

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.003

基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物 生物完整性评价

刘凌,朱燕,李博韬,陈翔

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:根据2016年7月至2017年4月对长江江苏段6个采样点浮游植物现状的逐季调查结果,基于浮游植物 MBFG 分类法进行参数筛选,构建浮游植物生物完整性指数。选取人类干扰较小的采样点作为参照点,对候选参数进行判别能力和相关性分析的筛选,得到构建浮游植物生物完整性指数(P-IBI)的9个核心参数,采用比值法统一参数量纲并确定分级评价标准,对长江江苏段进行水生生态健康评价。结果显示:P-IBI在空间上呈“N”形变化,镇江与南通断面得分较高,而江宁、栖霞和江阴断面得分较低;P-IBI与水温、高锰酸盐指数呈显著负相关,与透明度和溶解氧呈显著正相关;Ⅲ类功能群的生长繁殖对P-IBI有重要影响,其大量繁殖会造成水生态系统状况恶化。

关键词:浮游植物;MBFG分类法;生物完整性指数;水生生态健康评价;生物完整性评价

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)04-0013-08

Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG // LIU Ling, ZHU Yan, LI Botao, CHEN Xiang(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the seasonal survey results on the current status of phytoplankton at six sampling sites in the Jiangsu section of the Yangtze River from July 2016 to April 2017, and through screening parameters on the basis of MBFG taxonomy of phytoplankton, the phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) was constructed. The sampling point with the least human interference was selected as the reference point, and the candidate parameters were screened through discrimination ability and correlation analysis to obtain 9 core parameters for P-IBI construction. Using the ratio method to unify the parameter dimension and determine the grading evaluation standard, the water ecological health of the Jiangsu section of the Yangtze River was evaluated. The results showed that: P-IBI changes in the shape of "N" in space. The sections in Zhenjiang and Nantong have higher scores, while those in Jiangning, Qixia and Jiangyin have lower scores. P-IBI was significantly negatively correlated with water temperature and COD_{Mn} , and positively correlated with transparency and dissolved oxygen (DO). The growth and reproduction of Ⅲ functional groups have an important impact on P-IBI, and their large-scale reproduction will lead to deterioration of aquatic ecosystem conditions.

Key words: phytoplankton; morphologically based functional group; index of biotic integrity; assessment of water ecological health; assessment of biotic integrity

生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)是由Karr^[1]于1981年最先提出,可以定量描述生物所处环境条件、对人类干扰反应敏感。IBI最初的研究对象为鱼类^[2-3],后来逐渐应用于底栖动物^[4]、浮游生物^[5-7]和着生藻类^[8-9]等水生生物,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。近年来,浮游植物生物完整性指数(phytoplankton

index of biotic integrity, P-IBI)主要应用于湖泊^[5]、水库^[6]等相对静止水体的评价,通过合理布设采样时间和采样频次,P-IBI逐渐被改进并应用于河流健康评价。李锐等^[10-13]利用P-IBI评价了长江上游、潭江、小清河流域、上海市河道的河流健康状况。

浮游植物分类是开展P-IBI研究的基础,相较于基于系统发生论的林氏分类法,以藻种生理生境

基金项目:国家自然科学基金(51879085);江苏省水利科技项目(2015053,2018003)

作者简介:刘凌(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事生态水文与环境保护研究。E-mail: lingliu_hhu@hhu.edu.cn

特征为基础的功能分组更为简便^[14],也更能体现水温、营养盐、有机质等环境要素对藻类群落的选择机制。形态功能群(morphologically based functional group, MBFG)作为一种目前常用于浮游植物生态学研究的功能群分类法,根据浮游植物的体积大小、伪空泡、鞭毛、硅壁、比表面积等形态特征,将形态相似的藻种划分到同一组,共划分为 I(高表体比的小型藻)、II(带鞭毛、硅质外壁的小型藻)、III(带伪空泡的大型丝状藻)、IV(无特征的中型藻)、V(带鞭毛的大中型单细胞藻)、VI(无鞭毛带硅质外壁的藻)、VII(黏质的大型团体藻)7个功能群^[15]。研究表明,浮游植物形态很大程度上决定了其抵御捕食、营养利用和悬浮等能力,如带伪空泡的藻类浮力较大,鞭毛降低了藻类对营养盐的依赖性^[16-18]等。在环境选择下,浮游植物形态若具有能适应环境压力的形态特征,则其竞争力更强。当水质发生变化时,浮游植物优势功能群随之改变,因此通过功能群变化可以推断水质的变化。一些学者使用 MBFG 分类法研究浮游植物功能群演替指示的水体变化,如 III 类功能群指示水体处于低光低营养状态^[17],VI 类功能群大量繁殖可以指示水体总氮浓度较高^[19]。此外,还有学者^[20-21]对比了其他方法与 MBFG 分类法,肯定了 MBFG 分类法的高度简化和实用性。

本文利用 MBFG 分类法选取生物参数构建长江江苏段的 P-IBI,对研究区河流健康状况进行评估,探讨 P-IBI 与环境因子的相关关系。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域及采样点

