评价体系,系统分析和评价了苏州河湖水生态健康状况,旨在为苏州河湖水生态系统健康管理与水环境治理提供科学支撑。

1 研究区概况

苏州位于长江三角洲中部、江苏省东南部,地处 30°47'N~32°02'N、119°55'E~121°20'E 之间,东傍上海,西抱太湖,南接浙江,北依长江,总面积 8 657. 32 km²^[8]。苏州境内河流纵横,湖泊众多。随着苏州城市化和工业化程度的不断提高,对水生态系统产生了严重影响。近些年,苏州市开展了一系列河湖综合治理措施,取得了一定的成效,但由于苏州市产业密集、人口密集,主要污染物排放总量大,使得苏州市河湖水生态的健康状况仍面临巨大挑战。

2022 年 7 月(汛期)、10 月(非汛期),2023 年 5 月(非汛期)、9 月(汛期)对苏州市主要河湖水生态系统浮游植物进行了调查。4 次调查均布设了水生态监测点位 102 个,其中主要河流(长江、娄江、胥江、望虞河、浏河、苏东河、太浦河、京杭大运河等)82 个,主要湖泊(太湖、阳澄湖、独墅湖、淀山湖、傀儡湖、澄湖、漕湖、游湖、金仓湖等 14 个湖泊)20 个,具体分布如图 1 所示。2022 年 7 月、10 月及 2023 年 5 月采样时有 2 个采样点(傀儡湖、十一圩港)在工厂内部或水源围挡中,未能采样,因此,2022 年及 2023 年 5 月实际采样点为 100 个。

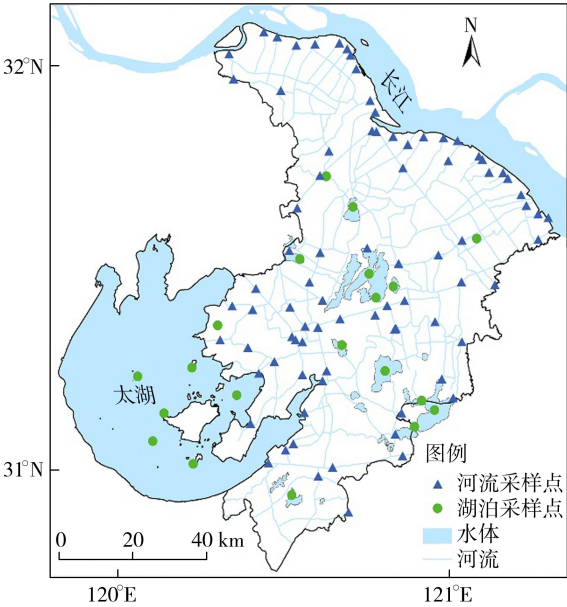


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points

2 研究方法

2.1 浮游植物样品采集与分析

在采样点用有机玻璃采水器采集 0.5 m 水深处的混合水,加入 1 L 塑料瓶中,现场加入 10 mL 鲁哥氏液固定;随后将样品带回实验室,静置 48 h 后,用细小虹吸管吸取上层清液,定容至 100 mL;滴取 0.1 mL 浮游植物样品在计数框内,在 400 倍显微镜下进行浮游植物的计数和鉴定,参考相关研究成果^[9-11]将浮游植物鉴定到种。

2.2 分析方法

浮游植物密度计算公式为

$$N = \frac{A}{A_c} \frac{V_s}{V_0 V_a} n$$

(1)

式中: N 为浮游植物密度; A 为计数框面积; A_c 为计数面积; V_0 为水样浓缩前体积; V_s 为水样浓缩后体积; V_a 为计数框容积; n 为浮游植物计数细胞数。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)以及物种优势度指数(Y , $Y>0.02$ 视为优势种)等浮游植物多样性参数分析苏州市河湖浮游植物群落结构特征。

