

基于浮游植物生物完整性指数的淮河 中游水生态健康评价

周彦锋^{1,2}, 王东伟², 何利聪², 俞振飞¹, 尤洋^{1,2*}

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;
2. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘要: 于2019年6月(平水期)、9月(丰水期)以及2020年2月(枯水期), 在淮河中游三河尖至洪山头段, 设置了28个采样断面, 进行浮游植物及水环境质量调查。基于淮河中游浮游植物群落结构及浮游植物形态功能群(Morphologically Based Functional Group, MBFG)分类数据, 对3个水文期的水环境分别构建浮游植物生物完整性指数(P-IBI)评价体系, 并进行生态健康评价。采用综合营养状态指数, 作为划分标准判定参照断面和受损断面, 并对候选指标进行分布范围检验、相关性检验和判别能力分析, 筛选出各水文期的P-IBI核心参数, 并采用比值法, 确定分级评价标准, 对淮河中游的水环境进行水生态健康评价。研究表明, 在淮河中游的水体中, 共鉴定出浮游植物8门128种, 形态功能群分类中的7类功能群在3个水文期都有检出; 平水期的浮游植物优势功能群为Ⅲ类功能群+Ⅳ类功能群+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群, 丰水期的为Ⅲ类功能群+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群, 枯水期的为Ⅰ类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群; 平水期、丰水期和枯水期的水生态健康等级分别为亚健康、中度干扰和轻度干扰, 全年75.00%的调查断面健康状态处于轻度干扰及以上水平, 整体水生态修复成效较好, 水生态健康状况呈现出下游优于上游, 闸下优于闸上的分布格局。

关键词: 淮河中游; 浮游植物; 功能群; 生物完整性指数; 水生态健康评价

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2024)04-477-10

随着现代化发展持续推进, 河流生态系统服务功能逐渐多元化, 但是河流生物多样性下降、水文连通性降低、周边环境异质性复杂等问题加剧了河流生态系统的脆弱性^[1]。河流生态系统健康评价是提升河流生态系统质量和稳定性的重要方法^[2]。

生物完整性指数(IBI)作为典型的河流生态健康综合指标评价方法^[3], 在黄柏河^[4]、密云水库上游河流^[5]和金沙江黑水河^[6]等河流生态健康评估及修复中提供了重要参考, 而选择合适的指示物种是建立生物完整性指数评价体系的基础。浮游植物在水生态系统中具有分布广泛、物种多样、结构简

单和迁移能力弱等特点, 对水环境改变响应迅速, 常作为水生态系统健康和水质评价的指示生物^[7]。此外, 浮游植物作为水生态系统的主要生产者, 其可通过反馈机制影响上层食物网结构, 改变水生态系统物质循环和能量流动状态, 进而推动水生态系统健康的演变^[8]。

淮河位于长江流域和黄河流域之间, 承担着淮河流域生态和工农业用水的任务。淮河流域曾发生过多起重大水体污染事件, 其生态环境遭到严重破坏^[9]。淮河修建了多座水库和闸坝, 以解决水资源短缺和水患问题, 其横向、纵向水文连通性受到极大影响^[10]。因此, 开展淮河生态健康评价,

收稿日期: 2023-09-07; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 安徽省重点水域水生生物资源监测项目(ZF2021-18-0786)、中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD65)、中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费资助项目(2023JBFM09)和国家农业科学渔业资源环境滨湖观测实验站项目(NAES013FS05)资助。

作者简介: 周彦锋(1979—), 男, 江苏省无锡人, 博士研究生, 副研究员, 从事渔业生态与资源保护研究。E-mail: zhouyf@ffrc.cn

*通讯作者: 尤洋, 研究员。E-mail: youy@ffrc.cn

明晰淮河中游存在的主要生态问题,对淮河流域社会经济和自然生态的稳步发展具有重要意义。本研究以淮河中游三河尖至洪山头段为研究区,构建基于浮游植物的生物完整性P-IBI指数的评价体系,探究淮河中游浮游植物的完整性和水生态环境健康状况,为淮河治理和生态修复提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样断面设置

淮河中游三河尖至洪山头段全长366 km,其中三河尖至蚌埠闸段全长220 km;蚌埠闸至洪山头段全长146 km。共设置了28个采样断面(图1),其中,断面1至断面6位于临淮岗闸上,断面7至断面22位于临淮岗闸下至蚌埠闸上,断面23至断面28位于蚌埠闸下。依据水文特征,于2019年6月(平水期)、9月(丰水期)以及2020年2月(枯水期),开展浮游植物和水环境调查工作。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 河水样品

水质理化指标为水体叶绿素a含量、水温、pH、溶解氧含量、水深、总磷含量、浊度、透明度、溶解性总磷含量、磷酸盐含量、总氮含量、溶解性总氮含量、氨氮含量、亚硝态氮含量和高锰酸盐指数。按照《水和废水监测分析方法》^[11],测定以上指标,并依据《地表水资源质量评价技术规程》^[12],进行评价。利用多功能水质检测仪,现场测定水温、浊度、pH、透明度、水深和溶解氧含量。采用酸式滴定法,测定高锰酸盐指数。采用钼酸铵分光

光度法,测定总磷、溶解性总磷和磷酸盐含量。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,测定总氮和溶解性总氮含量。采用纳氏试剂分光光度法,测定氨氮含量。采用紫外分光光度法,测定亚硝态氮含量。采用丙酮提取分光光度法,测定叶绿素a含量。