长江江苏段位于长江流域下游,总长约 432.5 km,流域面积 6.8 万 km²,绝大部分是平原和湖区。该段河流是长江水量最大的河段,航运发达,水电资源丰富,是沿江地区的防洪安全屏障和最重要的饮用水源地与灌溉水源地,近年来受人类活动影响日益严重^[22]。

考虑到长江江苏段的长度及样点均匀性,共设置 6 个采样点,分别为江宁(JN)、栖霞(QX)、镇江(ZJ)、常州(CZ)、江阴(JY)和南通(NT),采样点位置分布见图 1。采样时间分别为 2016 年 7 月(夏



图 1 采样点示意图

Fig. 1 Location map of sampling points

季)、10 月(秋季)、12 月(冬季)和 2017 年 4 月(春季),共进行 4 次采样调查,采样点记为 JN1, QX1, ZJ1, CZ1, JY1, NT1, ..., JN4, QX4, ZJ4, CZ4, JY4, NT4,共 24 个采样点。

1.2 样品采集和处理

采集浮游植物样品时,使用采水器在水深 0.5 m 处取 1 L 水样,现场加入 15 mL 1.5% 的鲁哥试剂摇匀固定,将样品带回实验室静置 24 h 后浓缩至 30 mL 并移入样品瓶中。镜检前先将样品摇晃均匀,用移液枪取 0.1 mL 的样品置于 0.1 mL 的浮游生物计数框中,在 10×40 倍的显微镜下进行观察计数。计数方法采用行格法,每个点位至少计数两次后取平均值。

现场采用便携式水质监测仪 YSI 测定水温(WT)、溶解氧(DO)和 pH 值,用塞式盘测定透明度,将采取的水样低温保存并带回实验室。在 48 h 内测定总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和生化需氧量(BOD₅)等水质指标值。

1.3 P-IBI 构建

基于形态功能群的 P-IBI 构建过程包括:①依据人类活动对采样点的影响程度,选择无干扰或干扰极小的采样点作参照点。②基于河流浮游植物形态功能群概念,从功能群密度、生物量、相对密度、群落多样性、群落均匀性和物种丰富度 6 个类别中选取候选参数。③对候选参数分布范围进行分析,要求入选指标在超过 90% 的采样点不为零。用箱形图法进行判别能力分析,比较各候选参数在参照点与受损点间箱体 IQ(interquartile ranges, 25% ~ 75% 分位数范围)的重叠情况:对于箱体没有重叠的情况, IQ 值为 3;对于两箱体有重叠,但两中位线不在对方体内的情况, IQ 值为 2;任意一方中位线在对方箱体内, IQ 值小于 2。当 IQ 值大于或等于 2 时,参数区分能力较强,初步保留在参照点和受损点间箱体 IQ 重叠程度不小于 2 的候选参数。为检验参数的独立性,对筛选后的参数进行 Pearson 相关性分析,当 $|r| \geq 0.75$ 时认为两个参数相关性较高,排除其中一个。④采用比值法对核心参数进行标准化。若为正向参数(对干扰响应为上升),则标准化参数值等于最大值与参数值之差除以最大值与 5% 分位值之差;若为反向参数(对干扰响应为下降),则标准化参数值等于参数值除以 95% 分位值,将标准化后的参数值累加得 P-IBI 总分。以 P-IBI 的 95% 分位值作为最佳期望值,将其分布范围三等分,靠近最佳期望值的一段代表河流健康状况为优,其余两段分别为良、差,确定浮游植物生物完整性的评价标准。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成

镜检共发现浮游植物 6 门 37 属 77 种,其中硅藻门种类数最多,共 13 属 34 种,占总种数的 44.2%;绿藻门 10 属 13 种,占总种数的 16.9%;裸藻门 4 属 13 种,占总种数的 16.9%;蓝藻门 6 属 11 种,占总种数的 14.3%;隐藻门 2 属 4 种,占总种数的 5.2%;甲藻门 2 属 2 种,占总种数的 2.6%。

2.2 浮游植物功能群组成

由于未检测到 II 类功能群,故将浮游植物按形态特征划入 6 个功能群,各功能群特征和藻种见表 1。将浮游植物密度按功能群分组统计,绘制各点位密度堆积(图 2):夏季和秋季,III 类功能群占主导地位, VII 类功能群仅夏季在常州点出现, VI 类功能

群秋季在江宁点占比远超 III 类;冬季和春季,藻类密度总体较低, V 和 VI 类功能群密度占比显著增大, III 类功能群在各点的密度占比有所下降, I 类功能群密度增长不多但其占比有所增大。

2.3 P-IBI 评价体系构建及评价结果

2.3.1 参照点选择

使用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 作为参照点选择标准, $H' \geq 2$ 为清洁点位, $H' < 2$ 为受污染点位,同时结合不同时期各采样点的实际情况,筛选出 ZJ1、NT1、JY2、JN3、NT3、CZ4 和 NT4 共 7 个采样点作为参照点,其余 17 个采样点为受损点。

2.3.2 候选参数筛选

基于功能群概念选取候选参数,进行分布范围分析,排除在各采样点零值数量超过 10% 的参数。采用箱形图对通过上一步分析的参数进行判别能力分析,保留 IQ 值大于等于 2 的参数,得到 15 个区分