2.3 IBI 指标体系的构建

应用生物完整性指数 (IBI) 评价水生态系统健康是河湖生态系统管理的重要方法^[12-14]。与单一评价指标相比,IBI 能够系统完整地反映水生态系统中生物的状况、定量描述水生生物与环境因子之间的关系以及反映水生态系统健康状况。IBI 指标体系主要构建过程包括评价候选参数的选用、参照点和受损点的选择、判别能力分析、冗余度分析、统一量纲。

2.3.1 评价候选参数的选用

评价参数要求对水环境变化敏感、参数准确且便于获取。结合其他学者对植物完整性的研究^[15-18]和苏州浮游植物实际调查情况,苏州市浮游植物评价候选参数见表 1。

表 1 浮游植物评价候选参数

Table 1 Evaluate candidate parameters of phytoplankton

参数类别	编号	参数	干扰情况	参数类别	编号	参数	干扰情况
群落多样性	M1	浮游植物总分类单元数	↓	群落物种丰度	M15	绿藻门总密度	↓
	M2	硅藻门分类单元数	↓		M16	不可食藻总密度	↓
	M3	硅藻门分类单元占比	↓	群落均匀性	M17	不可食藻总密度占比	↓
	M4	蓝藻门分类单元数	↓		M18	硅藻门总密度占比	↓
	M5	蓝藻门分类单元占比	↓		M19	蓝藻门总密度占比	↓
	M6	绿藻门分类单元数	↓		M20	绿藻门总密度占比	↑
	M7	绿藻门分类单元占比	↓		M21	优势种个体占比	↑
	M8	Pielou 均匀度指数	↓		M22	前三优势种占比	↑
	M9	Margalef 丰富度指数	↓	耐污能力	M23	水华藻个体密度占比	↓
	M10	Simpson 指数	↓		M24	敏感种个体密度	↓
	M11	Shannon-Wiener 指数	↓		M25	敏感种个体密度占比	↓
群落物种丰度	M12	浮游植物总密度	↑		M26	耐污种个体密度	↓
	M13	硅藻门总密度	↓		M27	耐污种个体密度占比	↓
	M14	蓝藻门总密度	↓				

注:↓表示干扰越强,该指标值越小;↑表示干扰越强,该指标值越大。

2.3.2 参照点和受损点的选择

P-IBI 指标体系构建过程中,参照点和受损点的确定是一个非常重要的过程。参照点是受外界干扰较小,最接近自然状态的点位。本文研究区域大、调查次数多,采样点在不同调查时期自然状态存在差异,因此参照点的选取也不相同。当采样点的水质达到Ⅲ类水标准或以上且 $H' \geq 2$ 时,确定为参照点^[19],其他为受损点。

2.3.3 判别能力分析

绘制浮游植物各候选参数参照点和受损点的箱线图,比较 2 个箱体重叠大小(比较 25% 和 75% 分位数的位置关系)^[20],得到不同的 IQ 值。当参照点和受损点两箱体无重叠且中位线也在对方箱体之外时,IQ 取

3;当两箱体部分重叠且中位线在对方箱体之外时,IQ 取 2;当两箱体有重叠且某一箱体中位线在对方箱体之内时,IQ 取 1;当两箱体中位线在对方箱体之内时,IQ 取 0。选取 IQ 大于或等于 2 的参数构建 P-IBI 指标。

2.3.4 冗余度分析

将通过判别能力分析后符合要求的候选参数进行 Pearson 相关性分析,确保筛选留下的参数所反映的信息相对独立。当 $|r| > 0.75$ (r 为相关系数)时,说明 2 个候选参数反映的信息重叠程度较高,为避免重复,保留信息含量相对较多的参数,删除另一个。若一个候选参数与多个其他候选参数显著相关,则说明该候选参数有较多的重叠,不具有参考性,可直接删除该参数。