1.2.2 浮游植物样品

按照《淡水浮游生物研究方法》,采集浮游植物样品^[13],主要依据《淡水微型生物与底栖动物图谱(第二版)》^[14]和《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[15],进行鉴定。利用25号浮游生物网,采集定性样品,在0.5 m水深处,呈“∞”型拖拉5 min,在10×40倍光学显微镜下,检测并分类。利用1 L采水器,在水深0.5 m处,采集定量样品,立即加入15 mL鲁哥试剂,于实验室静置,沉淀浓缩并定容至25 mL,待镜检。对量小而个体大的物种在10×10倍下全片计数。每个样品计数两片,取平均值。若两片计数结果相差15%以上,则进行第3片计数,取其中个数相近的两片的平均值。最后换算成每升水样中藻类的细胞个数,即为细胞数量(cells/L)。由于浮游植物的比重接近1,故可以直接由浮游植物的体积换算为生物量(湿质量),即生物量为浮游植物的数量乘以各自的平均体积,单位为mg/L。

1.2.3 综合营养状态指数

基于叶绿素a含量、总氮含量、总磷含量、透明度和高锰酸盐指数,计算综合营养状态指数(TLI),评价淮河中游水体营养状态^[16]。

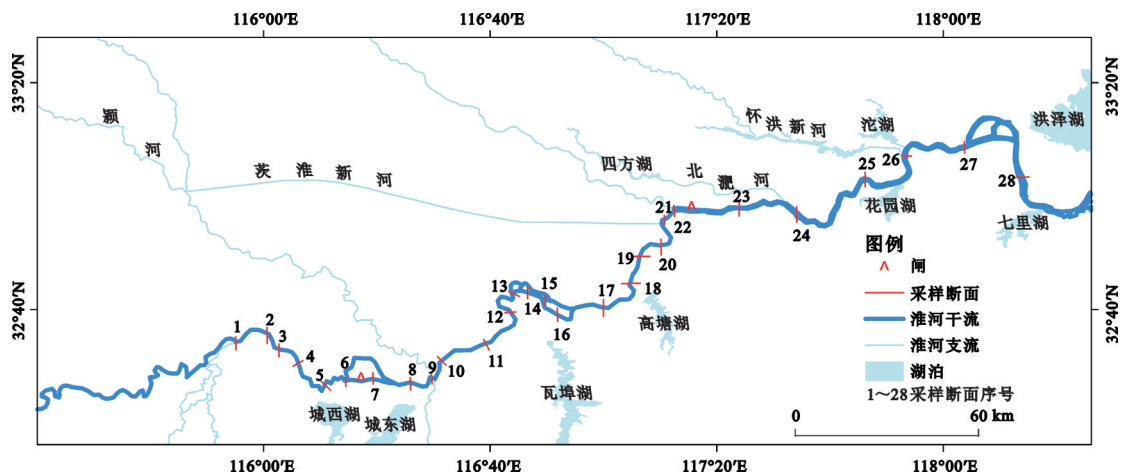


图1 研究区与采样断面分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling area and cross-section

综合营养状态指数的计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^n W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

公式(1)中, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种指标所占综合营养状态指数的权重; $TLI(j)$ 为第 j 种指标的综合营养状态指数。综合营养状态指数评价结果分级标准为: 30~50 为中营养; >50~60 为轻度富营养; >60~70 为中度富营养。

1.3 P-IBI体系构建

1.3.1 参照断面与受损断面的选取

参照断面与受损断面的选定,是建立生物完整性评价体系的前提,也是评价量纲准确的基础。综合考虑研究区水文特征及周边人居环境,本研究依据综合营养状态指数作为判定水质富营养化程度的标准^[17-18],对3个水文期的水体综合营养状态指数进行计算,选择富营养化程度较小的采样断面为参照断面,其他为受损断面。

1.3.2 候选参数筛选

候选参数选择是构建生物完整性指数体系的关键,依据研究区浮游植物群落结构特征,选择浮游植物种类、细胞密度、生物量、群落多样性指数和浮游植物功能群等46个候选参数^[19](表1)。在对候选指标进行统计后,通过分布范围分析、判别能力分析和相关性分析等步骤,剔除判别能力较差以及信息高度重叠的指标,得到核心指标,进行

最终的P-IBI得分计算^[20]。

1.3.3 得分及评价方法

参照文献[21]和[22],选取比值法,计算P-IBI得分。随干扰升高的参数,以95%为最佳期望值计算,计算方法为:分值=实际值/最佳期望值;随干扰下降的参数,以5%为最佳期望值计算,计算方法为:分值=(最大值-实际值)/(最大值-最佳期望值),各参数结果之和为最终得分。以P-IBI最终得分的95%分位数作为最佳期望值,界定健康状态得分,再将最终得分范围进行四等分,对应亚健康、轻度干扰、中度干扰和重度干扰四种生态健康状态。

1.4 数据处理

利用Excel 2016软件,进行数据处理。利用OriginPro 2020软件,完成制图及部分数据分析。利用SPSS 26.0软件,进行差异分析。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落及功能群分布特征

共鉴定出浮游植物8门128种,其中,绿藻门物种数最多(63种,49.22%),其次为硅藻门(28种,21.88%)和蓝藻门(18种,14.06%)。7种浮游植物形态功能群在3个水文期都鉴定到,以相对生物量大于10%为优势功能群判定标准,存在I类功能群、III类功能群、IV类功能群、V类功能群和VI类

