

2012—2018 年洪泽湖水质时空变化与原因分析^{*}

李 颖^{1,2}, 张 祯³, 程建华⁴, 邹亮华^{2,5}, 张庆吉², 张 敏³, 龚志军², 谢世友^{1**}, 蔡永久^{2**}

(1:西南大学地理科学学院,重庆 400715)

(2:中国科学院南京地理与湖泊研究所,中国科学院流域地理学重点实验室,南京 210008)

(3:江苏省洪泽湖水利工程管理处,淮安 223100)

(4:江苏省水利勘测设计研究院有限公司,扬州 225127)

(5:江西师范大学生命科学学院,南昌 330027)

摘要: 洪泽湖是南水北调东线工程的重要枢纽。为评估水环境长期变化,于2012—2018年开展逐月水质监测。结合水文气象与淮河水水质数据,分析洪泽湖水质长期变化趋势及空间分异的驱动因素,结果显示:2012—2018年,洪泽湖总氮、总磷多年平均浓度为1.74和0.081 mg/L,分别为V类水和IV类水,透明度均值为0.48 m,下降趋势不显著,而高锰酸盐指数、叶绿素a多年平均浓度分别为4.13和0.008 mg/L,呈显著下降趋势。在空间分布上,过水区总氮、总磷浓度显著高于成子湖、溧河洼;高锰酸盐指数、叶绿素a浓度则相对较低,透明度则是成子湖较高,溧河洼和过水区相近。3个湖区的叶绿素a浓度下降明显,但过水区的高锰酸盐指数呈上升趋势。洪泽湖与淮河水质相关性分析结果显示,洪泽湖总氮、总磷浓度与淮河水质呈强相关性,特别是过水区各个水质指标与淮河水质均有显著的相关性,而成子湖、溧河洼水质与淮河水质相关性较弱。广义可加模型(GAM)显示,过水区的总氮、总磷浓度等参数与淮河营养盐、高锰酸盐指数及悬浮物浓度变化的关系显著,成子湖和溧河洼的水质指标影响因素差异较大,成子湖、过水区的叶绿素a浓度与高锰酸盐指数相关性较强,而溧河洼的叶绿素a浓度与降水、透明度关系显著。相关性和GAM模型表明淮河对于洪泽湖,尤其是对过水区的水质影响极为明显,是洪泽湖维持较高营养水平和水质空间分异的重要原因。尽管不同湖区叶绿素a浓度下降趋势表明洪泽湖营养状态有所降低,但其氮、磷浓度仍维持在较高水平,存在富营养化风险。应持续关注淮河入湖水质变化,削减污染输入,压缩湖泊围网、圈圩养殖规模,通过加强水污染防治和水域空间管控保障洪泽湖水环境安全。

关键词: 浅水湖泊;淮河流域;富营养化;趋势分析;洪泽湖

Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018^{*}

Li Ying^{1,2}, Zhang Zhen³, Cheng Jianhua⁴, Zou Lianghua^{2,5}, Zhang Qingji², Zhang Min³, Gong Zhijun², Xie Shiyu^{1**} & Cai Yongjiu^{2**}

(1: School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Administrative Office of Hongze Lake Water Conservancy Project, Jiangsu Province, Huai'an 223100, P.R.China)

(4: Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd, Yangzhou 225127, P.R.China)

(5: College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, P.R.China)

Abstract: Lake Hongze is an important storage lake for the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. To assess the long-term changes in water quality, 16 monitoring sites were deployed based on environmental heterogeneity. Monthly water quality monitoring was carried out from 2012 to 2018 to examine the long-term trend of the water quality of Lake Hongze and the effects of hydrometeorological factors on the changes in nutrients. The results showed that from 2012 to 2018, the average annual concentrations of total nitrogen, total phosphorus, and transparency in Lake Hongze were 1.74 mg/L (Grade V), 0.081 mg/L

* 2020-04-06 收稿;2020-08-14 收修改稿。

江苏省水利科技项目(2018039,2019005)和中国科学院青年创新促进会项目(2020316)联合资助。

** 通信作者; E-mail: xiesy@ swu.edu.cn; caiyj@ niglas.ac.cn.

(Grade IV), and 0.48 m, respectively, without significant decline trend. In contrast, the average annual concentrations of permanganate index and chlorophyll-a were 4.13 and 0.008 mg/L, respectively, presenting a significant decrease trend. In terms of spatial patterns, the concentration of total nitrogen and total phosphorus in the flushing area was higher than that of Chengzi Bay and Lihewa Bay; while the permanganate index and chlorophyll-a concentration were relatively lower. The concentration of permanganate index in Chengzi Bay and Lihewa Bay decreased significantly, which was significantly different from the water quality change trend of the flushing area. The concentration of chlorophyll-a in all three regions of the lake decreased significantly. The results of correlation analysis showed that the total nitrogen and total phosphorus in Lake Hongze strongly correlated with the water quality of the Huaihe River, especially in the flushing area. The correlation between the water quality of Lihewa Bay and the water quality of Huaihe River is quite weak. The generalized additive model (GAM) showed that the water quality and suspended solids concentration of the flushing area was significantly correlated to the change of water quality in Huaihe River, and the factors influencing the water quality of Chengzi Bay and Lihewa Bay varied greatly. The relationships between chlorophyll-a and permanganate index in Chengzi Bay and flushing area were relatively strong, while the concentration of chlorophyll-a in Lihewa Bay was significantly related to precipitation and transparency. The correlation and GAM model indicated that the Huaihe River imposed profound effects on the water quality of Lake Hongze, especially in the flushing area, which may be an important driver in maintaining a higher nutrient level and spatial differentiation of water quality in Lake Hongze. The decreasing trend of chlorophyll-a concentration in different regions indicated that the trophic status of Lake Hongze has decreased. Routine monitoring, pollutants reduction, aquaculture control should be implemented to ensure the safety of water quality in Lake Hongze.