2.3.5 统一量纲

采用比值法计算生物参数的分值:①对于随着干扰增大而数值减小的生物参数,以 95%分位数为最佳期望值,参数分值为该生物参数除以 95%分位数;②对于随着干扰增大而数值增大的生物参数,以 5%分位数为最佳期望值,参数分值为最大参数值减去该生物参数值,然后除以最大参数值与 5%分位数的差。将各参数分值累加得到 IBI,并将各采样点 IBI 进行 K-S 检验看是否符合正态分布,符合 ($P > 0.05$) 则说明最终得到的 IBI 值合理。确定评价标准等级时,将参照点 IBI 的 25%分位数作为标准,大于该值的 IBI 采样点评价为健康,将小于 25%分位数值值的分布范围 4 等分,同时按照百分制赋予不同分值,等级划分标准及赋分见表 2。

表 2 生物完整性评价等级及赋分标准
Table 2 Biotic integrity evaluation levels and scoring criteria

IBI 范围	赋分	等级
80~100	5	健康
60~<80	4	亚健康
40~<60	3	一般
20~<40	2	较差
0~<20	1	极差

3 结果与分析

3.1 苏州河湖植物群落分布特征

2022—2023 年的 4 次水生生态调查中,苏州市主要湖泊 2022 年共发现浮游植物 8 门 134 种,其中绿藻门 61 种,占 45.52%;硅藻门 35 种,占 26.12%;蓝藻门 21 种,占 15.67%;裸藻门 7 种,占 5.23%;隐藻门 3 种,占 2.24%;甲藻门 3 种,占 2.24%;黄藻门 2 种,占 1.49%;金藻门 2 种,占 1.49%。从各时期来看,2022 年主要湖泊汛期共发现浮游植物 7 门 108 种,非汛期 8 门 97 种。2023 年主要湖泊共发现浮游植物 8 门 155 种,其中绿藻门 73 种,占 47.09%;硅藻门 43 种,占 27.74%;蓝藻门 17 种,占 10.97%;裸藻门 9 种,占 5.81%;金藻门 6 种,占 3.87%;隐藻门 4 种,占 2.58%;甲藻门 2 种,占 1.29%;黄藻门 1 种,占 0.65%。从各时期来看,2023 年主要湖泊汛期共发现浮游植物 8 门 125 种,非汛期 8 门 112 种。总体来看,2022—2023 年主要湖泊浮游植物物种数汛期多于非汛期,且绿藻门为主要优势门类。

主要河流 2022 年共发现浮游植物 8 门 171 种,其中绿藻门 78 种,占 45.62%;硅藻门 46 种,占 26.90%;蓝藻门 24 种,占 14.04%;裸藻门 9 种,占 5.26%;隐藻门 5 种,占 2.92%;甲藻门 5 种,占 2.92%;黄藻门 2 种,占 1.17%;金藻门 2 种,占 1.17%。从各时期来看,2022 年主要河流汛期共发现浮游植物 8 门 150 种,非汛期 8 门 130 种。2023 年主要河流共发现浮游植物 8 门 185 种,其中硅藻门 71 种,占 38.38%;绿藻门 59 种,占 31.89%;蓝藻门 18 种,占 9.73%;裸藻门 15 种,占 8.11%;金藻门 9 种,占 4.87%;甲藻门 6 种,占 3.24%;隐藻门 5 种,占 2.70%;黄藻门 2 种,占 1.08%。从各时期来看,2023 年主要河流汛期共发现浮游植物 8 门 157 种,非汛期 8 门 168 种。总体来看,2022 年主要河流浮游植物物种数汛期多于非汛期,且绿藻门为主要优势门类;2023 年主要河流浮游植物物种数非汛期多于汛期,硅藻门为主要优势门类。