表1 46个候选生物参数
Table 1 46 candidate metrics

候选参数					
M1 蓝藻物种数	M2 硅藻物种数	M3 绿藻物种数	M4 浮游植物香农-威纳指数	M5 浮游植物丰富度指数	M6 浮游植物均匀度指数
M7 蓝藻门密度	M8 硅藻门密度	M9 绿藻门密度	M10 蓝藻门生物量	M11 蓝藻门生物量	M12 蓝藻门生物量
M13 蓝藻门密度占比	M14 蓝藻门密度占比	M15 蓝藻门密度占比	M16 蓝藻门生物量占比	M17 蓝藻门生物量占比	M18 蓝藻门生物量占比
M19 I类功能群密度	M20 II类功能群密度	M21 III类功能群密度	M22 IV类功能群密度	M23 V类功能群密度	M24 VI类功能群密度
M25 VII类功能群密度	M26 I类功能群密度占比	M27 II类功能群密度占比	M28 III类功能群密度占比	M29 IV类功能群密度占比	M30 V类功能群密度占比
M31 VI类功能群密度占比	M32 VII类功能群密度占比	M33 I类功能群生物量	M34 II类功能群生物量	M35 III类功能群生物量	M36 IV类功能群生物量
M37 V类功能群生物量	M38 VI类功能群生物量	M39 VII类功能群生物量	M40 I类功能群生物量占比	M41 II类功能群生物量占比	M42 III类功能群生物量占比
M43 IV类功能群生物量占比	M44 V类功能群生物量占比	M45 VI类功能群生物量占比	M46 VII类功能群生物量占比		

功能群共5类优势功能群,其中 I 类功能群在枯水期相对生物量最高,占总生物量的48.24%; III类功能群在平水期和丰水期形成优势,相对生物量分别为13.71%和16.30%; IV类功能群仅在平水期形成优势,相对生物量占比为10.98%; V类功能群在平水期和丰水期相对生物量都最高,分别为40.22%和49.62%; VI类功能群在平水期、丰水期和枯水期都形成优势,相对生物量分别为25.00%、10.61%和37.01%。浮游植物形态功能群特征及

分类^[20,23]见表2,其各水文期相对生物量及相对丰度见图2。

2.2 P-IBI 构建结果

2.2.1 参照断面及受损断面

对各水文期综合营养状态指数进行计算,平水期、丰水期和枯水期分别以55、60和53为基准,判定参照断面和受损断面(表3)。其中,平水期、丰水期和枯水期受损断面数量占比分别为57.14%、67.86%和53.57%。

表2 淮河中游浮游植物形态功能群(MBFG)组成

功能群	功能群特征	代表种属
I类	高比表面积的小型藻,体型小,吸收营养盐迅速,生长快,对水体中总氮、总磷浓度敏感	衣藻(<i>Chlamydomonas</i>)、针晶蓝纤维藻(<i>Dactylococcopsis raphidioides</i>)、小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)
II类	金藻门(个体小、有鞭毛、有硅质细胞壁),沉降速度较低,混合营养型	圆筒形锥囊藻(<i>Dinobryon cylindricum</i>)、鱼鳞藻(<i>Mallomonas</i> sp.)、黄群藻(<i>Synura</i>)
III类	高比表面积的大型丝状体,具伪空胞,体型大、生长慢,可适应光限制水体,捕食压力小,部分种类可以固氮	鱼腥藻(<i>Anabaena</i>)、颤藻(<i>Oscillatoria</i>)、螺旋藻(<i>Spirulina</i>)
IV类	无明显特征的中型藻,资源获取能力中等,捕食压力较高,沉降速率中等偏低	华丽四星藻(<i>Tetrastrum elegans</i>)、爪哇栅藻(<i>Scenedesmus javaisis</i>)、空星藻(<i>Coelastrum sphaericum</i>)
V类	中大型单细胞藻,有鞭毛,资源获取能力中等,捕食压力中等较高,沉降速率中等偏低,部分种类具异养功能,可于低营养水体占优	裸藻(<i>Euglena</i>)、裸甲藻(<i>Gymnodinium</i>)、嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)
VI类	无鞭毛带硅质细胞壁的藻,资源获取能力中等,细胞密度大、无运动能力,沉降速率高,可产生休眠孢子,在底泥中形成种源库	针杆藻(<i>Synedra</i>)、谷皮菱形藻(<i>Nitzschia palea</i>)、梅尼小环藻(<i>Cyclotella meneghiniana</i>)
VII类	低比表面积的大型群体,有胶被,营养盐吸收能力较差,营养盐半饱和浓度高,可在群体内储存营养盐,捕食压力低,几乎无沉降损失	旋折平裂藻(<i>Merismopedia convolute</i>)、微囊藻(<i>Microcystis</i>)

