

2016—2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素*

赵晏慧¹, 李 韬², 黄 波¹, 冯艳玲¹, 雷明军¹, 卓海华¹, 吴云丽^{1**}

(1: 生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010)

(2: 湖北省生态环境厅武汉生态环境监测中心, 武汉 430022)

摘 要: “十三五”时期, 长江流域水环境质量改善明显, 但湖泊水质和富营养化状况改善滞后. 长江中游作为我国淡水湖泊集中分布区域之一, 部分湖泊存在水环境质量恶化和富营养化加重问题. 本文以长江中游区域国家开展监测的洪湖、斧头湖、梁子湖、大通湖、洞庭湖和鄱阳湖这 6 个典型湖泊为研究对象, 科学评价其 2016—2020 年水质和富营养化时空变化特征及关键驱动因素, 探讨其成因及治理对策. 结果表明, “十三五”时期长江中游湖泊水质和富营养化程度存在较大差异, 与 2016 年相比, 2020 年大通湖水质改善最为明显, 梁子湖水水质变差, 总磷是影响长江中游湖泊水质类别的主要因子; 洪湖富营养程度恶化最为严重, 斧头湖次之, *TLI*(SD) 对长江中游湖泊富营养化评价贡献最大. 目前长江中游湖泊呈有机污染加重和叶绿素 *a* 浓度升高现象, 洪湖、斧头湖和梁子湖主要与氮、磷营养盐浓度升高有关, 而大通湖、洞庭湖和鄱阳湖受水文过程、流域纳污量和湖泊管理等非营养盐因素影响较大. 总氮和总磷仍然是影响“十三五”时期长江中游湖泊水质和富营养化的最主要驱动力, 且各湖泊总氮和总磷浓度变化均具有较强正相关性, 建议开展河湖氮、磷标准衔接工作, 提出河湖氮、磷标准限值或考核目标, 以完善河湖水质环境质量和生态健康影响评价技术规范. 同时, 建议长江中游湖泊在开展截污控源、内源控制和生态修复的同时, 进一步深化流域管理, 特别是对洞庭湖、鄱阳湖、梁子湖和斧头湖等跨行政区湖泊, 以提高湖泊治理与修复的系统性和整体性.

关键词: 长江中游湖泊; 水质; 富营养化; 氮磷; 有机质污染; 流域管理

Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020*

Zhao Yanhui¹, Li Tao², Huang Bo¹, Feng Yanling¹, Lei Mingjun¹, Zhuo Haihua¹ & Wu Yunli^{1**}

(1: Yangtze River Basin Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze River Basin Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecological Environment, Wuhan 430010, P.R.China)

(2: Wuhan Ecological and Environmental Monitoring Center of Hubei Provincial Department of Ecology and Environment, Wuhan 430022, P.R.China)

Abstract: During the “13th Five-Year Plan” period, the water ecological environment quality of the Yangtze River Basin has improved significantly, but the improvement of lake water quality and eutrophication has lagged behind. As one of the concentrated distribution regions of freshwater lakes in China, the middle reaches of the Yangtze River have the problems of deterioration of water quality and aggravation of eutrophication. This article chosed six typical lakes monitored by national agencies, including Lake Honghu, Lake Futou, Lake Liangzi, Lake Datong, Lake Dongting and Lake Poyang, to scientifically evaluate their spatiotemporal changes, key drivers of water quality and eutrophication from 2016 to 2020, and to discuss the degradation causes and governance countermeasures. The results revealed significant spatiotemporal changes in water quality and eutrophication of those lakes. From 2016 to 2020, the water quality of Datong Lake improved mostly, while Lake Liangzi became worse. TP is the main factor affecting the lake water quality and *TLI*(SD) is most important in the lake eutrophication evaluation. The eutrophication in Lake Honghu is

* 2021-10-20 收稿; 2022-02-09 收修改稿.

国家生态环境监测网络建设与运行项目资助.

** 通信作者; E-mail: yunliwu@126.com.

the most serious, followed by Lake Futou. The lakes in the middle reaches of the Yangtze River widely experienced increasing organic pollution and chlorophyll-*a* concentration. Such degradation in Lake Honghu, Lake Futou and Lake Liangzi is mainly related to the increase of nitrogen and phosphorus nutrients, while Lake Datong, Lake Dongting and Lake Poyang are greatly affected by non-nutrient factors such as hydrological processes, pollution holding capacity and Lake management. TN and TP are still the main drivers on the water quality and eutrophication of these lakes during the "13th Five-Year Plan" period, and change synergistically in each lake. We propose to put forward the standard limits or assessment targets of nitrogen and phosphorus in rivers and lakes, to improve their environmental quality standards of rivers and lakes and the technical specifications for ecological health impact assessment. At the same time, it is recommended that the lakes in the middle reaches of the Yangtze River should carry out pollution control, endogenous control and ecological restoration. It is important to strengthen watershed management, especially the lakes across administrative regions such as Lake Dongting, Lake Poyang, Lake Liangzi, and Lake Futou to improve the system and integrity of lake governance and restoration.

Keywords: Lakes in the middle reaches of the Yangtze River; water quality; eutrophication; nitrogen and phosphorus; organic matter pollution; watershed management

“十三五”期间,我国各地各部门共抓长江大保护格局基本确立,长江保护修复取得积极进展^[1]. 截止2020年底,长江干流全面达到Ⅱ类水质,长江流域河流Ⅰ~Ⅲ类水质断面比例由2016年的82.3%上升至2020年的96.7%,高于全国平均水平13.3%,河流水质改善明显. 但湖泊水质改善较为滞后,“老三湖”(太湖、巢湖、滇池)水质仍为Ⅳ类,营养状态在轻度-中度富营养之间,且长江流域湖泊呈富营养化加剧趋势^[2-3]. 为推进长江大保护,推动长江经济带可持续发展,沿程湖泊水生态环境问题亟需解决.

长江中游上起湖北宜昌下至江西湖口,承东启西,连南接北,是长江经济带的重要组成部分. 随着长江中游城市群纳入国家“十四五”规划纲要,长江中游水生态环境质量状况受到进一步关注. 该区域是我国淡水湖泊集中分布区域之一^[4],湖泊面积为1 km²以上的约有360个,总面积约占全国湖泊面积的12%^[5]. 这些湖泊在保障长江经济带生态、水资源、防洪等安全和促进流域经济社会发展方面发挥着不可替代的作用^[6]. 长江中游区域不如长江下游区域人类活动强度高,但也同样面临营养盐升高、富营养化加剧和生态功能受损等问题^[7]. 大通湖、洪湖、斧头湖和梁子湖等长江中游湖泊历史上长期经历围垦造田和水产养殖等活动,饱受氮、磷和有机物的污染影响^[8-12]. 鄱阳湖和洞庭湖作为通江湖泊,其水位与长江相互作用,水质与入湖河流氮磷含量密切相关^[13-14]. 氮磷的外源输入和内源释放一直是影响湖泊水质和富营养化的主要原因^[15].