Keywords: Shallow lake; Huaihe River Basin; eutrophication; trend analysis; Lake Hongze

中国地域宽广,自然环境区域分异明显,湖泊数量多、分布广、类型多样。著名的五大淡水湖所处的东部平原湖区,其中面积大于 1 km^2 的湖泊共634个,合计面积 21053 km^2 ,湖泊数量和面积分别占全国湖泊总数量和总面积的23.5%和25.9%^[1]。近几十年来,随着区域气候变化和人类活动加剧,本地区湖泊面临着面积萎缩、水体富营养化、水生植被衰退等多重环境问题,进而导致生态系统结构与功能退化,反馈制约着社会经济可持续发展^[2-3]。

洪泽湖是我国五大淡水湖之一,具有防洪、饮用水供给、灌溉、航运、水产养殖和生物多样性维持等多种功能,同时也是南水北调东线工程的重要调蓄库^[4]。近年来,大规模圈圩围网养殖、水质恶化、富营养化和生物多样性减少正威胁着洪泽湖生态安全^[5]。相较于五大淡水湖中其他湖泊,对洪泽湖的科学的研究较为薄弱^[6]。以往针对洪泽湖水环境已开展了一些研究,主要集中在叶绿素a(Chl.a)浓度的时空变化^[7-8]、水质类别评价、沉积物营养盐和重金属污染等方面^[9-11]。随着时间推移,洪泽湖水质与营养状态发生阶段性改变,经历了1973—1984年水质良好^[12]、1990—1993年营养型与有机化学的复合型污染^[10]、1996—2000年期间水质有所改善^[13]、2007—2012年有机污染依然严重等阶段^[14]。2014—2017年,洪泽湖水质在空间分布上西南部和东南部污染较严重,部分区域达到劣V类水,湖泊整体处于轻度富营养状态^[15-16]。近年来,国家对湖泊水环境治理力度不断加大,洪泽湖也实施了多项保护治理措施,如退圩还湖、禁止采砂和入湖污染物控制,这可能会对洪泽湖水环境产生新的影响,因此有必要加强对洪泽湖水质演变趋势和原因的分析。为此,本文基于2012—2018年洪泽湖逐月水质监测数据,分析水质的长期变化特征,结合相关文献资料探讨驱动水质指标变化的主要因素,以期为洪泽湖水环境的保护和治理提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洪泽湖位于江苏省北部淮安、宿迁两市($33^{\circ}06' \sim 33^{\circ}40'N, 118^{\circ}10' \sim 118^{\circ}52'E$),地处淮河、沂河水系的中下游。洪泽湖属浅水湖,长60 km,最大宽度58 km,平均水深1.35 m,最大水深4.75 m;现状正常蓄水位13.00 m,南水北调东线一期工程实施后,规划蓄水位13.50 m,相应水面积 1793 km^2 、库容37.3亿 m^3 ,主要入湖河流淮河占总入湖河流的70%以上,经过三河闸、二河闸两个主要出湖闸门流入淮河入江水道和二河^[15]。成子湖水动力条件较弱,水生植物覆盖度较高;西部溧河洼水深较浅,是水产养殖的主要分布区^[7]。淮河入湖口到三河闸、二河闸为行洪通道,水域较为开阔,水流速度较快,水生植物稀少,本文称为过水区。

1.2 样点布设、水质监测与数据搜集

综合考虑湖泊形态、水动力和人类活动等因素,共布设16个样点,其中成子湖的采样点为S1、S2、S8和S15,溧河洼为S9、S12、S13和S16,其余8个点布设在淮河入湖口至二河闸、三河闸水域的过水区(图1)。在现场使用自制塞氏盘进行透明度(SD)测定,并用2.5 L有机玻璃采水器分别采集表层、中层和底层水样,现场混匀后采集5 L水样冷藏保存,带回实验室分析营养盐和Chl.a浓度等指标。总氮(TN)浓度测定采用过硫酸钾氧化、紫外分光光度法(GB 11894—1989),总磷(TP)浓度测定采用过硫酸钾氧化、钼锑抗显色分光光度法(GB 11893—1989),氨氮(NH₃-N)浓度测定采用纳氏试剂光度法(GB 7479—1987),高锰酸盐指数(I_{Mn})测定采用滴定法。Chl.a浓度测定采用热乙醇萃取分光光度法,过滤水样用Whatman GF/F玻璃纤维滤膜(孔径约0.7 μm)。

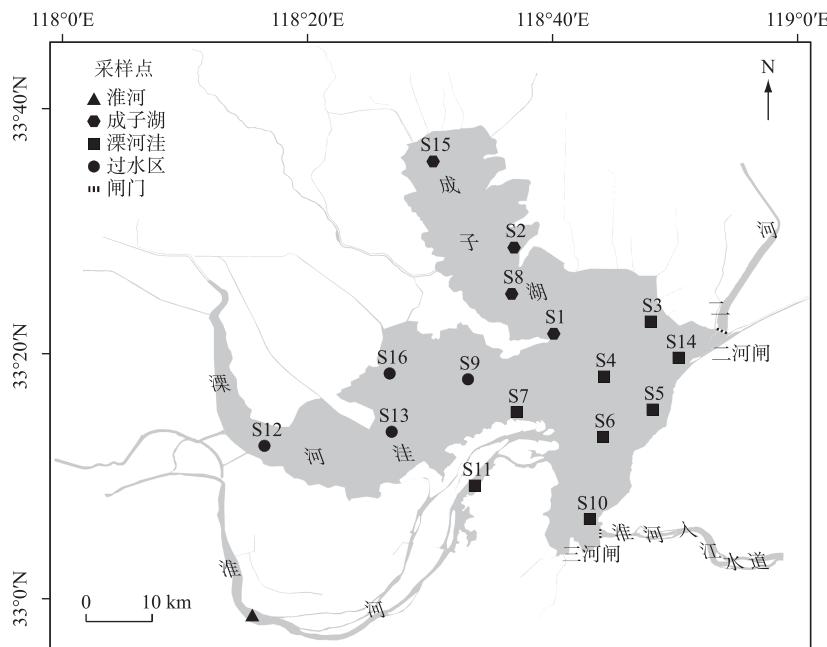


图1 洪泽湖采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Hongze

为分析洪泽湖水质与淮河入湖水质、水文气象等因子的关系,搜集洪泽湖地区淮阴站的气象数据,包括气温(Temp)、风速(WS)、降水(Pre),并搜集2012—2018年淮河入湖水量(Flow)、水质、三河闸水位(WL)数据,以及2012—2017年洪泽湖悬浮物(SPM)的数据^[16]。

1.3 数据分析

为分析2012—2018年水质变化趋势,采用Mann-Kendall(MK)检验分析水质指标变化趋势和突变点。用R平台中trend包mk.test函数进行MK统计检验,计算统计检验量 Z_{MK} ,采用双侧检验,在 α 显著水平下,如果 $|Z_{MK}| > Z_{(1-\alpha/2)}$,则拒绝无趋势的原假设,认为变化趋势显著; $Z_{MK} > 0$,则是显著上升趋势, $Z_{MK} < 0$,则是显著下降趋势,并利用MK检验突变点^[17]。

采用广义可加模型(generalized additive models,GAM)确定影响水质的因子。GAM模型是由数据驱动而非统计分布模型驱动的非参数回归模型,可同时对部分解释变量进行线性拟合,且对其他解释变量进行光滑函数拟合。模型不需要预先设定参数模型,模型通过解释变量的平滑函数建立,能够自动选择并拟合出合适的多项式^[18-19]。GAM分析使用R中mgcv包的gam函数。

$g(E(Y)) = s_1(Temp) + s_2(WS) + s_3(Pre) + s_4(Flow) + s_5(WL) + s_6(SPM) + s_7(H - Y) + \beta$ (1)