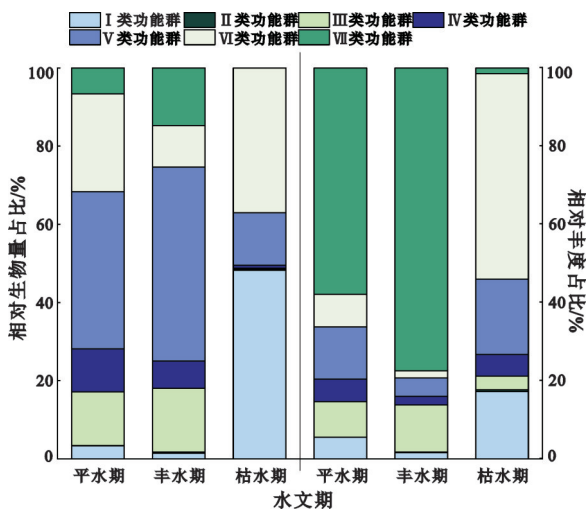


图2 淮河中游浮游植物功能群相对生物量及相对丰度
Fig.2 Relative biomass and relative abundance of phytoplankton functional groups in the middle reaches of Huaihe River

2.2.2 候选参数

对候选参数数据矩阵进行筛选,剔除超过10%为零值及变化范围较窄的候选参数,平水期、丰水期和枯水期分别剩余34个、38个和34个候选参数^[20]。对初步筛选出的候选参数进行了Mann-Whitney非参数检验后,平水期、丰水期和枯水期判别力较好的候选参数分别有11个、3个和11个,对这些候选参数进行Pearson相关检验,当相关系数 $|r| > 0.85$ 时,说明两参数高度相关,保留其一^[17]。最终平水期选择参数M5、M6、M19、M23和M25;丰水期选择参数M37和M44;枯水期选择参数M5、M6、M13、M30、M31、M37和M38参与最终P-IBI得分计算和淮河中游水生态健康评价分级标准制定。

2.2.3 P-IBI得分

淮河中游各水文期入选候选参数及赋分公式

表3 淮河中游各水文期综合营养状态指数

Table 3 Comprehensive nutritional status index of each hydrological period in the middle reaches of Huaihe River

断面位置	断面序号	综合营养状态指数					
		平水期		丰水期		枯水期	
		参照断面	受损断面	参照断面	受损断面	参照断面	受损断面
临淮岗闸上	1		57.18	55.28			65.91
	2		58.11		68.38		65.25
	3		57.18		62.26		63.46
	4		59.36		61.89		64.16
	5		61.39		62.02		61.10
	6		60.80	58.68			56.08
临淮岗闸至 蚌埠闸	7		61.81		63.09		56.09
	8		62.14	52.30			56.14
	9		60.41	57.10			53.10
	10		58.43		67.82		55.15
	11	54.62			63.66		54.68
	12	52.57			64.36		53.69
	13	49.16			66.03		53.57
	14	47.93			66.82	52.76	
	15	50.45			63.44	52.54	
	16	50.31			63.97		53.28
	17	50.31			63.97		53.28
	18	47.93			66.82	52.76	
	19	50.46			60.85	52.66	
	20		55.13		60.81	52.83	
	21		57.25		62.59	52.05	
	22	52.99		56.21		52.70	
蚌埠闸下	23	54.03		57.68		52.83	
	24		64.11	54.00		51.29	
	25		60.22		64.98	51.53	
	26		56.01	49.93		49.44	
	27	55.16		68.31		49.93	
	28	54.47		52.59		51.75	

见表4,计算得到生态健康评价标准(表5)。淮河中游3个水文期的P-IBI得分显示,其水生态健康状况为健康、亚健康、轻度干扰的占比分别为15.48%、30.95%和28.57%,总体水生态健康状况修复成果较好。其中,平水期健康、亚健康、轻度干扰占比分别为32.14%、21.43%和32.14%,整体处于轻度干扰状态;丰水期占比分别为7.14%、10.71%和25.00%,整体处于中度干扰状态;枯水

期占比分别为7.14%、60.71%和28.57%,整体处于亚健康状态。平水期临淮岗闸至蚌埠闸段浮游植物P-IBI得分显著大于临淮岗闸上($p < 0.05$),与蚌埠闸下无显著差异;丰水期各区域浮游植物P-IBI得分都无显著差异;枯水期临淮岗闸至蚌埠闸段浮游植物P-IBI得分显著小于蚌埠闸下($p < 0.05$),显著大于临淮岗闸上($p < 0.05$)。各水文期采样断面得分及分区对比见图3。

表4 淮河中游P-IBI体系候选参数分析及赋分公式

Table 4 Analysis of candidate parameters and assignment formulas for P-IBI system in the middle reaches of Huaihe River

水文期	候选参数	最大值	最小值	5%分位数	95%分位数	赋分公式	对干扰响应
平水期	M5	605 737.947	0.000	18 929.311	421 177.167	$(605737.947-M5)/(605737.947-18929.311)$	上升
	M6	643 596.569	28 393.966	28 393.966	524 341.911	$(643596.569-M6)/(643596.569-28393.966)$	上升
	M19	5 196 095.830	18 929.311	22 241.940	4 523 632.062	$(5196095.830-M19)/(5196095.830-22241.940)$	上升
	M23	1.868	0.617	0.714	1.667	$(1.868-M23)/(1.868-0.714)$	上升
	M25	0.947	0.321	0.394	0.879	M25/0.879	下降
丰水期	M37	4.746	0.000	0.009	3.794	M37/3.794	下降
	M44	0.858	0.000	0.004	0.843	M44/0.843	下降
枯水期	M5	0.243	0.000	0.011	0.211	M5/0.211	下降
	M6	0.413	0.107	0.123	0.373	M6/0.373	下降
	M13	0.752	0.175	0.292	0.702	$(0.752-M13)/(0.752-0.292)$	上升
	M30	2.516	0.072	0.072	0.636	M30/0.636	下降
	M31	4.823	0.193	0.242	2.412	$(4.823-M31)/(4.823-0.242)$	上升
	M37	1.580	0.654	0.838	1.468	$(1.580-M37)/(1.580-0.838)$	上升
	M38	0.920	0.439	0.494	0.846	M38/0.846	下降