2016年1月习近平总书记提出“共抓大保护、不搞大开发”,《长江岸线保护和开发利用总体规划》《长江经济带发展规划纲要》《长江经济带生态环境保护规划》《长江保护修复攻坚战行动计划》等文件相继印发实施,长江生态环境保护与治理得到空前加强^[1,16]. 但2020年长江中游湖泊中出现富营养化的湖泊比例较2016年上升33.3%,湖泊治理效果并不理想,且目前缺乏对长江中游湖泊“十三五”时期的对比分析研究. 本文以长江中游区域6个典型湖泊为研究对象,科学评价其2016—2020年水质和富营养化时空变化特征,揭示该时期影响长江中游湖泊水质和富营养化的关键驱动因素,探求湖泊治理对策,为长江流域湖泊水生态环境治理和修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

长江中游(宜昌市至湖口县江段)长955 km,流域面积68万 km². 按照《“十三五”国家地表水环境质量监测网设置方案》(环监测[2016]30号)要求面积在100 km²(或储水量在10亿 m³以上)的重要湖泊以及重要跨国界湖库设置监测断面,长江中游开展监测的湖泊共有6个:洪湖、斧头湖、梁子湖、大通湖、洞庭湖和鄱阳湖(图1),主要涉及湖北、湖南和江西3个省份. 除洞庭湖和鄱阳湖2个通江湖泊外,洪湖和梁子湖水域面积较大,大通湖和斧头湖次之. 其中,洪湖和大通湖考核单个行政区,梁子湖、斧头湖、鄱阳湖和洞庭湖考核多个行政区. 各湖泊的基本信息情况详见表1.

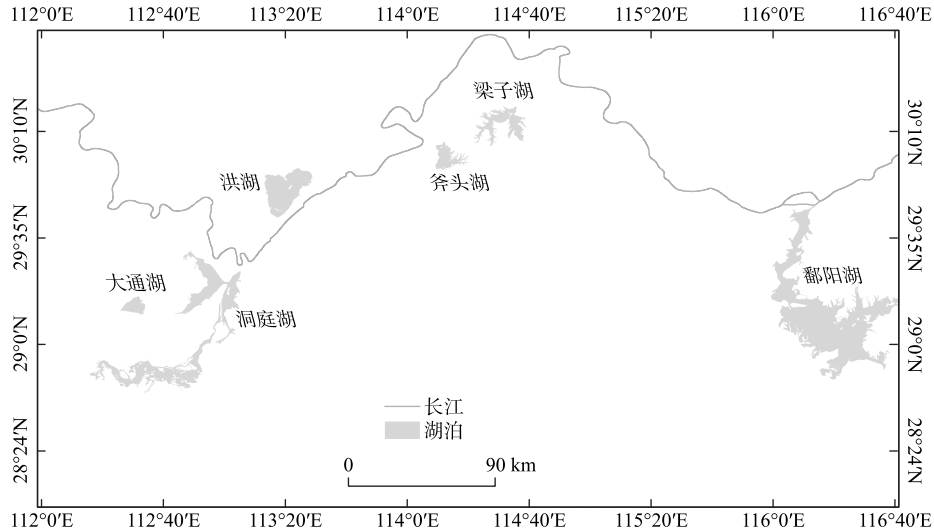


图1 长江中游6个湖泊位置示意图

Fig.1 Distribution of six lakes in the middle reaches of the Yangtze River

表1 长江中游6个湖泊基本信息*

Tab.1 Basic information of the six lakes in the middle reaches of the Yangtze River

湖名	面积/km ²	平均水深/m	贮水量/(×10 ⁸ m ³)	所在省份	涉及城市
洪湖	402	1.9	7.5	湖北	荆州市
斧头湖	128	1.6	2	湖北	武汉市/咸宁市
梁子湖	256	2.5	6.5	湖北	武汉市/鄂州市
大通湖	159	1.6	2.5	湖南	益阳市
洞庭湖	2691	6.5	178	湖南	岳阳市/益阳市/常德市
鄱阳湖	3960	6.5	259	江西	南昌市/九江市/上饶市

* 湖泊面积与贮水量等资料主要来源于文献[17],部分来自文献[18].

1.2 数据来源

本研究采用国家地表水环境质量监测网中长江流域2016—2020年的月监测数据,国家监测断面数据的采样方式、测定方法和操作步骤等均按《国家监测国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书》要求进行.水质类别评价指标包括《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(DO)、氟化物(F⁻)、pH和水温等21项^[19].富营养化评价指标包括《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(总站生字[2001]090号)规定的总氮(TN)、总磷(TP)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a (Chl. a)共5项.

1.3 数据处理

水质类别按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办[2011]22号)进行评价.湖泊富营养化按照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(总站生字[2001]090号)进行评价^[20-21].

运用Canoco 5.0软件分别对6个湖泊监测指标进行主成分分析,根据去趋势分析(detrended correspondence analysis, DCA)的结果(前两轴轴长<3),选择线性模型—主成分分析分析(principal components analysis, PCA)来解析主要影响变量.

湖泊地理分布情况通过ArcGIS 10.2软件绘制,各监测指标采用SPSS 18.0进行统计和分析,使用Ori-

gin 2019 软件进行制图.

2 结果与分析

2.1 水质污染状况评价

2.1.1 水质类别变化 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)地表水水域环境功能的划分标准进行评价,2016—2020 年长江中游 6 个典型湖泊每年度水质类别情况详见表 2.

“十三五”时期,斧头湖和梁子湖始终达到或优于Ⅲ类,洞庭湖和鄱阳湖始终保持为Ⅳ类,而大通湖和洪湖在Ⅴ类左右波动.与2016 年相比,2020 年梁子湖水水质类别有所变差,大通湖水水质类别改善明显.梁子湖在2016 年水质类别为Ⅱ类,在2017—2020 年均均为Ⅲ类,水质类别近4 年较为稳定.大通湖在2016—2018 年的年度水质类别均为劣Ⅴ类,2020 年提升2 个水质类别至Ⅳ类,水质明显改善.斧头湖、鄱阳湖和洞庭湖3 个湖泊水质类别在整个“十三五”时期均未发生变化,洪湖水水质类别除2018 年下降至Ⅴ类外,其他4 年均均为Ⅳ类,总体水质类别变化较为稳定.