式中,g是连接函数,s是光滑函数,E(Y)是因变量的期望值,X是水文气象因子作为自变量。构建模型后,采

用 vif 函数先排除共线性较高的自变量, 以恒等联系函数作为连接函数, 平滑回归项采用样条平滑函数估计, 通过不断以 P 值删除统计学不显著的变量, 对比不同模型之间的调整决定系数 R^2 和赤池信息准则 AIC, 得到最优模型。

结果中, F 检验值表示拟合强度, F 值越大表明拟合关系越强烈, 因子作用更强。自由度表示变量之间的线性关系程度, 自由度为 1 表示影响因素与因变量之间存在线性关系, 自由度大于 1 表示影响因素与因变量之间存在非线性关系。

2 结果

2.1 洪泽湖水文气象特征

2012—2018 年洪泽湖地区平均气温为 15.1°C , 冬季最低月平均气温为 0.5°C , 夏季最高月平均气温为 29.3°C , 年度变化较小。2012—2018 年降水量均值为 1130 mm , 呈逐年增加趋势, 降水集中在夏季 7 月 ($165\sim364 \text{ mm}$), 冬季降水较少, 除 2018 年外均低于 60 mm 。平均风速多年均值为 2.4 m/s , 3 月最大 ($3.7\sim2.7 \text{ m/s}$), 9 月最小 ($1.6\sim2.0 \text{ m/s}$), 季节变换趋势明显。2012—2018 年淮河入湖水量变化较大, 2013 年水量最小 (83 亿 m^3), 2017 年为 375.5 亿 m^3 , 多年均值为 231 亿 m^3 , 入湖水量主要集中在 7—9 月, 占各年均总量的 $30\%\sim57\%$ 。水位受人为调控, 一般在 6—8 月处于低水位 (多年均值 12.6 m), 12 月至次年 4 月处于高水位 (13.2 m)。悬浮物浓度先升后降, 2013 年达到最大值 (42 mg/L), 2017 年浓度下降至 32 mg/L , 其中 2015 年悬浮物浓度较低 (37.8 mg/L) (图 2)。

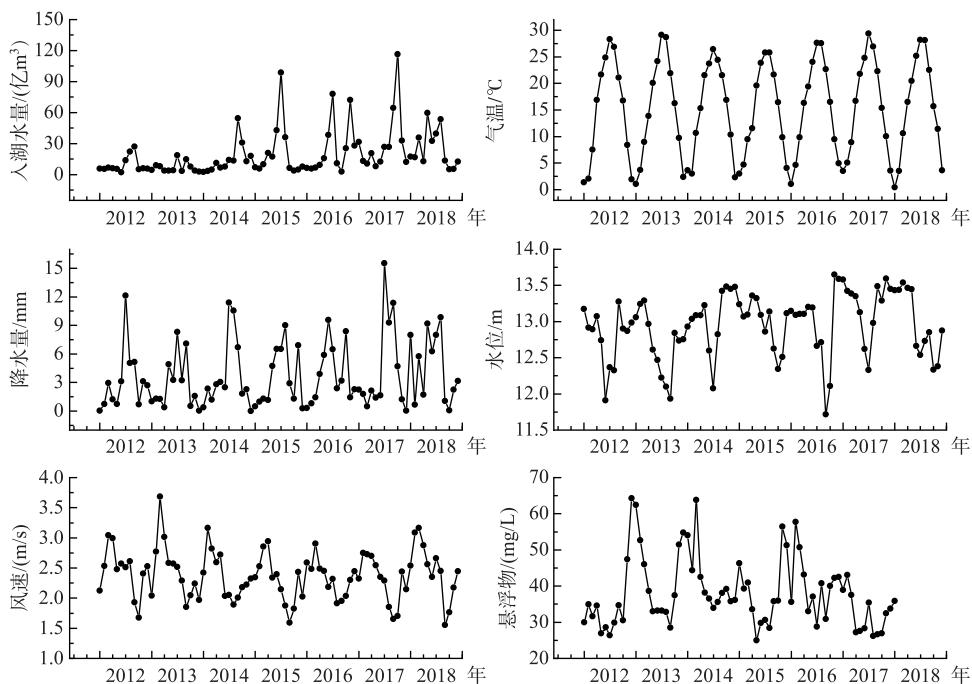


图 2 2012—2018 年洪泽湖水文气象因素逐月变化趋势

Fig.2 Monthly changes in hydrometeorological factors in Lake Hongze from 2012 to 2018

2.2 水质总体变化特征

2012—2018 年洪泽湖超过 III 类水的因子有 TN 和 TP (表 1)。水质指标中, 透明度范围为 $0.1\sim1.6 \text{ m}$, 均值为 0.48 m ; I_{Mn} 变化范围为 $3.11\sim5.93 \text{ mg/L}$, 均值为 4.13 mg/L (II 类); TN 浓度变化范围为 $0.88\sim3.21 \text{ mg/L}$, 均值为 1.74 mg/L (V 类); TP 浓度变化范围为 $0.003\sim0.150 \text{ mg/L}$, 均值为 0.08 mg/L (IV 类)。Chl.*a* 浓度多年均值为 0.008 mg/L 。

Mann-Kendall 趋势检验结果显示, I_{Mn} 、Chl.*a* 的 *Z* 值分别为 -4.73 、 -5.36 , 均呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), 在 2015 年 6 月识别出 I_{Mn} 与 Chl.*a* 突变点, 在此之前变化较小, 之后显著下降。TN、TP 和透明度的 *Z* 值为 -0.18 、 -0.24 和 1.13 , 整体变化趋势不显著(图 3), 存在多个突变点, 局部年份变化明显, 如透明度在 2013—2014 年的上升趋势、2015—2016 年的轻微下降、2016 年后略微上升的变化; TN 浓度在 2012 年识别出突变点, 2013—2015 年为突变区域, TN 浓度显著下降, 2016—2018 年 TN 浓度有所上升; TP 在 2013 年产生突变点, 浓度缓慢下降。

表 1 2012—2018 年洪泽湖水质指标年均值

Tab.1 Annual averages of water quality parameters in Lake Hongze from 2012 to 2018

年份	SD/m	$I_{Mn}/$ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	Chl. <i>a</i> / (mg/L)
2012	0.39 ± 0.12	4.42 ± 0.33	1.97 ± 0.71	0.09 ± 0.03	0.010 ± 0.006
2013	0.51 ± 0.29	4.41 ± 0.63	1.67 ± 0.44	0.08 ± 0.02	0.013 ± 0.004
2014	0.59 ± 0.35	4.32 ± 0.52	1.63 ± 0.24	0.08 ± 0.03	0.006 ± 0.003
2015	0.41 ± 0.35	4.15 ± 0.42	1.35 ± 0.23	0.08 ± 0.02	0.009 ± 0.005
2016	0.40 ± 0.23	3.95 ± 0.33	1.88 ± 0.53	0.07 ± 0.02	0.005 ± 0.003
2017	0.58 ± 0.25	3.87 ± 0.39	1.80 ± 0.60	0.07 ± 0.03	0.004 ± 0.002
2018	0.48 ± 0.23	3.77 ± 0.33	1.89 ± 0.46	0.09 ± 0.03	0.005 ± 0.003
均值 类别	0.48	4.13	1.74	0.08	0.008
	—	III	V	IV	—