表5 淮河中游P-IBI体系得分评价标准

Table 5 Evaluation criteria for the P-IBI system in the middle reaches of Huaihe River

水文期	健康	亚健康	轻度干扰	中度干扰	重度干扰
平水期	>4.086	>3.605~4.086	>2.403~3.605	1.202~2.403	<1.202
丰水期	>1.798	>1.348~1.798	>0.889~1.348	0.449~0.899	<0.449
枯水期	>5.238	>3.929~5.238	>2.619~3.929	1.310~2.619	<1.310

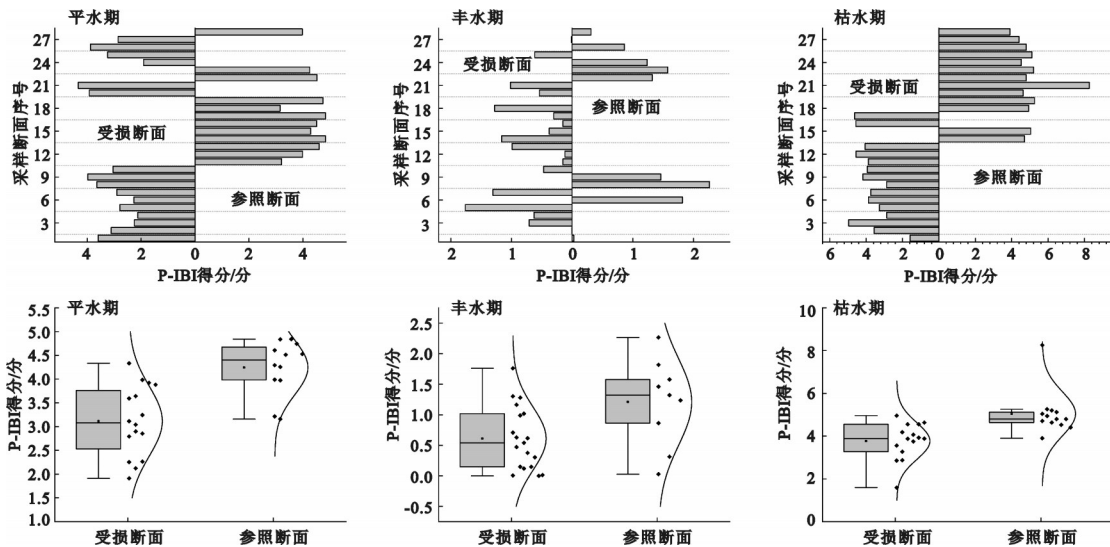


图3 各水文期淮河中游各断面P-IBI得分及对比

Fig.3 The P-IBI scores and comparisons of each hydrological period and section in the middle reaches of Huaihe River

表6 各水文期淮河中游水体的理化指标

Table 6 Physical and chemical indicators of each hydrological period in the middle reaches of Huaihe River

水文期	透明度/m	总氮质量浓度/(mg/L)	总磷质量浓度/(mg/L)	叶绿素a质量浓度/($\mu\text{g/L}$)	高锰酸盐指数(mg/L)	氨氮质量浓度/(mg/L)	综合营养状态指数
平水期	(0.25±0.17) ^{bb}	(2.44±0.46) ^{bb}	(0.13±0.04) ^{Aa}	(11.38±6.50) ^{bb}	(4.93±0.51) ^{Aa}	(0.27±0.02) ^{Aa}	(55.71±4.57) ^{bb}
丰水期	(0.46±0.10) ^{Aa}	(1.55±0.54) ^{Cc}	(0.13±0.03) ^{Aa}	(37.13±22.55) ^{Aa}	(4.87±0.60) ^{Aa}	(0.25±0.03) ^{Aa}	(61.28±5.07) ^{Aa}
枯水期	(0.29±0.13) ^{bb}	(3.59±0.38) ^{Aa}	(0.09±0.02) ^{bb}	(10.19±8.66) ^{bb}	(4.25±0.36) ^{bb}	(0.84±0.04) ^{bb}	(55.00±4.52) ^{bb}

注:表中数据为(平均值±标准误差)。同一列数据右上角大写字母不同,表示数据在0.01水平下差异显著;小写字母不同,表示数据在0.05水平下差异显著。

2.3 P-IBI结果与环境因子的关系

淮河中游水体总氮平均质量浓度为(2.53±0.96) mg/L, 3个水文期差异显著($n=28, p<0.01$), 都超过地表水V类水域标准, 其中, 枯水期总氮含量最高(表6)。总磷平均质量浓度为(0.12±0.03) mg/L, 其中, 枯水期总磷含量显著小于平水期和丰水期($n=28, p<0.01$), 平水期与丰水期都达到地表水Ⅲ类水域标准, 枯水期则达到地表水Ⅱ类水域标准。高锰酸盐指数平均值为(5.45±0.59) mg/L, 枯水期与平水期、丰水期差异显著($n=28, p<0.01$), 3个时期都符合地表水Ⅲ类水域标准。叶绿素a平均质量浓度为(20.12±20.10) $\mu\text{g/L}$, 丰水期含量显著大于平水期和枯水期($n=28, p<0.01$), 其中平水期与枯水期为轻度富营养化状态, 丰水期则为中度富营养状态。以叶绿素a为基准参数, 计算得出的综合营养状态指数全年平均值为57.33±5.50, 丰水期显著大于平水期和枯水期($n=28, p<0.01$), 评价结果与叶绿素a指示的水体营养状态一致。