3.2 苏州河湖浮游植物完整性评价

按照表 1 中所列参数计算浮游植物评价参数。

3.2.1 参照点和受损点的选择

2022 年汛期选定 6 个参照点,主要分布在盐铁塘、金仓湖、张家港、太字圩港、京杭大运河苏南段、金墅港,其余 94 个采样点为受损点;2022 年非汛期选定 5 个参照点,主要分布在金仓湖、太湖、新泾、新开港、浒光运河,其余 95 个采样点为受损点;2023 年汛期选定 8 个参照点,主要分布在太字圩港、四干河、锡北运河、白茆塘、常浒河、傀儡湖、金仓湖、杨林塘,其余 94 个采样点为受损点;2023 年非汛期选定 6 个参照点,主要分布在娄江、张家港、长江、浒光运河、新开港、北福山塘,其余 94 个采样点为受损点。

3.2.2 判别能力分析

对选取的 27 个候选参数比较受损点和参照点箱线图箱体重叠情况得到不同的 IQ 值。2022 年汛期筛选出符合要求的有 8 个候选参数(M1、M2、M4、M6、M9、M11、M15 和 M20);2022 年非汛期选出符合要求的有 8 个候选参数(M1、M2、M9、M10、M11、M13、M24、M25);2023 年汛期选出符合要求的有 5 个候选参数(M1、M2、M6、M9、M11);2023 年非汛期选出符合要求的有 7 个候选参数(M1、M2、M4、M8、M9、M10、M11)。

3.2.3 冗余度分析

对通过判别能力分析筛选后的生物参数进行 Pearson 相关性分析,结果见表 3~6。2022 年汛期 M1 与 M6、M9 与 M20 相关性系数大于 0.75,删除 M6 和 M20,保留 M1、M2、M4、M9、M11、M15;2022 年非汛期 M1 与 M9、M9 与 M11、M13 与 M24 相关性系数大于 0.75,删除 M9 和 M24,保留 M1、M2、M10、M11、M13、M25;2023 年汛期 M1 与 M6、M9 相关性系数大于 0.75,删除 M1,保留 M2、M6、M9、M11;2023 年非汛期 M1 与 M9、M8 与 M10、M8 与 M11、M10 与 M11 相关性系数均大于 0.75,删除 M9、M8,保留 M1、M2、M4、M10、M11。

表 3 2022 年汛期 Pearson 相关性分析结果
Table 3 Results of Pearson correlation analysis for flood season in 2022

指标	M1	M2	M4	M6	M9	M11	M15	M20
M1	1.00							
M2	0.45	1.00						
M4	0.63	0.03	1.00					
M6	0.89	0.21	0.44	1.00				
M9	0.62	0.41	0.17	0.54	1.00			
M11	0.65	0.32	0.44	0.54	0.49	1.00		
M15	0.60	-0.01	0.34	0.70	0.31	0.23	1.00	
M20	0.47	0.40	-0.07	0.50	0.77	0.28	0.43	1.00

表 4 2022 非汛期 Pearson 相关性分析结果
Table 4 Results of Pearson correlation analysis for non-flood season in 2022

指标	M1	M2	M9	M10	M11	M13	M24	M25
M1	1.00							
M2	0.54	1.00						
M9	0.97	0.64	1.00					
M10	0.47	0.39	0.59	1.00				
M11	0.75	0.58	0.81	0.64	1.00			
M13	0.41	0.14	0.28	-0.01	0.04	1.00		
M24	0.39	0.11	0.24	-0.18	0.01	0.84	1.00	
M25	-0.07	-0.13	-0.15	-0.48	-0.27	0.08	0.48	1.00

表 5 2023 年汛期 Pearson 相关性分析结果
Table 5 Results of Pearson correlation analysis for flood season in 2023

指标	M1	M2	M6	M9	M11
M1	1.00				
M2	0.60	1.00			
M6	0.79	0.15	1.00		
M9	0.97	0.72	0.69	1.00	
M11	0.64	0.51	0.45	0.74	1.00

表 6 2023 非汛期 Pearson 相关性分析结果
Table 6 Results of Pearson correlation analysis for non-flood season in 2023