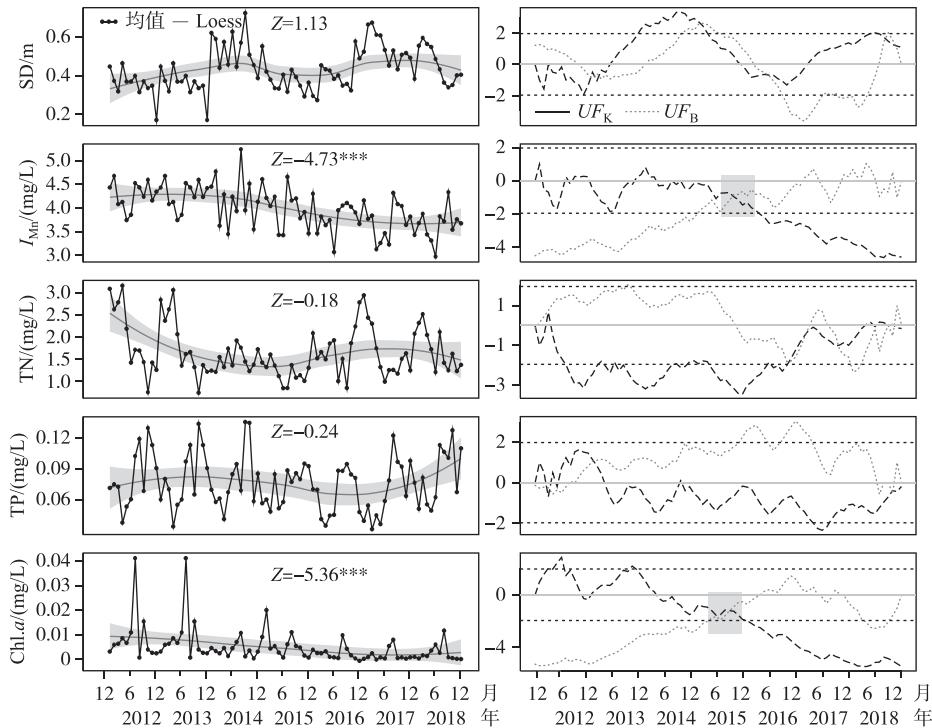


图 3 2012—2018 年洪泽湖水质指标逐月变化趋势

Fig.3 Monthly changes in water quality parameters in Lake Hongze from 2012 to 2018

2.3 不同湖区水质变化特征

方差分析结果显示,成子湖、溧河洼和过水区的透明度、TN 和 TP 浓度均值存在显著差异(表 2)。LSD 法(最小显著性差异法)的多重比较结果显示,不同湖区的透明度、TN 和 TP 浓度存在显著差异。成子湖的透明度均值为 0.62 m,显著高于溧河洼和过水区;过水区的 TN、TP 浓度均值分别为 2.06、0.09 mg/L,较成子湖和溧河洼高;而 I_{Mn} 和 Chl.a 浓度在各湖区间差异不显著。

表 2 洪泽湖不同湖区水质指标方差分析和多重比较

Tab.2 One-way ANOVA and multiple comparisons of water quality parameters in different regions of Lake Hongze

水质指标	成子湖	溧河洼	过水区	P
SD/m	0.62±0.18 ^a	0.41±0.16 ^b	0.45±0.13 ^b	<0.001 ***
$I_{\text{Mn}}/\text{(mg/L)}$	4.17±0.89 ^{ab}	4.31±0.86 ^a	4.03±0.50 ^b	0.061
TN/(mg/L)	1.43±0.69 ^b	1.44±0.61 ^b	2.06±0.70 ^a	<0.001 ***
TP/(mg/L)	0.07±0.03 ^b	0.08±0.04 ^b	0.09±0.03 ^a	0.004 **
Chl.a/(mg/L)	0.009±0.01	0.009±0.01	0.007±0.00	0.185

** 和 *** 分别表示在 0.01 和 0.001 级别呈显著差异。

不同湖区水质 MK 检验结果显示(图 4),成子湖、溧河洼和过水区的 TN、TP 的总体变化不明显;过水区的透明度有显著上升;而 Chl.a 浓度在成子湖、溧河洼和过水区的 Z 值分别为 -5.53、-3.89 和 -4.73,均下降明显, I_{Mn} 在成子湖、溧河洼的 Z 值为 -6.84、-7.47,下降明显,而在过水区呈现上升趋势(Z 值为 2.77)。

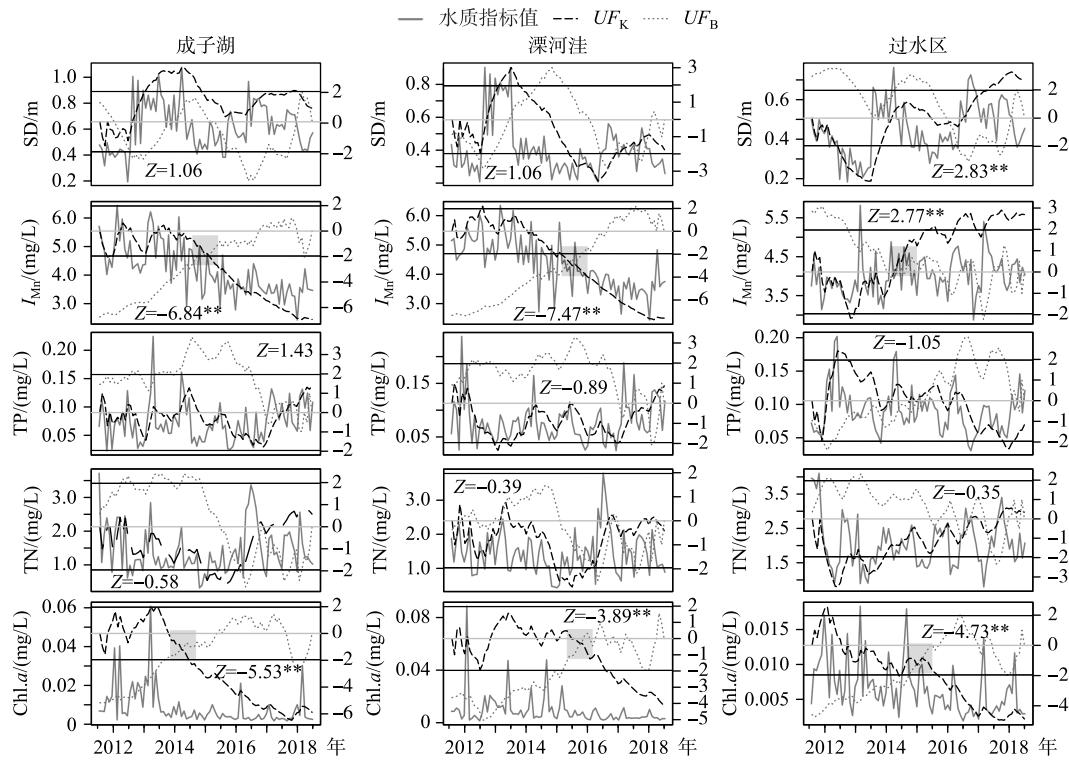


图 4 2012—2018 年洪泽湖不同湖区水质指标逐月变化趋势(图中水平线表示置信范围)