对3个水文期的P-IBI得分与水质理化指标进行相关分析, 结果显示各水文期影响P-IBI得分的影响因子存在较大差异(图4)。丰水期与其他两个水文期差异最大, 其P-IBI得分与水质理化因子都不显著相关, 平水期P-IBI得分的主要影响因子为透明度和氨氮含量, 枯水期的主要影响因子为总氮含量和高锰酸盐指数。

3 讨论

各水文期淮河中游浮游植物形态功能群的分布存在差异, 3个水文期浮游植物优势功能群演变趋势为平水期的Ⅲ类功能群+Ⅳ类功能群+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群→丰水期的Ⅲ类功能区+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群→枯水期的Ⅰ

类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群, 其中Ⅳ类浮游植物功能群仅在平水期形成优势, 其喜高光、营养充足环境与淮河中游平水期水文特征相符^[24]。Ⅶ类浮游植物功能群在丰水期形成优势, 其多为具有胶被、低体表面积比的大型团藻^[25], 沉降损失小, 在淮河丰水期水位频繁变动的环境中易于生存。枯水期的低温环境使对有机质和水温敏感的Ⅲ类浮游植物功能群生长速度降低, Ⅰ类浮游植物功能群得到一定生存空间, 并形成优势, 这与长江干流江苏段^[20]浮游植物形态功能群的变化相似。主要以硅藻组成的Ⅵ类浮游植物功能群在3个水文期都形成优势, 或与其对光照不敏感、耐受水流冲刷的特性有关^[26]。Ⅴ类浮游植物功能群在平水期和丰水期相对生物量较大, 可能与Ⅴ类功能群多为具有鞭毛的中大型单细胞藻类, 在获取资源时可随环境变化及时调整水层有关^[25]。闸坝建设和支流汇入等因素使淮河中游水体流态在各水文期间处于波动状态^[27], 这或是Ⅵ类浮游植物功能群和Ⅴ类浮游植物功能群能形成长期优势的原因之一。

单因子评价结果显示, 淮河中游各水文期水体总氮含量超标, 达地表水V类水域标准。综合营养状态指数评价结果显示, 淮河中游平水期和枯水期水体为轻度富营养化状态, 丰水期则为中度富营养状态。两种评价方法都基于理化指标, 反映了水体的瞬时状态^[17]。单因子评价法以最劣指标为评价依据, 评价结果常较实际状况差; 综合营养状态指数则基于多理化指标进行综合评价, 可以相对全面地反映水体的营养状态, 因此以此作为生物完整性指数选定参照断面和受损断面的依据。

浮游植物群落结构受水动力学、营养盐浓度和气候变化等多因素的联合效应以及长期效应影

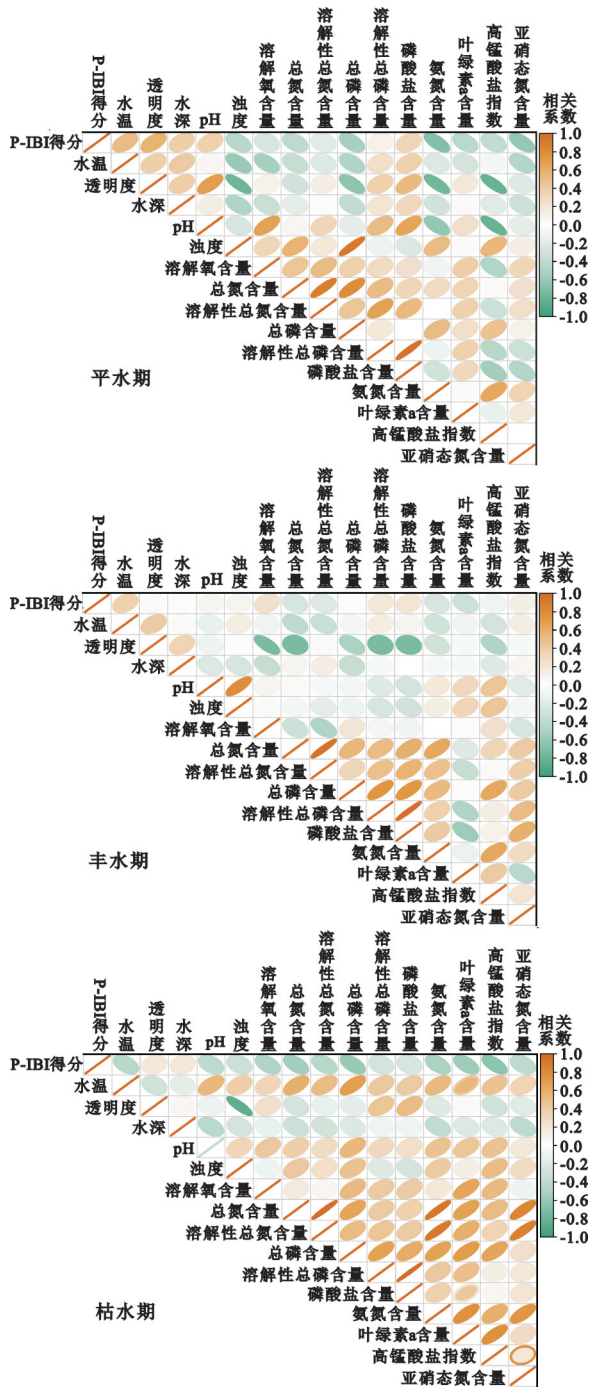


图4 各水文期P-IBI得分与水质理化因子相关系数
 Fig.4 The correlation coefficients between P-IBI score and water quality physicochemical factors in each hydrological period