2.1.2 定类因子分析 “十三五”时期,长江中游6 个湖泊定类因子(决定其水质类别的污染指标)主要为TP、COD 和 COD_{Mn} .从表2 可以看出,6 个湖泊的定类因子均含有TP,其中,洪湖从2016 年的COD 逐渐转变为2020 年的TP 和COD;斧头湖除2019 年出现过COD 外,其他年度均只有TP;梁子湖仅在2016 年出现过 COD_{Mn} 外,其他年份度只有TP;而大通湖、洞庭湖和鄱阳湖定类因子始终为TP.

表2 2016—2020 年长江中游6 个湖泊各年度水质类别及其定类因子情况
Tab.2 Annual water quality categories and classification factors of the studied six lakes
in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020

湖泊 名称	2016 年		2017 年		2018 年		2019 年		2020 年	
	水质 类别	定类 因子	水质 类别	定类 因子	水质 类别	定类 因子	水质 类别	定类 因子	水质 类别	定类 因子
洪湖	Ⅳ	COD	Ⅳ	COD、TP	Ⅴ	COD	Ⅳ	TP、COD、 COD_{Mn}	Ⅳ	TP、COD
斧头湖	Ⅲ	TP	Ⅲ	TP	Ⅲ	TP	Ⅲ	COD、TP	Ⅲ	TP
梁子湖	Ⅱ	COD_{Mn} 、TP	Ⅲ	TP	Ⅲ	TP	Ⅲ	TP	Ⅲ	TP
大通湖	劣Ⅴ	TP	劣Ⅴ	TP	劣Ⅴ	TP	Ⅴ	TP	Ⅳ	TP
鄱阳湖	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP
洞庭湖	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP	Ⅳ	TP

分别计算长江中游6 个湖泊“十三五”期间的定类因子浓度较研究序列第1 年(2016 年)的增长率,结果表明这3 项指标(TP、COD 和 COD_{Mn})变化趋势不同(图2).

大通湖、洞庭湖和鄱阳湖TP 浓度均呈逐年下降趋势,洪湖、斧头湖和梁子湖逐年变化趋势不明显(图2a).与2016 年相比,2020 年大通湖TP 浓度降幅最大,高达60.4%;洞庭湖和鄱阳湖降幅分别为28.6%和19.4%.而洪湖、斧头湖和梁子湖的TP 浓度均较2016 年有所上升,其中洪湖升幅最大,高达117.5%;其次为梁子湖和斧头湖,分别上升37.5%和35.3%.

长江中游6 个湖泊COD 浓度逐年变化趋势不明显(图2b).与2016 年相比,2020 年梁子湖和斧头湖均有所上升,升幅分别为5.5%和3.6%;洪湖、大通湖、鄱阳湖和洞庭湖皆有所下降,其中洪湖和大通湖降幅最大,高达约21.0%,其次是鄱阳湖和洞庭湖,降幅分别为11.2%和6.2%.

长江中游6 个湖泊 COD_{Mn} 浓度逐年变化趋势不明显(图2c).与2016 年相比,2020 年仅有斧头湖 COD_{Mn} 浓度有所下降,降幅为15.4%;其他5 个湖泊均较2016 年有所上升,其中洪湖和大通湖升幅较大,分别为47.5%和38.7%,其次是洞庭湖和鄱阳湖,升幅分别为11.1%和8.3%.

通过以上分析,长江中游6 个湖泊水质类别受TP 浓度影响较大,与2016 年相比,2020 年洪湖、斧头湖和梁子湖TP 浓度有所增加,而大通湖、洞庭湖和鄱阳湖TP 浓度有所下降(图2a);斧头湖COD 升高明显(图2b),洪湖、梁子湖、大通湖、洞庭湖和鄱阳湖 COD_{Mn} 浓度上升明显(图2c),这表明长江中游6 个湖泊有机污染程度有所加深.

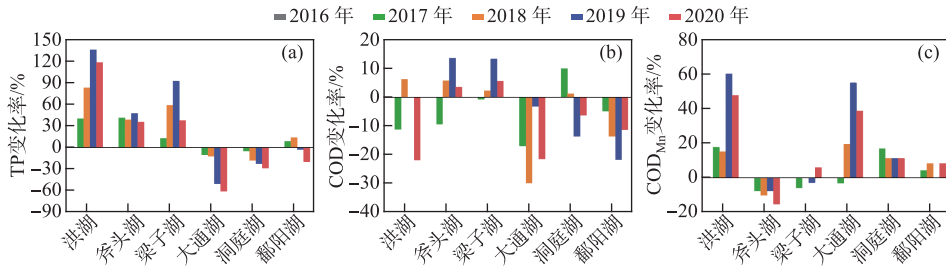


图 2 2016—2020 年长江中游 6 个湖泊 TP (a)、COD (b) 和 COD_{Mn} (c) 浓度增长率变化

Fig.2 Changes of TP (a), COD (b) and COD_{Mn} (c) concentrations in six lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020

2.2 营养状况评价

2.2.1 富营养状态变化 “十三五”时期,长江中游 6 个典型湖泊富营养化程度差异较大(图 3)。2016 年长江中游 6 个湖泊综合营养状态指数 ($TLI(\Sigma)$) 在 42~50 之间波动,均处于中营养状态,而 2020 年 $TLI(\Sigma)$ 在 47~61 之间,除鄱阳湖外的其他 5 个湖泊综合营养状态指数均较 2016 年有不同程度的增加,说明长江中游湖泊富营养化状态有变差的风险。其中,大通湖和洞庭湖 2020 年综合营养状态指数较 2016 年上升不超过 2.7%,营养状态未发生明显变化,总体营养状态变化相对稳定。而洪湖、梁子湖和斧头湖 2020 年综合营养状态指数较 2016 年分别上升 42.1%、12.2% 和 8.2%,其营养化状态有加重趋势,特别是洪湖和斧头湖已由 2016 年的中营养状态分别变差至 2020 年的中度富营养和轻度富营养状态,说明“十三五”时期洪湖和斧头湖营养状态恶化最为严重。