表 1 长江江苏段浮游植物 MBFG 功能群组成

Table 1 Composition of MBFG of phytoplankton in Jiangsu section of Yangtze River

功能群	功能群描述	藻种(属)
I	高表体比的小型藻,体型小但生长快,故受捕食压力大却种群恢复快,对 TP、TN 敏感	点形平裂藻 (<i>Merismopedia punctata</i>)、小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)、丝藻属 (<i>Ulothrix spp.</i>)
III	高表体比的大型丝状藻,带伪空泡,生长慢,沉降损失小,捕食压力小,对光照敏感	大螺旋藻 (<i>Spirulina major</i>)、颤藻属 (<i>Oscillatoria spp.</i>)、席藻属 (<i>Phormidium spp.</i>)、鱼腥藻属 (<i>Anabaena spp.</i>)
IV	无明显特征的中型藻,获取资源能力一般,捕食压力较高,沉降速率中等偏下	双眼鼓藻 (<i>Cosmarium bioculatum</i>)、纤维藻属 (<i>Ankistrodesmus spp.</i>)、河生集星藻 (<i>Actinastrum fluviatile</i>)、四角十字藻 (<i>Crucigenia quadrata</i>)、三叶四角藻 (<i>Tetraedron trilobulatum</i>)、扭曲蹄形藻 (<i>Kirchneriella contorta</i>)、纤细新月藻 (<i>Closterium gracile</i>)、四尾栅藻 (<i>Scenedesmus quadricauda</i>)
V	有鞭毛的大中型单细胞藻,获取资源能力一般,捕食压力中等较高,沉降速率中等偏低,鞭毛和一定的异养能力使之可适应低营养盐水体	隐藻属 (<i>Cryptomonas spp.</i>)、蓝隐藻属 (<i>Chroomona spp.</i>)、薄甲藻 (<i>Glenodinium</i>)、扁裸藻属 (<i>Phacus spp.</i>)、卵形鳞孔藻 (<i>Lepocinclis ovum</i>)、裸藻属 (<i>Euglena spp.</i>)、囊裸藻属 (<i>Trachelomonas spp.</i>)
VI	无鞭毛带硅质外壁的藻,获取资源能力中等,细胞密度大且无运动能力,沉降速率大	尖布纹藻 (<i>Gyrosigma acuminatum</i>)、钝脆杆藻 (<i>Fragilaria capucina</i>)、新星形冠盘藻 (<i>Stephanodiscus neostraea</i>)、双尖菱板藻 (<i>Hantzschia amphioxys</i>)、菱形藻属 (<i>Nitzschia spp.</i>)、卵形藻 (<i>Cocconeis</i>)、桥弯藻属 (<i>Cymbella spp.</i>)、小环藻属 (<i>Cyclotella spp.</i>)、异极藻属 (<i>Gomphonema spp.</i>)、高雅羽纹藻 (<i>Pinnularia gentilis</i>)、针杆藻属 (<i>Synedra spp.</i>)、直链藻属 (<i>Melosira spp.</i>)、舟形藻属 (<i>Navicula spp.</i>)
VII	低表体比的大型团体藻,带黏质胶被和伪空泡,吸收营养盐能力较差,捕食压力小,几乎无沉降损失	铜绿微囊藻 (<i>Microcystis aeruginosa</i>)