Fig.4 Monthly changes in water quality parameters in different regions of Lake Hongze from 2012 to 2018

2.4 水质变化的影响因素分析

相关分析结果显示,淮河水对洪泽湖的整体水质影响显著,尤其与氮、磷浓度呈极显著相关(表 3)。

就不同湖区而言,过水区对于淮河水质变化的响应更加强烈,淮河水质与不同湖区水质的相关性由过水区、溧河洼、成子湖顺序逐渐减弱,其中与过水区的TN、TP浓度的相关系数分别达到0.757、0.626,表明淮河水水质对于洪泽湖水质,尤其是氮、磷浓度存在显著影响。

表3 洪泽湖不同湖区与淮河水质指标 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson correlation coefficient of water quality parameters between different regions of Lake Hongze and Huaihe River

项目	全湖		成子湖		溧河洼		过水区	
	相关系数	P	相关系数	P	相关系数	P	相关系数	P
I_{Mn}	0.114	0.301	-0.035	0.752	-0.152	0.168	0.380	<0.001 ***
TN	0.617	<0.001 ***	0.160	0.146	0.215	0.049 **	0.757	<0.001 ***
TP	0.566	<0.001 ***	0.257	0.018 **	0.233	0.033 **	0.626	<0.001 ***

*** 表示在0.001级别显著相关。

通过GAM模型分析水质指标与水文气象因子、淮河水质的关系。结果显示,洪泽湖不同湖区水质的影响因素有所不同。过水区与淮河的TN、TP浓度拟合,自由度为1,呈线性关系;且 I_{Mn} 之间拟合度较高,进一步说明淮河与过水区水质呈强关联性。成子湖、过水区的Chl.a浓度与 I_{Mn} 的关系较强,而溧河洼的Chl.a浓度与降水、透明度的关系显著。在成子湖与溧河洼,透明度与淮河TP浓度的关系强烈,呈线性关系(表4)。

表4 洪泽湖不同湖区水质指标与水文气象、淮河水质等因素的GAM拟合结果

Tab.4 GAM fitting results of water quality parameters and hydrometeorological influencing factors in different regions of Lake Hongze

湖区	自变量	因变量	自由度	参考自由度	F	P
成子湖	SD	H-TP	1.00	1.00	6.76	0.011 *
	TN	Flow	1.87	1.98	4.55	0.019 *
	Chl.a	I_{Mn}	1.00	1.00	13.54	0.000 ***
溧河洼	SD	H-TP	1.00	1.00	6.90	0.010 *
	I_{Mn}	WL	1.78	1.95	6.65	0.006 **
	Chl.a	Pre	1.73	1.93	3.12	0.033 *
过水区	SD	SD	1.00	1.00	5.34	0.023 *
	SD	TP	1.92	1.99	9.15	<0.001 ***
	SD	WL	1.32	1.54	6.29	0.014 *
	I_{Mn}	H- I_{Mn}	1.73	1.93	9.92	0.001 ***
	TN	Temp	1.00	11.00	13.51	<0.001 ***
		SPM	1.73	1.93	4.14	0.013 *
		H-TN	1.00	1.00	96.36	<0.001 ***
	TP	SPM	1.42	1.67	7.54	0.005 **
		H-TP	1.00	1.00	63.52	<0.001 ***
	Chl.a	I_{Mn}	1.88	1.99	4.34	0.013 *

*、** 和 *** 分别表示在0.05、0.01 和 0.001 级别变量通过显著性检验。H-TN、H-TP 和 H- I_{Mn} 分别代表淮河总氮、总磷和高锰酸盐指数。

3 讨论

3.1 洪泽湖营养元素的时空变化

从整体和各湖区来看,洪泽湖2012—2018年TN、TP浓度均无显著变化。整体均值维持在较高水平,而过水区TN、TP浓度较成子湖、溧河洼更高(图5)。作为过水性湖泊,入湖河流长期持续的外源输入可能是使

得湖泊氮、磷浓度偏高和空间分布差异的原因.

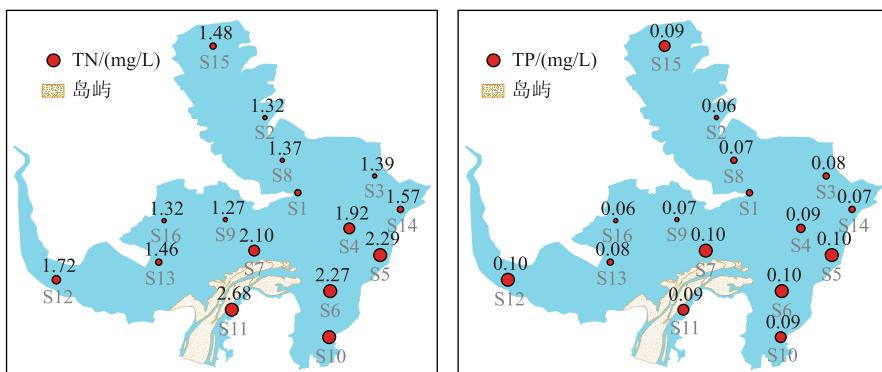


图 5 2012—2018 年洪泽湖总氮、总磷浓度均值空间格局

Fig.5 Spatial patterns in average concentrations of TN and TP in Lake Hongze from 2012 to 2018

河流的外源输入是洪泽湖水质变化的关键影响因素,淮河水与洪泽湖水质的相关性较高.根据以往的研究和淮河水资源公报的数据,淮河的化学需氧量、氨氮浓度逐年下降^[20],淮河 TN、TP 浓度处于较高水平(图 6),这与洪泽湖的 TN、TP 浓度在缓慢降低中仍然维持在较高水平的现象较一致^[13,21]. 随着近年来淮河水环境治理工作的加强,流域内污染物排放也呈逐步减少趋势,对流域内水质变化起到了积极作用.