响,其群落结构变化可以对水质情况作出最直接的响应^[28]。浮游植物生物完整性指数可以描述水域浮游植物物种构成、多样性和功能单元情况,对特定生物群落生态环境状态进行综合反映^[29]。在本研究中,淮河中游全年75.00%的采样断面健康

状态处于轻度干扰及以上水平,这说明淮河中游水域总体水生态恢复情况较好。各水文期间水生态健康状况存在差异,丰水期水生态健康状况最差,57.14%的采样断面处于中度干扰及以下水平,远高于平水期的14.29%和枯水期的3.57%,这与其他研究结果类似^[30]。此外,淮河中游丰水期极大的水流量以及河道的冲刷作用会将水体的营养盐稀释,对浮游植物的生长造成影响。丰水期水质理化因子与P-IBI得分都不显著相关,也印证了丰水期淮河中游的水生态健康状况可能多与风速、水体流速以及航道运行状态等其他影响因素相关^[31]。

空间分布上,各水文期调查断面的水生态健康状况的变化存在差异,水生态健康状况下游优于上游、闸下优于闸上,这与额尔齐斯河^[32]、拉林河^[29]和浑河^[33]等的生态健康状况差异较大,其原因可能是临淮岗闸上游承接淮河南岸最大支流史灌河和一级支流洪汝河水体,以及临淮岗闸过船强度大,船舶滞留待闸等原因,加剧水体生境脆弱性,对浮游植物生物完整性产生影响。蚌埠闸下游基本无大型支流汇入,并且依靠蚌埠闸对上游水体的分流管控,减轻了下游水体的污染压力,因此浮游植物生物完整性较高。潮河干流^[5]和梁滩河^[34]等河流也存在此类现象,说明河流纵向水文连通性、工农业废水排放对河流的生态健康状况影响巨大,在水利设施的建设和使用以及污水排放的过程中,应该明确河流生态系统的承受能力,确保河流水生态环境的动态平衡。

在本研究中,在不同水文期对46个基础候选参数进行筛选,确保最终参与得分计算候选参数的独立性和敏感性,进而直观描述淮河中游浮游植物的生物完整性。淮河中游不同水文期河流整体生态健康状况不同,分别为亚健康(枯水期)、轻度干扰(平水期)和轻度干扰(丰水期)。虽然各水文期75.00%的采样断面水体生态健康状况在轻度干扰及以上,但是淮河中游水域水生态受损的情况仍然客观存在。P-IBI参照断面的选取常选择无干扰或干扰较少断面,而基于淮河中游水体实际营养状态,本研究中部分参照断面的健康状况仍不理想,结果说明存在其他因素对P-IBI结果产生影响。在今后的研究中,应该监测并探索不同时空尺度下其他数据类型于P-IBI评价体系的应

用,更详实地反映水域水生态健康状况,为淮河中游水生态恢复提供建议。

4 结 论

平水期的淮河中游浮游植物优势形态功能群为Ⅲ类功能群+Ⅳ类功能群+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群,丰水期的为Ⅲ类功能群+Ⅴ类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群,枯水期的为Ⅰ类功能群+Ⅵ类功能群+Ⅶ类功能群。淮河中游水域大多处于轻度干扰及以上水平,水生态修复成效较好,但是水生态受损的情况依旧存在。因此,在持续关注淮河中游水体健康状况的同时,需加大对淮河中游沿岸工农业产生的点源及面源污染管控力度,在不同水文期因时、因地采取适宜的管理措施,以保障淮河水生态健康,促进淮河水资源的可持续发展。