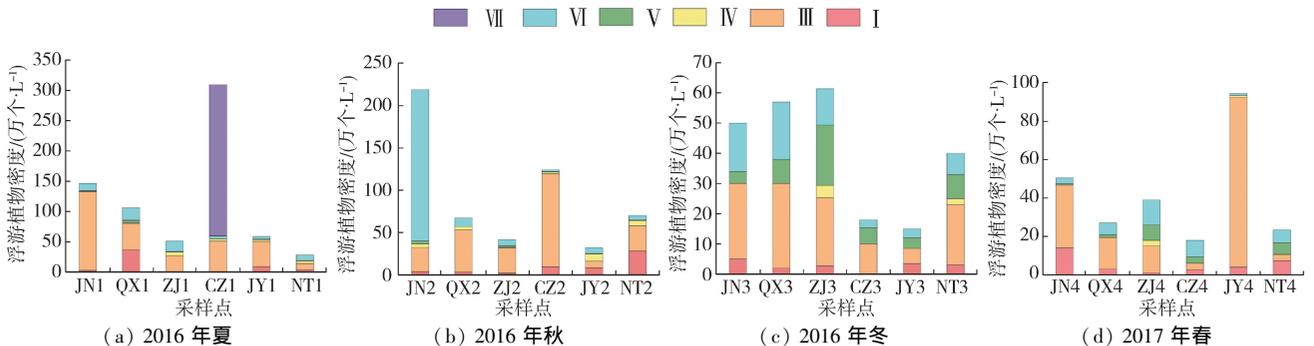


图 2 浮游植物功能群密度堆积

Fig. 2 Density accumulation of phytoplankton functional groups

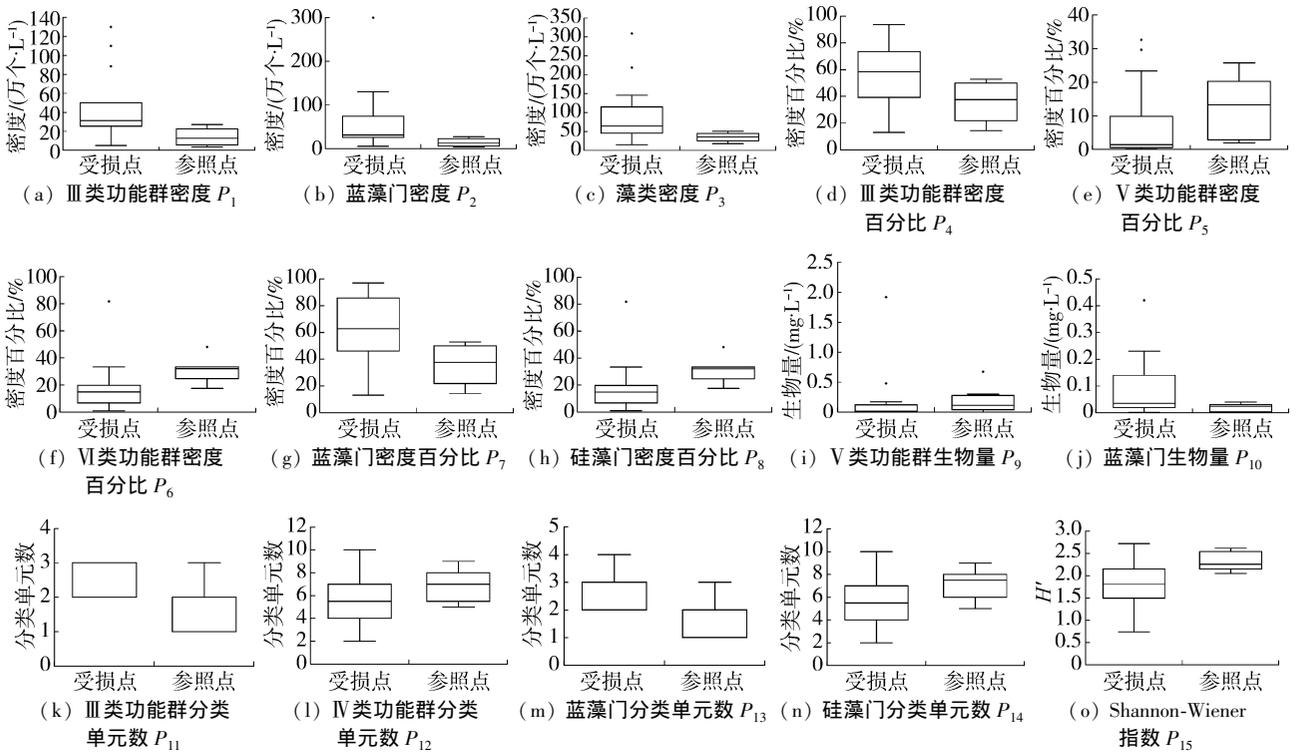


图3 参数辨别能力分析

Fig. 3 Analysis of parameter discrimination

能力较强的候选参数(图3)。

Pearson 相关性检验发现: P_2 与 P_3 、 P_{15} 都高度相关, P_3 在水生态健康方面具有重要意义,且 P_{15} 作为唯一入选的群落多样性参数需保留,故删去 P_2 。浮游植物 MBFG 分类中 III 类功能群已囊括主要的优势蓝藻,故保留 P_1 、 P_4 和 P_{11} ,删去 P_7 、 P_{10} 和 P_{13} 。VI 类功能群已包含所有的硅藻,因此保留 P_6 和 P_{12} ,删去 P_8 和 P_{14} 。通过筛选,最终得到 9 个核心参数来构建基于浮游植物 MBFG 分类法的河流 IBI: P_1 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_9 、 P_{11} 、 P_{12} 和 P_{15} 。

2.3.3 参数量纲统一及 P-IBI 标准建立

对 9 个核心参数进行计算分析, P_1 、 P_3 、 P_4 、 P_{11} 为对干扰响应上升的参数, P_5 、 P_6 、 P_9 、 P_{12} 、 P_{15} 为对干扰响应下降的参数,得到各参数赋分公式(表 2)。累加各参数分值获得 P-IBI 总分,确定 P-IBI 分级评

价标准,P-IBI 不小于 4.93 为优,在 2.47 ~ 4.93 之间为良,小于 2.47 为差。

2.3.4 P-IBI 评价结果

根据 P-IBI 分级标准,对长江江苏段各样点 P-IBI 分值进行水生态健康评价(表 3)。

空间上,长江江苏段的 P-IBI 整体上表现为“优”和“良”(图 4)。从上游到下游,P-IBI 值表现为“N”字形变化趋势,最小值出现在上游的江宁点和中游的常州点,最大值出现在下游的南通点。各点位优评级均达到 50%,南通最多达到 70% 以上,仅江宁、常州和江阴存在差评级。