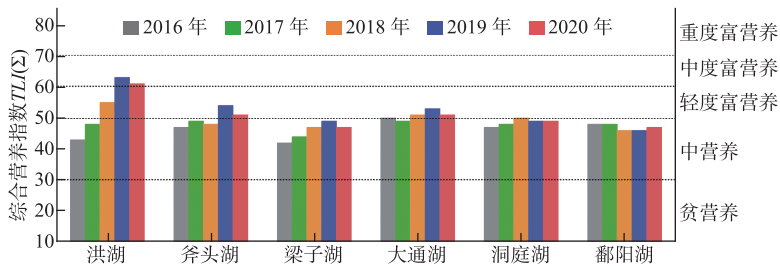


图 3 2016—2020 年长江中游 6 个湖泊综合营养指数变化情况

Fig.3 Changes of $TLI(\Sigma)$ of six lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020

2.2.2 营养状态分指数趋势分析 “十三五”时期,长江中游 6 个典型湖泊营养状态分指数变化趋势存在差异,洪湖和大通湖变化最为剧烈,斧头湖和梁子湖较为明显,洞庭湖和鄱阳湖相对稳定。除大通湖外,其他 5 个湖泊每年的营养状态分指数最大值均为 $TLI(SD)$,大通湖也从 2016 年 $TLI(TP)$ 最大演变为 2020 年的 $TLI(SD)$ 最大,而 SD 在计算综合营养状态指数中占比较小,说明 SD 对“十三五”时期长江中游湖泊营养状态评价贡献最大。与 2016 年相比,2020 年长江中游 6 个湖泊的 $TLI(Chl.a)$ 均有不同程度的增加,洪湖、斧头湖和梁子湖的 $TLI(TN)$ 和 $TLI(TP)$ 增加明显,大通湖、洞庭湖和鄱阳湖 $TLI(TN)$ 和 $TLI(TP)$ 有所下降(图 4)。整个“十三五”时期,长江中游 6 个湖泊每年的 $TLI(COD_{Mn})$ 与其他分指数相比最小,说明 COD_{Mn} 对各湖泊富营养状态评价的贡献最小,但除斧头湖外,其他湖泊 $TLI(COD_{Mn})$ 均较 2016 年有所升高,说明 COD_{Mn} 对长江中游湖泊的影响在逐渐增大。

2.3 影响长江中游 6 个典型湖泊水环境质量的主控因子分析

2016—2020 年长江中游 6 个典型湖泊的主成分分析排序图如图 5 所示,各湖泊前 2 个轴的累计方差解释信息均达 70% 以上,表明均能较好地代表原指标。

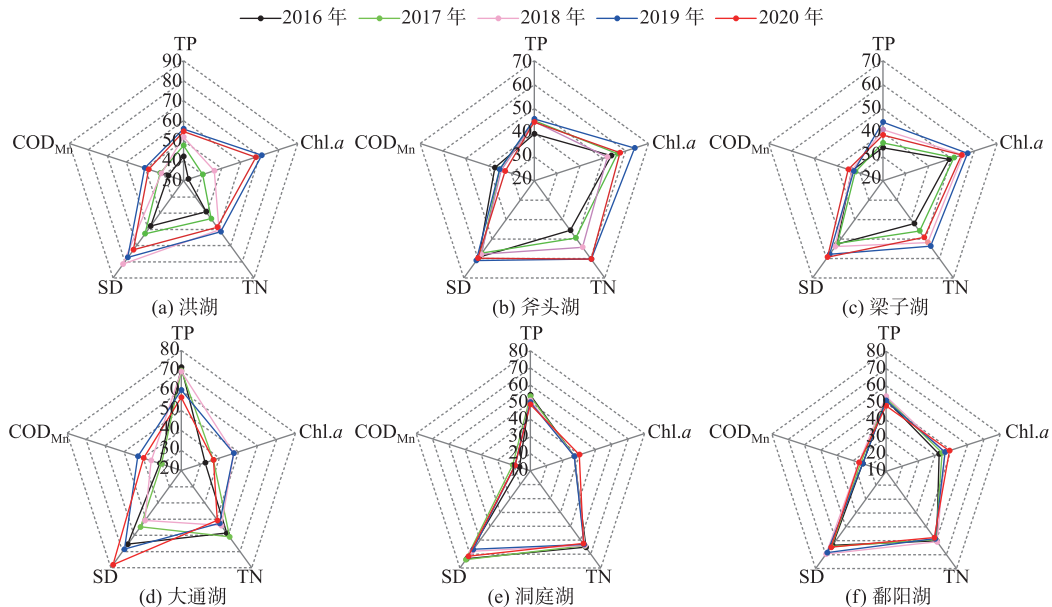


图4 2016—2020年长江中游6个湖泊营养状态指数变化

Fig.4 Trends of trophic state indexes of the six lakes from 2016 to 2020

洪湖主成分1(PC1)中的TN、TP、SD和Chl.a具有较大因子负荷,反映了洪湖的营养状况,其中TN、TP和Chl.a与PC1呈正相关,SD与PC1呈负相关;主成分2(PC2)中的pH、COD和DO具有较大因子负荷,反映了洪湖的物理环境状况和有机物污染的程度,pH、COD和DO均与PC2呈正相关(图5a)。

斧头湖PC1中的TN、BOD₅和COD具有较大因子负荷,反映了斧头湖氮素、有机物污染的状况,其中TN和COD与PC1呈正相关,BOD₅与PC1呈负相关;PC2中的水温、DO和SD具有较大因子负荷,反映了斧头湖的物理环境状况,其中水温和SD与PC2呈正相关,DO与PC2呈负相关(图5b)。

梁子湖PC1中的Chl.a、DO、TN和TP具有较大因子负荷,反映了梁子湖的营养状况和物理环境状况,这4项指标均与PC1呈正相关;PC2中的BOD₅和COD_{Mn}具有较大因子负荷,反映了梁子湖有机物污染情况,其中BOD₅与PC2呈正相关,COD_{Mn}与PC2呈负相关(图5c)。

大通湖PC1中的COD_{Mn}、DO、TN和TP具有较大因子负荷,反映了大通湖的有机物、氮素和磷素污染以及物理环境状况,其中TN和TP与PC1呈正相关,COD_{Mn}和DO呈负相关;PC2中的COD和SD具有较大因子负荷,反映了大通湖有机物污染和物理环境状况,其中SD与PC2呈正相关,COD与PC2呈负相关(图5d)。