指标	M1	M2	M4	M8	M9	M10	M11
M1	1.00						
M2	0.65	1.00					
M4	0.46	0.19	1.00				
M8	0.40	0.41	0.18	1.00			
M9	0.97	0.73	0.42	0.50	1.00		
M10	0.43	0.39	0.19	0.97	0.52	1.00	
M11	0.62	0.54	0.28	0.96	0.70	0.95	1.00

3.2.4 统一量纲

将通过判别能力分析和相关性分析筛选得到的参数进行量纲统一,根据第 2.3.5 节,得到表 7 中的计算公式,将各参数分值累加得到 P-IBI,并将各点位 P-IBI 值进行 K-S 检验看是否符合正态分布。基于此方法,2022 年汛期各点位 P-IBI 值 K-S 检验结果 $P=0.433$,非汛期 $P=0.254$;2023 年汛期各点位 P-IBI 值 K-S 检验结果 $P=0.168$,非汛期 $P=0.976$ 。

3.2.5 评价结果

将参照点 IBI 的 25%分位数作为标准,大于该值的 IBI 采样点评价为健康,将小于 25%分位数值值的分布范围四等分,同时按照百分制转换,可以得到浮游植物生物完整性评价结果,如图 2 所示。苏州市河湖浮游植物评价结果主要是亚健康 and 一般,健康和较差等级占比较少,没有很差的采样点。整体来看,受水体扰动的影响非汛期浮游植物评价结果要优于汛期,且浮游植物评价有逐年向好的趋势。

4 讨 论

4.1 苏州河湖植物群落结构特征

从 2022—2023 年 4 次水生态调查结果可知,无论汛期还是非汛期,绿藻门、硅藻门和蓝藻门均是苏州主

要河湖浮游植物的主要优势门类,与孙淑文等^[8,21]对苏州城区河道的浮游植物群落调查结果一致。2022—2023 年主要湖泊浮游植物物种数汛期多于非汛期,绿藻门占绝对优势,并存在硅藻门、蓝藻门、裸藻门、隐藻门等门类。2022 年主要河流浮游植物物种数汛期多于非汛期,且绿藻门为主要优势门类;而在 2023 年则恰好相反,主要河流浮游植物物种数非汛期多于汛期,硅藻门为主要优势门类。崔易翀等^[22]对苏州古城区河网浮游植物群落调查发现,水体浮游植物数量在不同季节和地点存在较大差异,夏季采集到的浮游植物最多,冬季采集到的最少。除 2023 年非汛期(5 月)主要湖泊浮游植物物种构成情况外,其他时期与大多数研究基本一致,绿藻、蓝藻更适合中高温,硅藻更喜欢较冷的水域^[23-25]。汛期温度较高,雨水较多,外源性营养物质的大量输入促进了浮游植物尤其是蓝藻和绿藻的增殖。

4.2 苏州河湖水生态健康评价

浮游植物因其对水环境的敏感,常被作为水生态健康评价的对象,用来判断水环境好坏的指示物种^[26-27]。蔡琨等^[16]构建了冬季太湖浮游植物生物完整性指数,发现东太湖湖区水生态状况最好,生物完整性评价结果主要为亚健康 and 一般;陈宇飞等^[15]构建了基于浮游动物生物完整性指数的苏州市河湖水生态系统评价体系,发现湖库评价多为一般和差,河流多为良和中。本文构建了基于浮游植物完整性指数的评价体系,评价结果主要以亚健康 and 一般,没有极差采样点(图 2),这与大多数的研究一致。综合来看,苏州市水生态系统健康状况非汛期优于汛期。汛期水文条件的变化,如水体流速、水体扰动、风浪等,均会影响浮游植物群落的生长,导致某些浮游植物物种的增加或减少,从而影响湖泊的生物多样性。尤其是汛期,由于水位上涨和水流动性增强,可能导致湖水的垂直和水平混合加强,增加水体中的溶解氧含量,同时也可能带来丰富的营养盐,促进浮游植物的生长,引起湖泊浮游植物生物量和群落组成的显著变化^[28]。王东伟等^[29]在淮河流域的研究发现,汛期的水生态健康等级为亚健康,非汛期为中度干扰和轻度干扰,显示了水生态健康状况的季节性变化。刘彦龙等^[30-31]分别对黄河干流及黄河中下游湿地水质进行了评价,发现不同水文时期水质污染呈现不同,汛期水质明显优于非汛期;非汛期则可能因为水位下降,导致水体分层,光照和温度条件的变化,影响浮游植物的分布和生长。