2.4 P-IBI 与环境因子的关系

长江江苏段 P-IBI 与环境因子的相关分析表明,P-IBI 与 WT 、 COD_{Mn} 显著负相关,与 NH_3-N 正相关,与透明度、 DO 显著正相关(表 4)。

表 2 参数数据分析

Table 2 Analysis of parameters data

参数	最大值	最小值	95%分位值	5%分位值	参数赋分公式	对干扰的响应
P_1	130	3.33	106.78	3.58	$(130 - P_1)/(130 - 3.58)$	上升
P_3	309.5	15	208.09	18.01	$(309.5 - P_3)/(309.5 - 18.01)$	上升
P_4	0.94	0.13	0.89	0.15	$(0.94 - P_4)/(0.94 - 0.15)$	上升
P_5	0.33	0	0.29	0	$P_5/0.29$	下降
P_6	0.82	0.01	0.46	0.02	$P_6/0.46$	下降
P_9	1.92	0	0.65	0	$P_9/0.65$	下降
P_{11}	3	1	3	1	$(3 - P_{11})/(3 - 1)$	上升
P_{12}	10	2	8.85	2.15	$P_{12}/8.85$	下降
P_{15}	2.72	0.74	2.61	1.25	$P_{15}/2.61$	下降

表3 P-IBI 评价结果

Table 3 Evaluation results of P-IBI

采样点	2016年7月		2016年10月		2016年12月		2017年4月	
	P-IBI 值	评价等级	P-IBI 值	评价等级	P-IBI 值	评价等级	P-IBI 值	评价等级
江宁	2.41	差	5.09	优	5.19	优	3.47	良
栖霞	4.61	良	3.49	良	5.26	优	5.13	优
镇江	4.84	良	4.14	良	6.30	优	6.67	优
常州	2.49	良	1.62	差	6.12	优	7.52	优
江阴	3.77	良	5.69	优	6.12	优	1.79	差
南通	5.50	优	4.18	良	6.77	优	7.95	优

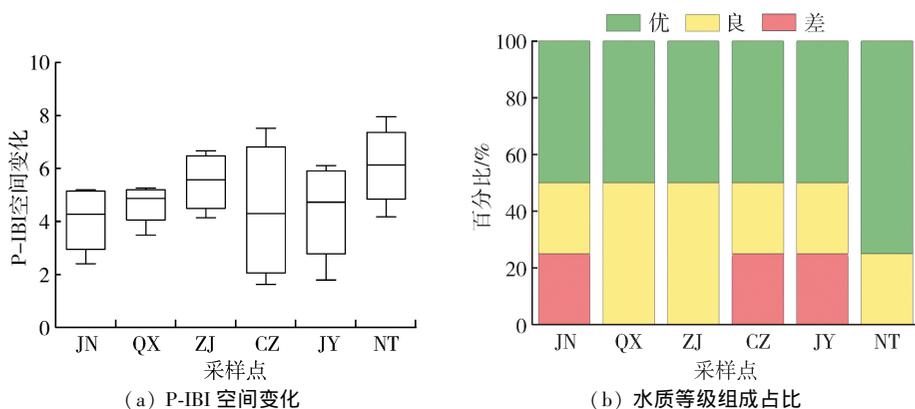


图4 P-IBI 空间变化及不同水质等级百分比组成

Fig. 4 Spatial variation of P-IBI and percentage composition of different water quality grades

表4 P-IBI 与环境因子 Spearman 相关性检验

Table 4 Spearman correlation test between P-IBI and environmental factors

参数	WT	透明度	pH	DO	NH ₃ -N	COD _{Mn}	BOD ₅	TP
P_1	0.371	-0.419 *	0.028	-0.451 *	-0.357	0.483 *	0.201	0.244
P_3	0.416 *	-0.419 *	-0.007	-0.436 *	-0.153	0.365	0.135	0.263
P_4	0.010	-0.276	0.112	-0.253	-0.310	0.375	0.219	-0.023
P_5	-0.530 **	0.407 *	0.003	0.552 **	0.250	-0.277	-0.063	-0.120
P_6	-0.114	0.468 *	0.180	0.360	0.202	-0.616 **	-0.198	-0.054
P_9	-0.396	0.26	-0.019	0.325	0.157	-0.142	0.087	-0.094
P_{11}	0.143	-0.457 *	0.249	-0.070	-0.295	0.423 *	0.417 *	0.136
P_{12}	0.248	0.147	-0.056	-0.224	-0.169	-0.235	-0.061	0.036
P_{15}	-0.32	0.178	0.138	0.368	0.107	-0.420 *	0.104	-0.077
P-IBI	-0.418 *	0.451 *	-0.092	0.421 *	0.345	-0.435 *	-0.213	-0.162

注: ** 代表在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; * 代表在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

3 讨论

3.1 浮游植物功能群季节演替

长江江苏段浮游植物功能群存在一定的季节分布差异,整体变化趋势为Ⅲ(夏秋季)→V+Ⅵ(冬季)→Ⅲ+V+Ⅵ(春季),指示长江江苏段夏秋季水温和有机污染物含量高,水体浑浊,冬春季水温低的特点。夏秋季Ⅲ类功能群占绝对优势,其对有机质、水温较为敏感。Ⅶ类功能群适宜生长在富营养水体中,其在 CZ1 优势明显,说明 CZ1 水体富营养化情况较为严重。在冬季,适宜生长于低温低营养盐的 V、Ⅵ类功能群占比上升,其大量繁殖指示水体