洞庭湖PC1中的TP、TN、COD和DO具有较大因子负荷,反映了洞庭湖的氮素、磷素和有机物污染以及物理环境状况,其中TP、TN和COD与PC1呈正相关,DO与PC1呈负相关;PC2中的水温和COD_{Mn}具有较大因子负荷,反映了洞庭湖物理环境和有机物污染状况,水温和COD_{Mn}均与PC2呈正相关(图5e)。

鄱阳湖PC1中的BOD₅、COD、pH和SD具有较大因子负荷,反映了鄱阳湖的有机物污染以及物理环境状况,这4项指标均与PC1呈正相关;PC2中的TP和TN具有较大因子负荷,反映了鄱阳湖氮素和磷素污染状况,TP和TN均与PC2呈正相关(图5f)。

综合以上分析,“十三五”期间长江中游湖泊存在不同程度的氮素、磷素和有机物污染情况,而各湖泊TN和TP始终具有较大因子负荷,成为影响“十三五”长江中游湖泊水环境质量的主要指标。各湖泊TN和TP始终存在较强的正相关关系,洪湖、斧头湖和梁子湖的TN和TP均与Chl.a有正相关关系,而大通湖、洞庭湖和鄱阳湖的TN和TP均与Chl.a呈负相关关系,说明影响洪湖、斧头湖和梁子湖水水质和富营养化的因素与大通湖、洞庭湖和鄱阳湖并不相同。

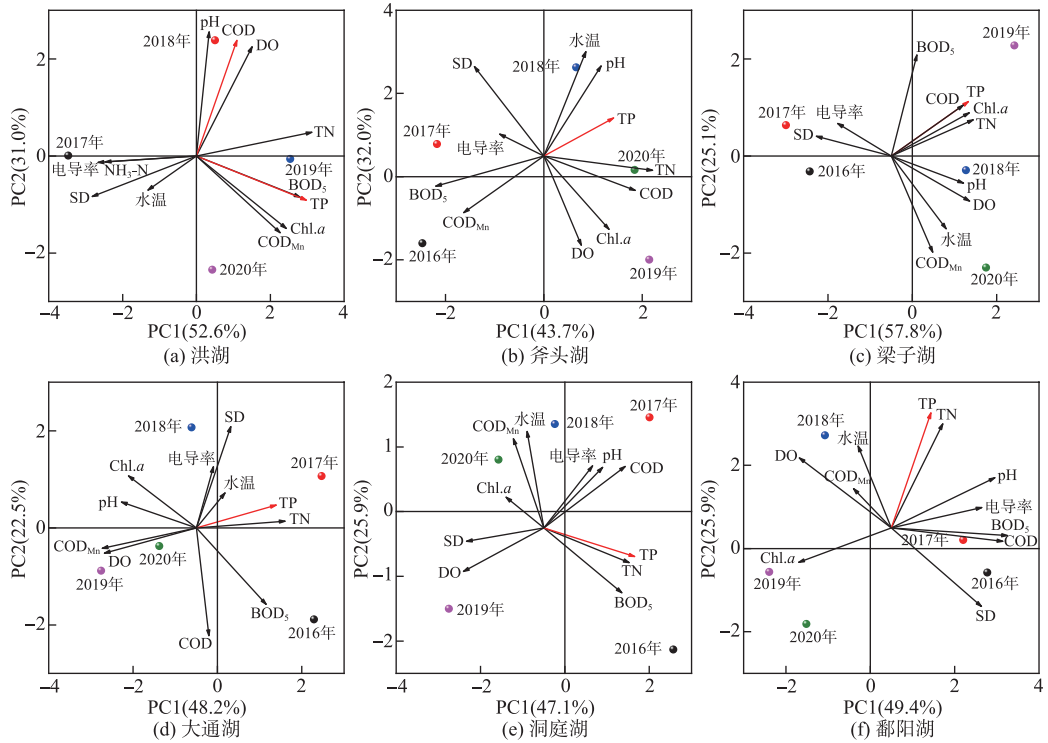


图 5 2016—2020 年长江中游 6 个湖泊 PCA 排序图(红色线代表 2020 年定类因子)

Fig.5 Trends of impact factor load chart of the six lakes from 2016 to 2020

(Red line represents the classification factor in 2020)

3 讨论

3.1 长江中游典型湖泊水质污染变化特征

2016—2020 年长江中游湖泊水质变化差异较大(表 2),与 2016 年相比,2020 年梁子湖水质类别有所改善,大通湖水水质类别改善明显,说明长江中游湖泊水环境质量改善存在不平衡、不协调问题^[3]. TP、COD 和 COD_{Mn} 是影响长江中游湖泊“十三五”时期水质类别的主要因子,2016—2020 年大通湖、洞庭湖和鄱阳湖的定类因子只有 TP,其 TP 浓度较 2016 年均有所下降(图 2),而其 Chl.a 浓度却上升明显(图 4,5),通过对其主成分分析发现 Chl.a 与 TN、TP 呈负相关关系(图 5),说明大通湖、洞庭湖和鄱阳湖中 TP 浓度的下降除与污染负荷减少有关外,还可能与浮游植物增多有关. 2016—2020 年洪湖、斧头湖和梁子湖的定类因子除 TP 外,还曾出现 COD 或 COD_{Mn} ,而斧头湖和梁子湖水质均能达到 III 类,且《武汉市环境质量公报》统计 2008—2017 年梁子湖和斧头湖水质均在 II~III 类之间,较为稳定,但斧头湖(涉及咸宁市和武汉市)和梁子湖(涉及武汉市和鄂州市)为跨行政区管理,治理措施难免会缺乏系统性和整体性^[22]. 周文昌等^[23]对洪湖 2012—2017 年水质研究发现,洪湖 COD 浓度下降是湖区养殖围网拆除的直接结果,并总结洪湖水水质恶化原因受内源释放(主要来自沉积物和水生植物腐烂)和外源输入(主要包括四湖总干渠汇入和人类活动产生的污染)的多重影响^[24-25]. “十三五”时期,TP 是影响长江中游湖泊水质类别的最主要因子,而 TN 和 TP 是影响长江中游湖泊水质变化的最主要驱动力,且 6 个典型湖泊 TN 与 TP 呈较强的正相关关系(图 5),斧头湖和大通湖 TN 对水质的影响程度甚至超过 TP(图 5),但是我国目前存在“河流总氮指标没有标准,湖库总氮难以有效控制”的问题^[26],建议尽快提出河湖氮磷标准限值或考核目标,为水环境管理、保护和决策提供帮助.