5 结 论

a. 2022 年苏州主要湖泊在汛期(7 月)和非汛期(10 月)共发现浮游植物分别为 7 门 108 种和 8 门 97 种;2023 年苏州主要湖泊在汛期(9 月)和非汛期(5 月)共发现浮游植物分别为 8 门 125 种和 8 门 112 种,绿藻门物种数最多,硅藻门次之;2022 年苏州主要河流在汛期和非汛期共发现浮游植物分别为 8 门 150 种和 8 门 130 种;2023 年苏州主要河流在汛期和非汛期共发现浮游植物分别为 8 门 157 种和 8 门

表 7 比值法计算各参数分值的计算公式
Table 7 Formulas for calculating parameter scores using ratio method

采样期	参数编号	计算公式
2022 年汛期	M1	参数值除以 42
	M2	参数值除以 10
	M4	参数值除以 10.05
	M9	参数值除以 2.90
	M11	参数值除以 2.34
	M15	参数值除以 1.27×10^7
2022 年非汛期	M1	参数值除以 35
	M2	参数值除以 13
	M10	参数值除以 0.91
	M11	参数值除以 2.53
	M13	参数值除以 5.22×10^6
	M25	参数值除以 0.83
2023 年汛期	M2	参数值除以 14
	M6	参数值除以 15
	M9	参数值除以 2.48
	M11	参数值除以 2.90
2023 年非汛期	M1	参数值除以 37
	M2	参数值除以 16
	M4	参数值除以 5
	M10	参数值除以 0.92
	M11	参数值除以 2.91

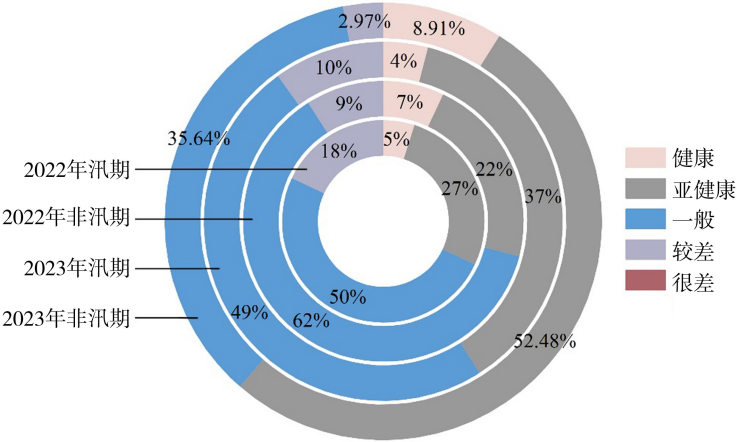


图 2 浮游植物完整性评价结果

Fig. 2 Biotic integrity evaluation results of phytoplankton

168 种,以绿藻和硅藻为优势种。

b. 与汛期相比,非汛期喜欢混合水层的黄丝藻属、游丝藻、转板藻和喜欢静水环境的裸甲藻属、卵形隐藻、啮蚀隐藻、隐藻占比有所上升。整体来看,各采样点浮游植物功能群总丰度差异明显,具有显著的空间差异,汛期浮游植物功能群总丰度高于非汛期。

c. 苏州市河湖浮游植物评价结果主要是亚健康 and 一般的等级,健康和较差等级占比较少,没有很差的采样点。整体来看,受水体扰动的影响非汛期浮游植物评价结果要优于汛期,且浮游植物评价有逐年向好的趋势。

参考文献:

[1] 张艳. 浑河沈抚段水生态健康评价[J]. 水土保持应用技术,2024(2):22-24. (ZHANG Yan. Water ecological health assessment of the Shenfu section of Hun River[J]. Technology of Soil and Water Conservation,2024(2):22-24. (in Chinese))

[2] 董殿波,王留锁,李崇,等. 浑河沈阳段水生态健康评价[J]. 环境保护与循环经济,2024,44(6):65-69. (DONG Dianbo, WANG Liusuo, LI Chong, et al. Ecological health assessment of the Shenyang section of Hun River[J]. Environmental Protection and Circular Economy,2024,44(6):65-69. (in Chinese))

[3] 廖延科,张萌,冯兵,等. 基于 P-IBI 指数的修河中下游水生态健康评价[J]. 环境科学与技术,2024,47(2):104-115. (LIAO Yanke, ZHANG Meng, FENG Bing, et al. Evaluation of aquatic eco-health in the middle and lower reaches of Xiuhe River Basin based on the P-IBI index[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(2):104-115. (in Chinese))

[4] 周彦锋,王东伟,何利聪,等. 基于浮游植物生物完整性指数的淮河中下游水生态健康评价[J]. 湿地科学,2024,22(4):477-486. (ZHOU Yanfeng, WANG Dongwei, HE Licong, et al. Assessment of water ecological health in the middle reaches of Huaihe river based on phytoplankton biological integrity index[J]. Wetland Science,2024,22(4):477-486. (in Chinese))

[5] 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[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(9):109-117. (LIU Huiqiu, LI Xiaodong, YANG Qing, et al. Evaluation on water ecological health in middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River based on phytoplankton-index of biotic integrity[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2023,37(9):109-117. (in Chinese))

[6] 李强,伦凤霞,葛婷婷. 淀山湖浮游植物群落结构特征及水生态健康评价[J]. 水生态学杂志,2024,45(2):10-19. (LI Qiang, LUN Fengxia, GE Tingting. Phytoplankton community structure characteristics and ecological health assessment of Dianshan Lake[J]. Journal of Hydroecology,2024,45(2):10-19. (in Chinese))

[7] 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[J]. 中南农业科技,2024,45(1):127-131. (CHEN Qi, MA Ruibing, TAN Jiawei. Construction of phytoplankton integrity index and ecological health assessment of Mingcui Lake[J]. South-Central Agricultural Science and Technology,2024,45(1):127-131. (in Chinese))

[8] 孙淑文,夏霆,杨金艳,等. 苏州湖泊水源地浮游植物群落特征及营养状况分析[J]. 中国农村水利水电,2020(8):51-55. (SUN Shuwen, XIA Ting, YANG Jinyan, et al. An analysis of the phytoplankton community characteristics and nutrition status in lake-type drinking water sources in Suzhou[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(8):51-55. (in Chinese))

[9] 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.

[10] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:海洋出版社,1995.

[11] 邓坚. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉:长江出版社,2012.

[12] HE Kejian, CHEN Changming, HE Yangyidan, et al. Differential responses of macroinvertebrates and phytoplankton to river health status in different habitats[J]. Aquatic Sciences,2024,86(1):12.

[13] GE You, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al. Development and testing of a planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for Lake Fuxian, China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(48):105873-105884.

[14] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. 水资源保护,2024,40(5):1-10. (YI Yujun, DING Hang, YE Jingxu. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity[J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):1-10. (in Chinese))

[15] 陈宇飞,严航,夏霆,等. 基于浮游动物生物完整性指数的太湖流域生态系统评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022,44(3):335-343. (CHEN Yufei, YAN Hang, XIA Ting, et al. Ecosystem assessment of Taihu Lake Basin based on zooplankton index of biological integrity[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022,44(3):335-343. (in Chinese))

[16] 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[J]. 生态学报,

2016,36(5):1431-1441. (CAI Kun,QIN Chunyan,LI Jiying,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[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(5):1431-1441. (in Chinese))