温度偏低,Ⅲ类功能群生长受限而释放出一些生态位,因此种群繁殖速度极快的 I 类功能群占比也出现一定上升。春季气温回升,Ⅲ类功能群生长受限减少,V、Ⅵ类功能群占比出现一定程度的下降。长江江苏段浮游植物功能群季节演替规律在秋、冬、春季与前人^[17,19]的研究具有一致性,但在夏天优势功能群的描述上存在差异,Ⅳ类功能群密度远大于本研究结果。对比后可以发现,Ⅳ类功能群喜欢高光环境,而长江江苏段较为浑浊的水体不适宜Ⅳ类功能群的生长,同时本研究区位于经济发达地区,沿岸工厂较多,水体中有机污染物、氮磷营养盐较多,在夏季高水温的条件下,Ⅲ类功能群更易大量繁殖。

3.2 P-IBI 空间变化规律

长江江苏段 P-IBI 呈现“N”字形变化规律,其中镇江和南通断面得分高于其他断面,这与陈校辉^[23]、吴聪等^[24]的调查结果相一致。镇江段存在的多处原貌江滩与保护区,较好地保留了自然土质护坡^[24],自然状态下的栖息地有利于浮游植物各物种繁衍,故浮游植物种群结构较为完整。南通市近几年加大生态环境治理力度,搬迁整改大量沿江重污染企业,可能是其 P-IBI 较高的重要原因。而江宁、栖霞和江阴 P-IBI 较低,有研究表明南京和江阴的工厂、码头等生产岸线占比较高^[25],污染重、耗能高的企业依然较多,污染物进入长江后破坏浮游植物生物完整性,同时南京较多的硬质护坡严重影响自然的水土交互作用^[25],阻断了水与土壤之间的物质交换和能量流通,水生态系统由此受到影响。除此之外,船舶污染物排放也是影响浮游植物繁衍的重要因素,无锡(江阴)港发展江海河联运,形成了江苏省航运的核心区,南京作为省会城市航运发达、航道内船舶密度大^[26],航行船舶产生的漏油、废气、生活污水等严重破坏了长江水生态环境。

3.3 环境因子对 P-IBI 的影响

水温对浮游植物的生长繁殖有重要的影响。一方面水温与藻类密度呈显著正相关,水温的升高会使浮游植物密度增加^[27],另一方面不同功能群藻类适宜生长的水温不同,Ⅲ类功能群喜生于 30℃ 的水体中,而 V 和 VI 类功能群喜生于 10~20℃ 的水体中^[28]。水温与 V 类功能群密度百分比呈显著负相关,冬季偏低的水温限制了Ⅲ类功能群的大量繁殖,藻类密度下降,但一些竞争能力较弱的物种生态位却得到释放, V 类功能群密度和种类数增加。张敏^[29]认为高水温、强光照的条件下,呼吸作用会强于光合作用,长江江苏段夏季Ⅲ类功能群为优势种,其生长繁殖大量消耗了 DO,同时Ⅲ类功能群沉降损失小的特点使其覆盖在水体表面,又限制了沉降速率较大的 V 和 VI 类功能群光合作用,阻碍浮游植物群落结构复杂化。

P-IBI 与透明度呈显著正相关,这是因为在低光照的条件下,Ⅲ类功能群相较于其他藻类更具有竞争优势^[17],其过度繁殖会破坏藻类种群结构多样性,因此透明度下降会导致 P-IBI 降低。P-IBI 与 pH 值的相关性极弱,研究表明 pH 值在 6.0~9.0 时适宜藻类生长^[30],监测期间长江水体 pH 值保持在 7.0~9.0 之间,适宜藻类生长,对群落结构影响较小。

氮磷营养元素是浮游植物生长的物质基础^[31],本研究中 P-IBI 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 正相关,说明一定范围内的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度上升可促使浮游植物群落结构复杂

化。有研究证明 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在不超过一定阈值的情况下,会使浮游植物种类增加^[32]。P-IBI 与 TP 的相关性较弱,一定 TP 浓度下的藻类生长较为稳定^[32],对浮游植物种群结构影响较小。COD_{Mn} 与 BOD₅ 均与Ⅲ类功能群有较好的相关性,COD_{Mn} 与 BOD₅ 代表水体中有机污染物的浓度,水中有机污染物增加,Ⅲ类功能群密度随之增加,其更替过程中产生的浮游植物尸体又增加了水体中的有机污染物浓度^[33], V 和 VI 类功能群生态位进一步被压缩,导致 P-IBI 得分降低。