3.2 长江中游典型湖泊富营养化变化特征

“十三五”时期,长江中游典型湖泊营养状态变化趋势差异较大,洪湖、斧头湖和梁子湖富营养化呈加剧

趋势,大通湖、洞庭湖和鄱阳湖营养状态相对稳定(图3)。2020年长江中游6个湖泊Chl.*a*浓度均较2016年有所升高(图4),随着浮游植物生物量升高,水体中的有机聚集体增加^[15],导致长江中游湖泊有机物污染程度有所加深(图2)。TLI(SD)和TLI(Chl.*a*)对洪湖、斧头湖和梁子湖的营养状态评价贡献最大,而大通湖、洞庭湖和鄱阳湖营养状态分指数最大值依次为TLI(SD)和TLI(TN)(图4)。SD是湖泊发生营养化后重要的表现指标^[27],但SD受到藻类生物量、悬浮泥沙等多种因素影响,并不能单纯通过其贡献量评价富营养化影响程度^[28]。较高的Chl.*a*浓度是洪湖、斧头湖和梁子湖营养状态变差的最直接原因。Chl.*a*通常表征浮游植物的生物量,浮游植物的生长会显著降低水体的透明度,并减少水体溶解氧,促使水生植物逐步被浮游植物所取代,造成水体富营养化加剧。洪湖、斧头湖和梁子湖的TN和TP与Chl.*a*变化呈正相关关系(图5),氮、磷作为湖泊初级生产力的物质基础^[29-30],其浓度升高加快了洪湖、斧头湖和梁子湖藻类生长(图4),进而成为推动其富营养化加剧的主要因子。氮、磷营养盐浓度对大通湖、洞庭湖和鄱阳湖的营养状态评价次于SD,但大通湖、洞庭湖和鄱阳湖的TN和TP与Chl.*a*变化呈负相关关系(图5),说明这些湖中Chl.*a*浓度并不会随氮、磷物质的增加而升高,其营养状态可能受到除氮磷营养盐以外的其他因素影响较大,像洞庭湖和鄱阳湖作为长江中游的通江湖泊,较短的换水周期对藻类生长具有明显的抑制作用,且通江湖泊较高的泥沙含量会使水体透明度较低,削弱藻类的光可获得性,从而抑制藻类生长。另外,气候变暖、降雨量变化、风速改变等气候因素也直接或间接影响光可获得性和营养盐生物可利用性,改变湖泊藻类的生长特性^[31-32],进而对湖泊富营养化产生影响。所以长江中游湖泊营养状态变化受人类活动和气候变化等多种因素的影响。

3.3 长江中游典型湖泊水质污染和富营养化原因探究

“十三五”时期,TN和TP依然是影响长江中游湖泊水质和富营养化状况的最主要驱动因素。湖泊水质状况和营养化水平是对水体中多项指标分析的综合结果,也是生物和非生物因素相互影响的综合体现。在不考虑氮、磷等污染物直排入湖因素外,湖泊的水质和富营养化状况与自净能力、湖泊流通性、渔业管理、流域纳污和治理强度等因素密切相关^[7]。

“十三五”时期,洪湖、斧头湖和梁子湖的TP污染和富营养化程度呈加重趋势(图2a,图3),主要受到生态退化、围垦造田、水产养殖等经营性开发利用活动的直接或间接影响。1970s湖泊围垦和水利工程建设达到高峰期,洪湖、斧头湖和梁子湖进行的大量围垦造田和长期水产养殖活动,使得湖泊生境受到破坏,水生植被大量减少,降低湖泊的生态系统稳定性^[5,33-34]。Hou等通过遥感解译的湖泊的水生植被变化发现,鄱阳湖、洞庭湖两个湖泊水生植被覆盖度较高,而洪湖、斧头湖和梁子湖水生植被覆盖度明显低于鄱阳湖和洞庭湖,说明洪湖、斧头湖和梁子湖生态退化较为严重^[34-36]。水生植被是治理内源营养盐的有效途径,不仅能有效吸收氮、磷等污染物,还对浅水湖泊的底泥再悬浮具有重要抑制作用^[37-38]。从洪湖、斧头湖和梁子湖的营养状态分指数对比(图4)可知,对其富营养化贡献最大的是TLI(SD),透明度降低可能受到水生植被破坏的影响^[33]。2017年底洪湖、斧头湖和梁子湖虽已全面拆除“三网”,但湖泊自净能力短时间内还未恢复,拆围后沉积物中残留大量饵料、水产品排泄物等也使沉积物成为湖泊氮、磷的重要库源。围网存在会造成湖泊水面网格化,进而降低沉积物再悬浮,而拆除后缺乏足够水生植物覆盖的浅水湖泊底泥极易在物理(风浪)和生物(如底栖鱼类)等作用下向上覆水释放,成为影响其水体氮、磷的内源污染^[34],这可能就是洪湖、斧头湖和梁子湖TN和TP增高或居高不下的关键原因之一^[23-24]。

“十三五”时期洞庭湖和鄱阳湖水质较为稳定(表2),且2020年湖区TP浓度均较2016年有明显下降(图2a),但始终未达到湖库Ⅲ类水质标准的TP限值(0.05 mg/L)要求。洞庭湖和鄱阳湖兼具“高水湖相、低水河相”的特点,其水文情势受流域来水及长江共同作用,即使两湖各入湖河流和长江来水均达到Ⅱ类水质,因河流、湖泊TP执行不同标准,鄱阳湖和洞庭湖难以达到湖库Ⅲ类TP浓度要求。据王丑明等的研究报道,自2003年三峡大坝蓄水后,洞庭湖水质健康状况受到一定影响^[40],加剧了河湖两相特征,洞庭湖枯水期TN和TP浓度也呈升高现象^[40]。就鄱阳湖和洞庭湖通江湖泊而言,其TP超标主要原因是水质考核标准中的河、湖限值要求相冲突,当前考核目标和评价体系对其流域环境治理指导性不强。建议开展河湖氮磷标准的衔接工作,为水环境管理、保护和决策提供帮助。

“十三五”时期大通湖水质改善明显,水质已从2016年的劣V类逐步提升至2020年的Ⅳ类(表2)。过去大通湖因过度养殖和农业面源污染、生活和工业污水排放等复合污染,生态系统遭到破坏,水质长期呈劣