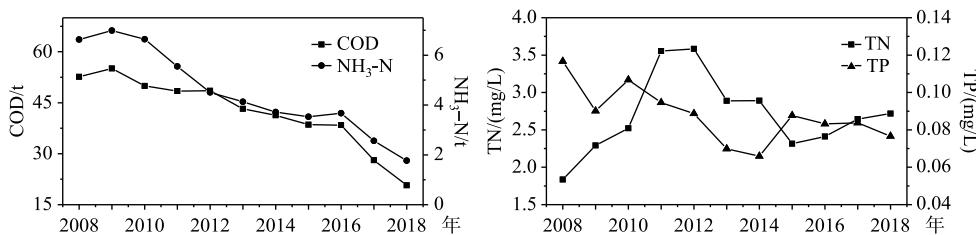


图 6 淮河干流化学需氧量、氨氮排放量^[20]与总氮、总磷浓度长期变化特征

Fig.6 Changes in discharges of COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ and concentration of TN and TP in the mainstream of Huaihe River

长期的高浓度氮、磷输入可能是洪泽湖氮、磷浓度较高的重要原因. 氮、磷元素的循环模式中,氮元素主要依靠反硝化作用和出湖河流流出湖泊系统,部分元素以颗粒态氮的形式沉降至泥水界面^[22]. 磷元素在稳定水体环境中,经历不断的悬浮—沉降—再悬浮的过程,由于缺少氮元素的水气界面交换去除的过程,更容易滞留湖体^[23-24]. 有研究认为,1983—2005 年的洪泽湖入湖泥沙淤积率达到 47%,年均 540 万 t,73% 分布在淮河入湖处,部分进入湖中^[25-26]. 不断输入的营养盐及泥沙吸附作用使得湖泊氮、磷元素在湖泊富集^[27],再通过扰动等物理作用、生物促进的硝化反硝化等化学作用释放到湖泊中,形成高浓度 TN、TP. 另一方面,近年来洪泽湖蓄水泄洪调控能力有所加强,南水北调工程实施后,非汛期规划蓄水位由 13 m 提升至 13.5 m,进一步提升了洪泽湖水环境容量,可能也是促进氮、磷元素变化趋于稳定的因素之一^[4].

而氮、磷浓度的空间分异(图 5),可能是不同湖区受到淮河的影响程度不同造成的. GAM 分析结果中,过水区的水质与淮河水质变化的关系更加显著,对于悬浮物浓度的变化响应更加明显. 这是由于洪泽湖形态复杂,存在吞吐流和风生流两种潮流形式^[28],当夏季淮河汛期来临时,洪泽湖下游闸门开启,强大的泄流形成引起全湖的吞吐流,造成各个湖区水体交换频率的差异,过水区水流速度较快,而成子湖、溧河洼湖区水体交换速度较慢. 一方面,成子湖、溧河洼水体交换频率相对较低、流速较慢,水生植物较多,水体中颗粒态氮、磷元素发生沉降,导致水体中 TN、TP 浓度相对较低. 另一方面,流速较低时,底泥仅产生浓度梯度释放的分子扩散,流速增大,泥水边界中孔隙水释放氮、磷,流速继续增加会使大量悬浮物进入水体^[29-30]. 过水区

更高的流速形成大量悬浮物,底泥释放导致较高的TN、TP浓度,从而形成了TN、TP浓度的空间差异。

3.2 洪泽湖叶绿素a浓度变化

在TN、TP浓度变化不大的条件下,2012—2018年洪泽湖整体和各湖区Chl.a浓度下降明显。影响藻类生长繁殖的因素很多,如适宜的光照、温度、稳定的水体环境等,在适宜的条件下聚集才能形成水华^[31]。GAM模型中Chl.a浓度与 I_{Mn} 、降水、透明度关系较强。 I_{Mn} 表征了水体中被高锰酸盐氧化的无机质和有机质浓度,藻类生长繁殖过程影响湖泊中有机质浓度,会对 I_{Mn} 变化产生直接影响^[32]。而降水和透明度仅与溧河洼Chl.a浓度变化有关。

以往对藻类的研究表明,藻类生长和水华暴发可能存在临界流速,随着流速增大,藻类数量达到峰值后逐渐减少^[33]。有关洪泽湖浮游植物群落结构研究也指出,绿藻在细胞丰度和生物量上是优势门类,而蓝藻仅在细胞丰度上是优势门类^[7]。研究也表明,水动力作用的增强使得藻类聚集增值受到抑制,且易下沉的绿藻和硅藻替代能垂直自由运动的蓝藻而成为优势种^[34]。2012—2018年淮河入湖水量增加明显(图2),提高了水体交换能力,增加水流速度。因此淮河水量增加导致湖泊换水速度加快,对于洪泽湖的藻类聚集增殖可能起到了抑制作用,达到了抑制营养化的积极效果。

潮流和风能可能也会影响Chl.a浓度的分布。本文结果显示2015年以前不同湖区的Chl.a浓度有较大差异,成子湖、溧河洼Chl.a浓度较高。由于潮流的原因,洪泽湖不同湖区水体环境的水流速度差异大,而溧河洼、成子湖受到吞吐流的影响较小,风生流是主要的潮流形式^[28],较小流速和狭长的形态有利于藻类的聚集生长^[35]。同时,洪泽湖夏季盛行东南风,在潮流和风能的作用下,藻类可以由过水区向下风区的溧河洼、成子湖聚集,形成较明显的Chl.a浓度空间分布差异^[36-37]。2015年后,由于水量显著增加,各湖区的水流速度加快,成子湖、溧河洼Chl.a浓度下降较明显,各个湖区之间差异减小,但各区域的流场对流量变化响应速度有所差异,模拟结果显示,洪泽湖进出湖区域流速最高,其次为成子湖,流速最低区域为溧河洼,因此可能导致各区域Chl.a、 I_{Mn} 变化有所差异^[38-39]。

3.3 富营养化控制与生态修复建议

湖泊污染源量多面广,绝大部分污染物最终都通过环湖河道进入湖泊。淮河是洪泽湖的主要入湖河流,较高的污染物输入可能是洪泽湖中氮磷元素富集的重要原因,如2003—2010年期间,淮河向洪泽湖平均输入TN和TP分别为7.2万和0.37万t,分别占总入湖通量的84.6%、81.5%^[40]。淮河对洪泽湖水质的决定性影响,因此提升淮河水环境质量对削减洪泽湖营养物外源输入至关重要。应当进一步削减淮河上游氮、磷营养元素的输入,如控制工业污水排放、集中规模化农业生产以减少肥料污染、渔业养殖中的尾水处理,以此削减外源污染物、降低氮磷输入;同时在可操作的情况下优化水利工程调度,维持湖泊水体交换能力,增强水体流动性,防控藻类的异常增殖^[41]。