长江江苏段水体较为混浊,有机污染物浓度较高,适宜Ⅲ类功能群生长繁衍,温度升高后Ⅲ类功能群会占绝对优势。P-IBI 得分与Ⅲ类功能群演替有较高的相关性,Ⅲ类功能群一般生于低透明的稳定水体,同时与水体中有机物污染物浓度相关性较高,水温升高、有机污染物增加都会使Ⅲ类功能群大量繁殖,挤占 V、VI 类功能群的生态位,使浮游植物结构单一化,破坏水生态健康。P-IBI 从生物学角度解释了水体环境变化规律,发现Ⅲ类功能群与水质恶化存在较高的相关性,因此监控Ⅲ类功能群生长对长江江苏段水生态系统具有重要意义。

4 结 论

a. 长江江苏段 P-IBI 评价结果整体上以“优”、“良”为主,空间上呈“N”字形沿程变化,镇江与南通断面浮游植物生物完整性较好,而江宁、栖霞和江阴评价得分相对较低。

b. P-IBI 与水温、COD_{Mn} 显著负相关,与 DO 显著正相关,表明水温越高、水体受到有机污染程度越重,对长江江苏段浮游植物生物完整性的不利影响越大;P-IBI 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 正相关,这与一定的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度上升会促进浮游植物群落结构复杂化有关;Ⅲ类功能群的生长繁殖对 P-IBI 有重要影响,其大量繁殖会挤占 V 类和 VI 类功能群生态位,造成水生态系统状况恶化。

参考文献:

- [1] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [2] LYONS J, NAVARRO-PÉREZ S, COCHRAN P A, et al. Index of biotic integrity based on fish assemblages for the conservation of streams and rivers in West-Central Mexico [J]. Conservation Biology, 1995, 9(3): 569-584.
- [3] LYDY M J, STRONG A J, SIMON T P. Development of an index of biotic integrity for the little Arkansas River Basin, Kansas [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 39(4): 523-530.

- [4] WEISBERG S B, RANASINGHE J A, DAUER D M, et al. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay [J]. *Estuaries*, 1997, 20(1): 149-158.
- [5] 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 Jiyong, 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))
- [6] 沈强, 俞建军, 陈晖, 等. 浮游生物完整性指数在浙江水源水质评价中的应用 [J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(2): 26-31. (SHEN Qiang, YU Jianjun, CHEN Hui, et al. Planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for water source assessment [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2): 26-31. (in Chinese))
- [7] 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 [J]. *淡水渔业*, 2017, 47(3): 97-104. (TAN Qiao, MA Qianqian, LI Binbin, et al. Ecological health assessment of the upper reaches of the Yangtze River, based on biotic integrity index of phytoplankton [J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, 47(3): 97-104. (in Chinese))
- [8] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 等. 基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1677-1691. (YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al. Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1677-1691. (in Chinese))
- [9] 徐宗学, 顾晓昀, 刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(1): 1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(1): 1-7. (in Chinese))
- [10] 李锐. 长江上游宜宾至江津段周丛藻类的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [11] 马亮. 潭江浮游植物完整性指数及水质评价 [D]. 保定: 河北大学, 2012.
- [12] 王聪. 小清河浮游生物研究及水质评价 [D]. 济南: 山东师范大学, 2017.
- [13] 徐玉萍. 上海市河道生物完整性指数评价研究及生态治理效果评价 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- [14] REYNOLDS C S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [15] KRUK C, HUSZAR V L M, PEETERS E T H M, et al. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(3): 614-627.
- [16] KRUK C, PEETERS E T H M, VAN NES E H, et al. Phytoplankton community composition can be predicted best in terms of morphological groups [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(1): 110-118.
- [17] 朱亿秋, 吕俊, 李乔臻, 等. 亚热带水库浮游植物群落季节变化及其与环境的关系: 两种功能群分类法的比较 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2079-2086. (ZHU Yiqiu, LU Jun, LI Qiaozhen, et al. Seasonal variation of phytoplankton community and its relationship with environment in sub-tropical reservoirs: a comparison between two methods of functional groups classification [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 2079-2086. (in Chinese))
- [18] 钱烁统, 刘凌, 陈宁, 等. 河生藻类形态功能群分布及其与环境因子关系的分析 [J]. *水电能源科学*, 2018, 36(6): 146-149. (QIAN Shuotong, LIU Ling, CHEN Ning, et al. Distribution of fluvial planktonic algae based on functional group and its correlations with environment factors [J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(6): 146-149. (in Chinese))
- [19] 杨毓, 卢金锁, 张颖. 深水型水库藻类形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征 [J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 121-128. (YANG Yu, LU Jinsuo, ZHANG Ying. Seasonal succession characteristics of the morphologically-based functional groups (MBFG) in deep-water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 121-128. (in Chinese))
- [20] CUPERTINO A, GÜCKER B, VON RÜCKERT G, et al. Phytoplankton assemblage composition as an environmental indicator in routine lentic monitoring: Taxonomic versus functional groups [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 522-532.
- [21] 陈倩, 李秋华, 马欣洋, 等. FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例 [J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 4061-4071. (CHEN Qian, LI Qiuhua, MA Xinyang, et al. Comparison of functional groups of phytoplankton in FG, MFG, and MBFG: taking three reservoirs as an example in Guizhou Plateau [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4061-4071. (in Chinese))
- [22] 方国华, 袁婷, 林榕杰. 长江江苏段饮用水水源地生态风险评价 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(6): 12-16. (FANG Guohua, YUAN Ting, LIN Rongjie. Ecological risk assessment of drinking water source in Jiangsu section of Yangtze River [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6): 12-16. (in Chinese))
- [23] 陈校辉. 长江江苏段水生生物调查与研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [24] 吴聪, 徐靖, 银森录, 等. 长江下游南京段至河口近岸带底栖动物分布格局及影响因素 [J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(3): 553-560. (WU Cong, XU Jing, YIN Senlu, et al. The littoral zone macroinvertebrate