V类。2017年,政府加大大通湖水环境治理力度,开展截污、垃圾治理、农业面源污染治理、大型养殖退出、清淤清废、禁航禁捕和生态修复七大攻坚战,坚持源头治理、有效增容和生态修复并举,实现了从劣V类到IV类湖泊治理典范的跨越。湖泊污染治理和修复强度对湖泊水质和富营养化状况至关重要。

“十三五”时期,在中共中央、国务院的高位推动下,我国各级部门积极组织开展“河湖长制”“一湖一策”“拆除三网”“还湖还湿”、入湖河道整治等湖泊专项行动,湖泊水生态环境状况已取得积极成效,但湖泊污染原因复杂,治理难度大^[41-42],长江中游湖泊面临着有机质污染加重和Chl.a浓度升高问题,TN和TP仍然是影响长江中游湖泊水质和富营养化的主要指标。我国湖泊水生态环境保护根源性和趋势性压力尚未根本解决^[41-42],与美丽中国建设目标要求仍有一定的差距^[1]。湖泊水质污染和富营养化防治是复杂的系统工程,建议深化流域管理,统筹定位各湖泊的基本功能、社会经济目标和环境管理目标,以提高湖泊治理与修复的系统性和整体性。

4 参考文献

- [1] Wang JN, Sun HL, Xu YX *et al.* Water eco-environment protection framework in the Yangtze River Basin during the 14th five-year plan period. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1075-1080.[王金南,孙宏亮,续衍雪等.关于“十四五”长江流域水生态环境保护的思考.环境科学研究,2020,33(5):1075-1080.]
- [2] Zhang H, Gao JX, Qiao YJ. Current situation, problems and suggestions on ecology and environment in the Yangtze River Economic Belt. *Environment and Sustainable Development*, 2019, **44**(5): 28-32.[张慧,高吉喜,乔亚军.长江经济带生态环境形势和问题及建议.环境与可持续发展,2019,44(5):28-32.]
- [3] Yang XD, Dong XH, Chen X *et al.* Past environmental changes and management suggestions for lakes in the Yangtze River economic belt. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, **35**(8): 977-987.[羊向东,董旭辉,陈旭等.长江经济带湖泊环境演变与保护、治理建议.中国科学院院刊,2020,35(8):977-987.]
- [4] Hu JH, Zhang CL, Hu HJ. Structure and variation of fish diversity of lakes in the central Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2008, **29**(5):47-51.[胡军华,张春兰,胡慧建.长江中游湖泊鱼类物种多样性结构及动态.水生态学杂志,2008,29(5):47-51.]
- [5] 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.]
- [6] Jiang JH, Huang Q, Sun ZD. Analysis of ecological environment of lake-wetland in Yangtze River Basin. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 424-429.[姜加虎,黄群,孙占东.长江流域湖泊湿地生态环境状况分析.生态环境,2006,15(2):424-429.]
- [7] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622.[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.湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.]
- [8] Zhou HE, Chen XF, He X *et al.* Research on spatio-temporal variation and causes of nutrients in Honghu Lake. *Earth and Environment*, 2021, **49**(1): 9-17.[周汉娥,陈晓飞,何鑫等.洪湖营养盐时空分布特征及成因分析.地球与环境,2021,49(1):9-17.]
- [9] Kong LY, Li ZQ, Wang SL *et al.* Lake conservation and utilization based on ecological suitability analysis: A case study of Lake Futou in Hubei Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 67-74. DOI: 10.18307/2012.0109.[孔令阳,李中强,王双玲等.基于生态适宜性分析的湖泊保护与利用——以湖北斧头湖为例.湖泊科学,2012,24(1):67-74.]
- [10] Zhong SH, Ji X, Feng YY. Main pollution factors of water environment in the Liangzi Lake. *Chemistry & Bioengineering*, 2020, **37**(1): 55-58, 64.[钟书华,冀翔,冯元元.梁子湖水环境主要污染因子研究.化学与生物工程,2020,37(1):55-58,64.]
- [11] Mao L, Luo CQ, Shi PL *et al.* Spatial analysis and coupling characteristics of nitrogen and phosphorus in water and sediment—a case study in Datong Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, **48**(5): 952-959. DOI: 10.11693/hy-hz20170400104.[毛亮,罗丛强,石彭灵等.湖泊水、沉积物氮磷的空间分析及其耦合特征研究——以大通湖为例.海洋与湖沼,2017,48(5):952-959.]