内源污染也是洪泽湖水质变化的重要影响因素,大面积圈圩、围网养殖降低自然水域面积,养殖污染则形成过高的营养负荷,过多的有机质也会引起水体缺氧^[42]。湖内还存在大量旅游船、住家船、餐饮船,高强度人类活动、污染输入与沉积物内源释放使得近年来水质改善效果不佳。建议逐步压缩圈圩、围网养殖面积以减轻养殖污染输入、控制餐饮船数量以减少生活污水排放,并可在底泥内源重污染区(如溧河洼)开展生态疏浚,降低内源负荷以提升湖泊水环境容量^[43]。对退圩还湖和生态疏浚区,分析典型水生植物对水位波动、水质条件、基底性状以及水下地形等环境特征的适应性,明确不同物种适宜的生境条件,基于微地形改造、基质改良、人工定植等方法,促进洪泽湖水生生物的恢复,构建湖滨带、湖湾的草型生态系统^[44]。

4 结论

- 1) 2012—2018年洪泽湖Chl.a浓度、 I_{Mn} 总体呈显著下降趋势;主要污染物TN、TP浓度变化趋势不明显,长期处于IV类和V类水,与2012年以前的研究相比,氮、磷浓度略有降低。
- 2) 不同湖区来看,过水区、成子湖和溧河洼水质状况存在显著差异。成子湖和溧河洼的Chl.a浓度较过水区高,TN、TP浓度则较过水区低;透明度则是成子湖高于溧河洼和过水区。2012—2018年不同湖区的Chl.a浓度均明显下降;成子湖、溧河洼 I_{Mn} 下降显著,但过水区 I_{Mn} 呈上升趋势。
- 3) 过水区水质受悬浮物浓度和淮河入湖水质的影响较强,过水区的TN、TP浓度与淮河氮、磷浓度呈高

度相关,且过水区与淮河的 I_{Mn} 亦显著相关。成子湖、过水区的 Chl. a 浓度与水体 I_{Mn} 关联性强,而溧河洼的 Chl. a 浓度与降水、透明度关系显著。

5 参考文献

- [1] Ma RH, Yang GH, Duan HT et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Scientia Sinica: Terrestrae*, 2011, **41**(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [2] Qin BQ, Gao G, Zhu GW et al. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**: 855-864. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **58**: 855-864.]
- [3] 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.]
- [4] Wu Y, Dai R, Xu YF et al. Statistical assessment of water quality issues in Hongze lake, China, related to the operation of a water diversion project. *Sustainability*, 2018, **10**(6): 1885. DOI: 10.3390/su10061885.
- [5] Zhu TS, Liu M, Shen HL et al. Eutrophication assessment and limited factors of impounded lakes in the east route of South-to-North water transfer project. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(12): 2992-3002. [朱天顺, 刘梅, 申恒伦等. 南水北调东线湖群水体营养状态评价及其限制因子研究. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(12): 2992-3002.]
- [6] Wan HX, Xue B, Guo Y et al. Status and trends of the studies for the five largest freshwater lakes in China: Findings from bibliometric analysis based on Web of Science. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(6): 8-18. [万洪秀, 薛滨, 郭娅等. 中国五大淡水湖研究态势: 基于 WOS 的文献计量分析. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(6): 8-18.]
- [7] Wu TH, Liu JS, Deng JM et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze. *J Lake Sci.*, 2019, **31**(2): 440-448. DOI: 10.18307/2019.0213. [吴天浩, 刘劲松, 邓建明等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 440-448.]
- [8] Qi LY, Huang JC, Gao JF et al. Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze. *J Lake Sci.*, 2016, **28**(3): 583-591. DOI: 10.18307/2016.0314. [齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰等. 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 583-591.]
- [9] Cui CX, Hua WH, Yuan GW et al. Assessment and trend analysis on water quality in Hongze Lake. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2013, **31**(10): 44-47. [崔彩霞, 花卫华, 袁广旺等. 洪泽湖水质现状评价与趋势分析. 中国资源综合利用, 2013, **31**(10): 44-47.]
- [10] Cheng Z, Sun X. Analysis of water pollution situation and development trend in Hongze Lake. *Environmental Science and Technology*, 1996, **9**(1): 15-18. [程钟, 孙祥. 洪泽湖水质污染状况及其发展趋势分析. 江苏环境科技, 1996, **9**(1): 15-18.]
- [11] Wang ZQ, Zhang NH, Zhang Y et al. Eutrophication assessment of water quality in Hongze Lake. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, **25**(2): 37-41. [王兆群, 张宁红, 张咏等. 洪泽湖水质富营养化评价. 仪器仪表与分析监测, 2010, **25**(2): 37-41.]
- [12] Song QS. Water quality analysis of Hongze Lake and pollution prevention countermeasures. *Shanghai Environmental Sciences*, 1986, **5**(1): 30-33. [宋秋声. 洪泽湖水环境质量分析及污染治理对策. 上海环境科学, 1986, **5**(1): 30-33.]
- [13] Li B, Pu P. Study on the evolution tendency of water quality in Huai river basin and Hongze Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, **12**(1): 67-73. [李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析. 长江流域资源与环境, 2003, **12**(1): 67-73.]
- [14] Zhang J, Shu WX. Analysis of water quality change trend in Hongze Lake in recent years. *Zhi Huai*, 2013, **61**(12): 15-16. [张君, 舒卫先. 近年来洪泽湖水质变化趋势分析. 治淮, 2013, **61**(12): 15-16.]
- [15] Wang X, Shen HJ, Liu L et al. Analysis and assessment on water quality of Hongze Lake. *Environment and Development*, 2019, **31**(9): 11-13, 15. [王霞, 沈红军, 刘雷等. 洪泽湖水质特征分析及评价. 环境与发展, 2019, **31**(9): 11-13, 15.]