- distribution in relation to environment variables in the lower Yangtze River Channel from Nanjing to the estuary [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 553-560. (in Chinese)
- [25] 江慧, 陈惟肖. 江苏省长江岸线管控分区与措施研析 [J]. 环境影响评价, 2019, 41(4): 16-19. (JIANG Hui, CHEN Weixiao. Study on delimitation and control measures of Yangtze River shoreline resources in Jiangsu Province [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(4): 16-19. (in Chinese))
- [26] 朱逸凡, 雷智鹤, 封学军, 等. 基于 AIS 大数据的长江江苏段船舶大气污染物排放清单研究 [J]. 环境科技, 2019, 32(4): 41-46. (ZHU Yifan, LEI Zhiyi, FENG Xuejun, et al. River based on AIS big data [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(4): 41-46. (in Chinese))
- [27] 申哲民, 张涛, 马晶, 等. 富营养化与温度因素对太湖藻类生长的影响研究 [J]. 环境监测与预警, 2011, 3(2): 1-4. (SHEN Zhemin, ZHANG Tao, MA Jing, et al. Study of effects of eutrophication and temperature on algal growth in Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2011, 3(2): 1-4. (in Chinese))
- [28] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [29] 张敏. 嘉兴水域叶绿素 α 和初级生产力的时空分布特征及影响因素 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [30] 王菁, 陈家长, 孟顺龙. 环境因素对藻类生长竞争的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 52-56. (WANG Jing, CHEN Jiazhang, MENG Shunlong. The effects of environmental factors on the growth and competition of algae [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(17): 52-56. (in Chinese))
- [31] 赵海萍, 李清雪, 陶建华. 渤海湾浮游细菌分布特征及环境影响因素 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 88-94. (ZHAO Haiping, LI Qingxue, TAO Jianhua. Distribution characteristics of bacterioplankton in Bohai Bay and its environmental influence factors [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 88-94. (in Chinese))
- [32] 郑晓宇, 顾詠洁, 金妍, 等. 不同氮、磷质量浓度下四尾栅藻的生长研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2663-2668. (ZHENG Xiaoyu, GU Yongjie, JIN Yan, et al. Study on the growth of Scenedesmus quadricauda under different nutrients [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2663-2668. (in Chinese))
- [33] 娄方瑞, 刘明涛, 程光平, 等. 岩滩水库水质与浮游生物完整性灰色关联分析 [J]. 广东农业科学, 2015, 42(17): 147-152. (LOU Fangrui, LIU Mingtao, CHENG Guangping, et al. Grey relation analysis between Plankton-index of biotic integrity and water quality in Yantan reservoir [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(17): 147-152. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-11 编辑: 彭桃英)

(上接第 12 页)

- [12] 杨汉运, 黄道明, 谢山, 等. 雅鲁藏布江中游渔业资源现状研究 [J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 120-126. (YANG Hanyun, HUANG Daoming, XIE Shan, et al. Research status of fishery resources in the middle section of Brahmaputra River [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(6): 120-126. (in Chinese))
- [13] 李雷, 马波, 金星, 等. 西藏雅鲁藏布江中游裂腹鱼类优先保护等级定量评价 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 914-924. (LI Lei, MA Bo, JIN Xing, et al. Quantitative evaluation of priority conservation of the Schizothoracinae fishes in the middle Yarlung Zangbo River [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 914-924. (in Chinese))
- [14] 易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 887-893. (YI Yujun, CHENG Xi, ZHOU Jing. Research progress in habitat suitability assessment methods [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 887-893. (in Chinese))
- [15] 张陵蕾, 吴宇雷, 张志广, 等. 基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 10-13. (ZHANG Linglei, WU Yulei, ZHANG Zhiguang, et al. Determination of ecological flow regime based on eco-hydrological characteristics of fish habitat [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 10-13. (in Chinese))
- [16] 段友健. 拉萨裸裂尻鱼个体生物学和种群动态研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [17] 沈红保, 郭丽. 西藏尼洋河鱼类组成调查与分析 [J]. 河北渔业, 2008(5): 51-54. (SHEN Hongbao, GUO Li. Investigation and analysis of fish composition in Niyang River, Tibet [J]. Hebei Fisheries, 2008(5): 51-54. (in Chinese))
- [18] 张志广, 谭奇林, 钟治国, 等. 基于鱼类生境需求的生态流量过程研究 [J]. 水力发电, 2016, 42(4): 13-17. (ZHANG Zhiguang, TAN Qilin, ZHONG Zhiguo, et al. Study on ecological flow regime based on habitat requirements of fish [J]. Water Power, 2016, 42(4): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-03-13 编辑: 熊水斌)