- [12] Ban X, Yu C, Wei K *et al.* Analysis of influence of enclosure aquaculture on water quality of Honghu Lake. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(9): 125-129.[班璇, 余成, 魏珂等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析. 环境科学与技术, 2010, **33**(9): 125-129.]
- [13] Wang ZW, Lin JN, Zhang Y *et al.* Water quality limits of nitrogen and phosphorus in the inflow rivers of Poyang Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1163-1169.[王子为, 林佳宁, 张远等. 鄱阳湖入湖河流氮磷水质控制限值研究. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1163-1169.]
- [14] Xiong J, Yu FQ, Tian Q *et al.* The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1217-1225. DOI: 10.18307/2016.0607.[熊剑, 喻方琴, 田琪等. 近30年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1217-1225.]
- [15] Li LL, Lu SY, Meng W *et al.* Eutrophication and control measures of key lakes in the Yangtze River Basin. *Science & Technology Review*, 2017, **35**(9): 13-22.[李琳琳, 卢少勇, 孟伟等. 长江流域重点湖泊的富营养化及防治. 科技导报, 2017, **35**(9): 13-22.]
- [16] Lou BF, Zhuo HH, Zhou Z *et al.* Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstem during recently 18 years. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1150-1162.[娄保锋, 卓海华, 周正等. 近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1150-1162.]
- [17] Wang HD, Gu DX, Liu XF *et al.* eds. Chinese lake water resources. Beijing: Agriculture Publishing House, 1987.[王洪道, 顾丁锡, 刘雪芬等. 中国湖泊水资源. 北京: 农业出版社, 1987.]
- [18] Yang DY, Li XS, Zhang ZK. Lake evolution along middle-lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2000, **12**(3): 226-232. DOI: 10.18307/2000.0306.[杨达源, 李徐生, 张振克. 长江中下游湖泊的成因与演化. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 226-232.]
- [19] Ji XY, Sun ZG, Nie XJ *et al.* Study on surface water quality variation trend of Yellow River Basin in recent 10 years. *Yellow River*, 2016, **38**(12): 99-102.[嵇晓燕, 孙宗光, 聂学军等. 黄河流域近10a地表水质变化趋势研究. 人民黄河, 2016, **38**(12): 99-102.]
- [20] Chen SR, He LH, Zhang FY *et al.* Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016–2019. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1100-1108. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.04.03.[陈善荣, 何立环, 张凤英等. 2016–2019年长江流域水质时空分布特征. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1100-1108.]
- [21] Li ZC, Chen JX, Yi Q *et al.* Evolution and change-point analysis of trophic status of the Fuxian Lake, the Xingyun Lake and the Qilu Lake. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(3): 105-113.[李子晨, 陈俊旭, 易琦等. 抚仙湖、星云湖与杞麓湖营养状态演变及突变分析. 中国环境监测, 2020, **36**(3): 105-113.]
- [22] Zhong SH, Ji X, Feng YY. Main pollution factors of water environment in the Liangzi Lake. *Chemistry & Bioengineering*, 2020, **37**(1): 55-58, 64.[钟书华, 冀翔, 冯元元. 梁子湖水环境主要污染因子研究. 化学与生物工程, 2020, **37**(1): 55-58, 64.]
- [23] Zhou WC, Shi YH, Pan L. Current status and controlling strategies of water pollution in Honghu Lake wetland in Jiangnan plain of middle reaches of Yangtze River. *Wetland Science & Management*, 2019, **15**(1): 31-35.[周文昌, 史玉虎, 潘磊. 长江中游平原洪湖湿地水体污染现状及治理对策. 湿地科学与管理, 2019, **15**(1): 31-35.]
- [24] Pan X, Gu WJ, Li H *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments of Honghu Lake: Spatial distribution and pollution evaluation. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(8): 41-46. DOI: 10.11988/ckyyb.20200640.[潘雄, 顾文俊, 李欢等. 洪湖沉积物碳氮磷分布特征及污染评价. 长江科学院院报, 2021, **38**(8): 41-46.]
- [25] Zhou HE, Chen XF, He X *et al.* Research on spatio-temporal variation and causes of nutrients in Honghu Lake. *Earth and Environment*, 2021, **49**(1): 9-17.[周汉娥, 陈晓飞, 何鑫等. 洪湖营养盐时空分布特征及成因分析. 地球与环境, 2021, **49**(1): 9-17.]
- [26] Gao KW, Zhu YR, Sun FH *et al.* A study on the collaborative control of water quality of nitrogen and phosphorus between typical lakes and their inflow rivers in China. *J Lake Sci*, 2021, **33**(5): 1400-1414. DOI: 10.18307/2021.0509.[高可伟, 朱元荣, 孙福红等. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1400-1414.]
- [27] Wu J, Jin WL, Chen KL. Analysis of eutrophication characteristics and its main control factors of Lake Yangcheng. *Envi-*

- ronmental 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.]
- [28] Li N, Li JX, Li GW *et al.* The eutrophication and its regional heterogeneity in typical lakes of China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(4): 854-864.[李娜, 黎佳茜, 李国文等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析. 水生生物学报, 2018, **42**(4): 854-864.]
- [29] Xu H, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432. DOI: 10.4319/lo.2010.55.1.0420.
- [30] Li XM, Li SY. Dynamic characteristics of nitrogen, phosphorus, chlorophyll a and eutrophication trend in Yangzonghai Lake. *Water Resources Protection*, 2014, **30**(4): 43-46, 52.[李晓铭, 李世玉. 阳宗海叶绿素 a、磷、氮动态特征及富营养化趋势. 水资源保护, 2014, **30**(4): 43-46, 52.]
- [31] Janatani N, Olli K, Cremona F *et al.* Atmospheric stilling offsets the benefits from reduced nutrient loading in a large shallow lake. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(4): 717-731. DOI: 10.1002/lno.11342.
- [32] Dong J, Gao YN, Li GB. A review: Responses of phytoplankton communities to eutrophication and climate warming in freshwater lakes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 615-623. DOI: 10.7541/2016.83.[董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.]
- [33] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland). *Water Research*, 2003, **37**(18): 4468-4474. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00405-6.
- [34] Hou XJ, Feng L, Chen XL *et al.* Dynamics of the wetland vegetation in large lakes of the Yangtze Plain in response to both fertilizer consumption and climatic changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **141**: 148-160. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.04.015.
- [35] Zhang QH, Dong XH, Yang XD. Environmental evolution of Lake Liangzi and its driving factors over the past 100 years, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 545-553. DOI: 10.18307/2016.0310.[张清慧, 董旭辉, 羊向东. 湖北梁子湖近百年来环境演变历史及驱动因素分析. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 545-553.]
- [36] Zhang YY, Cai XB, Yang C *et al.* Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 171-182. DOI: 10.18307/2019.0116.[张莹莹, 蔡晓斌, 杨超等. 1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 171-182.]
- [37] Qin BQ. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 193-202. DOI: 10.18307/2002.0301.[秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.]
- [38] Drenner RW, Day DJ, Basham SJ *et al.* Ecological water treatment system for removal of phosphorus and nitrogen from polluted water. *Ecological Applications*, 1997, **7**(2): 381-390. DOI: 10.1890/1051-0761(1997)007[0381: EWTSFR]2.0.CO;2.
- [39] Zhao GZ, Dong R, Wang HS *et al.* Hydrological variations and attribution analysis of Poyang Lake and Dongting Lake in the past 30 years. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, **18**(5): 74-83.[赵贵章, 董锐, 王赫生等. 近30年鄱阳湖与洞庭湖水文变化与归因. 南水北调与水利科技: 中英文, 2020, **18**(5): 74-83.]
- [40] Wang CM, Zhang Y, Tian Q *et al.* Dynamics of taxonomic and functional community structure in macrozoobenthos and the underlying driving factors in Lake Dongting during 1988 and 2016?. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 218-231. DOI: 10.18307/2021.0112.[王丑明, 张屹, 田琪等. 1988—2016年洞庭湖大型底栖动物群落变化及驱动因素分析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 218-231.]
- [41] Pan BZ, Wang HJ, Liang XM *et al.* Factors influencing chlorophyll a concentration in the Yangtze-connected lakes. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, **18**(10): 1894-1900. DOI: <http://ir.ihb.ac.cn/handle/152342/7456>.
- [42] Chen RT, Xie ZY. The evaluation of eutropher on Cihu Lake. *Journal of Huangshi Polytechnic College*, 2004, **20**(4): 61-63.[陈瑞庭, 谢志勇. 磁湖富营养化评价. 黄石高等专科学校学报, 2004, **20**(4): 61-63.]