参考文献

- [1]杨素,万荣荣,李冰.太湖流域水文连通性:现状、研究进展与未来挑战[J].湖泊科学,2022,34(4):1055-1074.
- [2]田震,敖偲成,李先福,等.高黎贡山南段河流生态系统健康评价[J].水生态学杂志,2023,44(1):25-33.
- [3]KARR J M. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [4]张坤,李卫明,陈圣盛,等.基于大型底栖动物的黄柏河河流健康评价[J].长江流域资源与环境,2022,31(10):2218-2229.
- [5]王旭,王恒嘉,王永刚,等.基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的密云水库上游河流(北京段)水生态健康评价[J].生态与农村环境学报,2022,38(2):157-167.
- [6]邵星辰,张琪,苏巍,等.基于鱼类生物完整性的金沙江黑水河健康评估及修复模式探讨[J].长江流域资源与环境,2022,31(1):104-112.
- [7]HILL B H, HERLIHY A T, KAUFMANN P R, *et al.* Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity[J]. Freshwater science, 2000, 19(1): 50-67.
- [8]钱玺亦,李金彪,敖文,等.呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,2022,34(6):1814-1827.
- [9]张永勇,夏军,王纲胜,等.淮河流域闸坝联合调度对河流水质影响分析[J].武汉大学学报(工学版),2007,187(4):31-35.
- [10]蒋艳,彭期冬,骆辉煌,等.淮河流域水质污染时空变异特征分析[J].水利学报,2011,42(11):1283-1288.
- [11]国家环境保护局本书编委会.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002:243-280.
- [12]中华人民共和国水利部.地表水资源质量评价技术规程:SL3952007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [13]章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1995:18-356.
- [14]周凤霞.淡水微型生物与底栖动物图谱[M].北京:化学工业出版社,2011:37-187.
- [15]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,2006:23-93.
- [16]周彦锋,宋江腾,刘凯,等.怀洪新河浮游植物群落结构与水文环境因子的关系研究[J].生态科学,2017,36(1):35-42.
- [17]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[J].上海师范大学学报(自然科学版),2021,50(1):39-49.
- [18]何晨凤.基于M-IBI和P-IBI的湖泊生态系统健康和生物完整性机制研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.
- [19]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[J].生态与农村环境学报,2021,37(4):501-508.
- [20]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.
- [21]苏梦,董伟萍,赵世高,等.基于大型底栖动物完整性指数的河湖生态系统健康评价:以安徽铜陵为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(1):104-112.
- [22]陈庆,柴一涵,王天鹅,等.基于浮游动物完整性的扎龙湿地水生态状况评价[J].中国环境监测,2022,38(5):87-95.
- [23]KRUK C, HUSZARV 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.
- [24]胡初,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[J].湖泊科学,2015,27(1):11-23.
- [25]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[J].环境科学,2020,41(3):1265-1275.
- [26]杨毓,卢金锁,张颖.深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征[J].环境科学,2017,38(1):121-128.
- [27]吕海深,丁然,朱永华.淮河流域闸坝对径流量的影响分析[J].中国农村水利水电,2020,450(4):166-171,176.
- [28]CUI G Y, WANG B L, XIAO J, *et al.* Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in Karst hydroelectric reservoirs[J]. Journal of hydrology, 2021, 592: 125607.
- [29]单涛,袁安龙,黄子芮,等.拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价[J].环境科学,2023,44(3):1465-1474.
- [30]邱阳凌,林育青,刘俊杰,等.淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J].环境科学学报,2018,38(4):1665-1672.
- [31]杨晓曦,刘凯,刘燕,等.淮河中游浮游植物群落结构时空格局及影响因子[J].长江流域资源与环境,2022,31(10):2207-2217.
- [32]田盼盼,桑翀,马徐发,等.基于周丛藻类群落结构的新疆额尔齐斯河生态健康评价[J].生态学报,2022,42(2):778-790.

[33]张赛赛, 高伟峰, 孙诗萌, 等. 基于鱼类生物完整性指数的浑河流域水生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(10): 1570-1577.

[34]张方辉, 黄河清, 李雪飞, 等. 基于底栖动物完整性指数(B-IBI)的水生态健康评价: 以梁滩河和濑溪河为例[J]. 环境影响评价, 2019, **41**(6): 79-85.

Assessment of Water Ecological Health in the Middle Reaches of Huaihe River based on Phytoplankton Biological Integrity Index

ZHOU Yanfeng^{1,2}, WANG Dongwei², HE Licong², YU Zhenfei¹, YOU Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, P.R.China;

2. Wuxi Fishery College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, Jiangsu, P.R.China)

Abstract: In June 2019 (flat water period), September (wet season) and February 2020 (dry season), 28 sampling sections were set up in the section from Sanhejian to Hongshantou in the middle reaches of Huaihe River to conduct phytoplankton and water quality environmental surveys. Based on the taxonomic data of phytoplankton community structure and morphologically based function group (MBFG) in the middle reaches of Huaihe River, the phytoplankton biological integrity index (P-IBI) evaluation system was constructed for the three hydrological periods, and the ecological health was evaluated. The comprehensive trophic status index was used as the classification standard to determine the reference section and the damaged section, and the distribution range test, correlation test and discrimination ability analysis of the candidate indicators were carried out to screen out the core parameters of P-IBI in each hydrological period, and the ratio method was used to determine the grading evaluation standard, and the water ecological health evaluation of the middle reaches of the Huaihe River was evaluated. The results showed that a total of 128 species and 8 phyla of phytoplankton were identified in the middle reaches of Huaihe River, and 7 functional groups were detected in the three hydrological periods in the phytoplankton morphological functional group classification, and the dominant phytoplankton functional groups were III+IV+V+VI (flat water period), III+V+VI+VII (wet season), and I+VI+VII (dry season). The water ecological health grades of “sub-health”, “moderate disturbance” and “mild disturbance” were respectively “sub-healthy”, “moderate disturbance” and “mild disturbance” during the normal water period, wet water period and dry water period, respectively, and 75.00% of the health status of the survey section was at the level of “slight disturbance” or above, indicating that the overall water ecological restoration effect was good, and the water ecological health status showed a distribution pattern that the downstream was better than the upstream, and the lower part of the sluice was better than the upper sluice. The evaluation results well reflect the water ecological health status of different hydrological periods and river sections in the middle reaches of Huaihe River, which can provide data support and theoretical basis for the governance and water ecological restoration of Huaihe River.

Keywords: middle reaches of Huaihe River; phytoplankton; functional group; biological integrity index; assessment of water ecological health