[17] 阿膺兰,胡鹏,曾庆慧,等. 基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):253-260. (A Yinglan,HU Peng,ZENG Qinghui,et al. Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in the Taoer River[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):253-260. (in Chinese))

[18] 刘凌,朱良珍,叶键,等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征[J]. 水资源保护,2021,37(3):7-12. (LIU Ling,ZHU Liangzhen,YE Jian,et al. Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):7-12. (in Chinese))

[19] 蔡琨,张杰,徐兆安,等. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康[J]. 湖泊科学,2014,26(1):74-82. (CAI Kun,ZHANG Jie,XU Zhaoan,et al. Application of a benthic index of biotic integrity for the ecosystem health assessment of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(1):74-82. (in Chinese))

[20] BARBOUR M T,GERRITSEN J,GRIFFITH G E,et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates[J]. Journal of the North American Benthological Society,1996,15(2):185-211.

[21] 马婕,申利亚,何培民,等. 苏州城区河道浮游植物功能群演替特征及其对环境因子的响应[J]. 上海海洋大学学报,2021,30(1):103-112. (MA Jie,SHEN Liya,HE Peimin,et al. Succession characteristics and responses to environmental factors of phytoplankton functional groups in river courses in the urban area of Suzhou City[J]. Journal of Shanghai Ocean University,2021,30(1):103-112. (in Chinese))

[22] 崔易舫,杨文宇,许王辰. 苏州古城区河网浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. 绿色科技,2021,23(8):154-159. (CUI Yichong,YANG Wenyu,XU Wangchen. Characteristics of phytoplankton community structure and its influencing factors in the river network of Suzhou ancient city[J]. Journal of Green Science and Technology,2021,23(8):154-159. (in Chinese))

[23] JÖEHNK K D,HUISMAN J,SHARPLES J,et al. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria[J]. Global Change Biology,2008,14(3):495-512.

[24] LIU Jinfu,ZOU Haoyue,DENG Feng,et al. Phytoplankton functional groups in Poyang Lake:succesion and driving factors[J]. Journal of Oceanology and Limnology,2024,42(6):1764-1776.

[25] 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[J]. 水资源保护,2020,36(4):13-20. (LIU Ling,ZHU Yan,LI Botao,et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):13-20. (in Chinese))

[26] LI Yanli,LI Linxia. Development and validation of the planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for Qin River,a main tributary of the Yellow River in China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(2):2622-2636.

[27] 王亚宁,徐明,许静波,等. 里下河腹部地区典型湖泊浮游动物演替特征及水质评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):49-57. (WANG Yaning,XU Ming,XU Jingbo,et al. Zooplankton succession characteristics and water quality evaluation of typical lakes in the hinterland of Lixia River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):49-57. (in Chinese))

[28] JAEGGE A C,RAABE J M,PHILLIPS Z B,et al. Flood-driven increases in phytoplankton biomass and cyanobacteria abundance in the western Atchafalaya-Vermilion Bay System,Louisiana[J]. Hydrobiologia,2023,850(20):4413-4441.

[29] 王东伟,龚江,杨晓曦,等. 淮河荆涂峡鲤、长吻鲩国家级水产种质资源保护区浮游植物群落结构的时空格局及影响因子[J]. 大连海洋大学学报,2022,37(4):658-667. (WANG Dongwei,GONG Jiang,YANG Xiaoxi,et al. Spatio-temporal pattern and influencing factors of phytoplankton community structure in National[J]. Journal of Dalian Ocean University,2022,37(4):658-667. (in Chinese))

[30] 刘彦龙,郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. 环境科学,2022,43(3):1332-1345. (LIU Yanlong,ZHENG Yian. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin[J]. Environmental Science,2022,43(3):1332-1345. (in Chinese))

[31] HONG Zhendong,ZHAO Qinghe,CHANG Jinlong,et al. Evaluation of water quality and heavy metals in wetlands along the Yellow River in Henan province[J]. Sustainability,2020,12(4):1300.