- [16] Duan HT, Cao ZG, Shen M et al. Detection of illicit sand mining and the associated environmental effects in China's fourth largest freshwater lake using daytime and nighttime satellite images. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 606-618. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.359.
- [17] Pu FG. Application of Mann-Kendall test method on water quality trend analysis in Fuxian Lake. *Environmental Science Survey*, 2014, **33**(6) : 83-87. [普发贵. Mann-Kendall 检验法在抚仙湖水质趋势分析中的应用. 环境科学导刊, 2014, **33**(6) : 83-87.]
- [18] Zhu Y, Kang MY. Application of ordination and GLM/GAM in the research of the relationship between plant species and environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(7) : 807-811. [朱源, 康慕谊. 排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用. 生态学杂志, 2005, **24**(7) : 807-811.]
- [19] Murphy RR, Perry E, Harcum J et al. A Generalized Additive Model approach to evaluating water quality: Chesapeake Bay case study. *Environmental Modelling and Software*, 2019, **118**: 1-13. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.03.027
- [20] The Huaihe River Commission of the ministry of Water Resources, P.R.C ed. Huairiver Water Resources Bulletin. Bengbu: The Huaihe River Commission of the ministry of Water Resources, P.R.C, 2008–2018. [淮河水利委员会. 淮河水资源公报. 蚌埠: 淮河水利委员会, 2008—2018.]
- [21] Liu T, Chuai XM, Chen XF et al. Evolution of lake water environment in west Jiangsu Province and analysis of causes. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(9) : 995-1002. [刘涛, 樊小明, 陈小峰等. 江苏省西部湖泊水环境演变过程与成因分析. 环境科学研究, 2011, **24**(9) : 995-1002.]
- [22] Zhang YP, Wan Y, Nie Q et al. Biogeochemical process and its ecological significance of nitrogen in lake systems. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2016, **52**(1) : 5-15. [张亚平, 万宇, 聂青等. 湖泊水体中氮的生物地球化学过程及其生态学意义. 南京大学学报: 自然科学, 2016, **52**(1) : 5-15.]
- [23] Wang H, Chen HX, Xu ZA et al. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4) : 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421. [王华, 陈华鑫, 徐兆安等. 2010-2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨. 湖泊科学, 2019, **31**(4) : 919-929.]
- [24] Hupfer M, Gfichter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Sciences*, 1995, **57**(4) : 1015-1621. DOI: 10.1007/bf00878395.
- [25] Yu BY, Yu YS. Sediment deposition in Hongze Lake. *Journal of Sediment Research*, 2010, **54**(6) : 36-41. [虞邦义, 郁玉锁. 洪泽湖泥沙淤积分析. 泥沙研究, 2010, **54**(6) : 36-41.]
- [26] Chen L, Zhang WB, Yu H et al. Study on floating sand accumulation, physicochemical characteristics and heavy metal pollution in the sediment of Lake Hongze. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(12) : 219-226. [陈雷, 张文斌, 余辉等. 洪泽湖输沙淤积、底泥理化特性及重金属污染变化特征分析. 中国农学通报, 2009, **25**(12) : 219-226.]
- [27] Hu ZT, Sun HW, Tan Y. Adsorptive characteristic of nutrient elements and influential factors in Taihu Lake sediment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(6) : 1212-1216. [胡智弢, 孙红文, 谭媛. 湖泊沉积物对 N 和 P 的吸附特性及影响因素研究. 农业环境科学学报, 2004, **23**(6) : 1212-1216.]
- [28] Jiang JH, Huang Q, Yuan JX. Analysis of hydrological features of Hongze Lake. *Jiangsu Water Resources*, 1996, **16**(5) : 49-54. [姜加虎, 黄群, 袁静秀. 洪泽湖水文特征分析. 江苏水利科技, 1996, **16**(5) : 49-54.]
- [29] Zhong XY, Wang CH, Yu CR et al. Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8) : 2862-2869. [钟小燕, 王船海, 庾从蓉等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究. 环境科学学报, 2017, **37**(8) : 2862-2869.]
- [30] Li YP, Pang Y, Lu J et al. On the relation between the release rate of TN, TP from sediment and water velocity. *J Lake Sci*, 2004, **16**(4) : 318-324. DOI: 10.18307/2004.0405. [李一平, 逢勇, 吕俊等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量. 湖泊科学, 2004, **16**(4) : 318-324.]
- [31] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3) : 589-595. [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3) : 589-595.]
- [32] Fan AX, Wang ZP, Wang C et al. The characteristics and cause analysis of oxygen consumption substances for the waterbody in the main channel of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3) : 871-879. [范傲翔, 王智鹏, 王超等. 南水北调中线总干渠水体耗氧特征及成因. 环境科学学报,

- 2020, **40**(3): 871-879.]
- [33] Wu XH, Li QJ. Reviews of influences from hydrodynamic conditions on algae. *Ecology and Environmnet*, 2010, **19**(7): 1732-1738. [吴晓辉, 李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1732-1738.]
- [34] Elliott JA, Defew L. Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature. *Hydrobiologia*, 2012, **681**(1): 105-116. DOI: 10.1007/s10750-011-0930-y.
- [35] Wu TF, Qin BQ, Ma JR et al. Movement of cyanobacterial colonies in a large, shallow and eutrophic lake: A review. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(36): 3833-3843. [吴挺峰, 秦伯强, 马健荣等. 浅水富营养化湖泊中蓝藻群体运动研究述评. 科学通报, 2019, **64**(36): 3833-3843.]
- [36] Jiang JH, Huang Q. Numerical simulation of wind-driven currents in Hongze Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1996, **17**(3): 7-12. [姜加虎, 黄群. 洪泽湖风生流数值模拟. 海洋湖沼通报, 1996, **17**(3): 7-12.]
- [37] Fan CX, Chen YW. Effect of prevailing wind in summer on distribution of algal bloom in Lake Taihu. *Shanghai Environmental Science*, 1998, **17**(8): 4-6, 11. [范成新, 陈宇炜. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响. 上海环境科学, 1998, **17**(8): 4-6, 11.]
- [38] Liu YJ, Xu GB. Effects of wind field and throughput flow on the flow field of Hongze Lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, **31**(2): 174-178, 184. [刘翊竣, 徐国宾. 风场和吞吐流对洪泽湖流场的影响分析. 水资源与水工程学报, 2020, **31**(2): 174-178, 184.]
- [39] Abirhire O, Hunter K, Davies JM et al. An examination of the long-term relationship between hydrologic variables and summer algal biomass in a large Prairie reservoir. *Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 2019, **44**(1): 79-89. DOI: 10.1080/07011784.2018.1531064.
- [40] Ji XM, Wen L, Zhang M et al. Analysis of pollutant flux into Hongze Lake. *Jiangsu Water Resources*, 2014, **34**(7): 45-46, 48. [纪小敏, 闻亮, 张鸣等. 洪泽湖入湖污染物通量分析. 江苏水利, 2014, **34**(7): 45-46, 48.]
- [41] Bailey-Watts AE, Kirika A, May L et al. Changes in phytoplankton over various time scales in a shallow, eutrophic: The Loch Leven experience with special reference to the influence of flushing rate. *Freshwater Biology*, 1990, **23**(1): 85-111. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1990.tb00255.x.
- [42] Yang QX, Li WC. Environmental changes since foundation of pen-fish-farming in East Taihu Lake. *China Environmental Science*, 1996, **16**(2): 101-106. [杨清心, 李文朝. 东太湖围网养鱼后生态环境的演变. 中国环境科学, 1996, **16**(2): 101-106.]
- [43] Wang GX, Cheng XY, Pu PM. Lake eutrophication control in technology, theory and application. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 273-282. DOI: 10.18307/2002.0313. [王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 273-282.]
- [44] Qin BQ, Yang LY, Chen FZ et al. The mechanism and control technology of lake eutrophication and its application. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **56**(16): 1857-1866. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, **56**(16): 1857-1866.]