

2009—2021 年高邮湖水质 时空变化与驱动因素

蔡 平¹, 刘荣坤², 高鸣远³, 陈 葆¹, 郅 雅¹

(1. 江苏省江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225200; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

3. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于高邮湖2009—2021年7个主要水质参数长期监测数据, 对其水质状况进行评价, 并采用综合营养状态指数法(TLI)分析营养状态变化, 应用Mann-Kendall(MK)检验分析水质指标变化趋势, 通过相关性分析检验淮河来水、气候条件与水质指标之间的关系, 揭示淮河来水和气候条件对其水环境的影响。结果表明, 2009—2021年高邮湖TN、TP多年平均质量浓度为1.01 mg/L和0.069 mg/L, 整体变化趋势不明显; 高邮湖处于轻度富营养状态(TLI=55.4), Chl-a平均质量浓度为14.80 $\mu\text{g/L}$, 低于湖泊可接受阈值20 $\mu\text{g/L}$ 。相关性分析结果证明, 高邮湖水质受淮河来水影响显著, 此外气温、风速与湖体水质指标也呈现一定的相关性。

关键词: 气候条件; 水质演变; 浅水湖泊; 高邮湖

中图分类号: TV663

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)05-0004-0006

Spatial-temporal changes and driving factors of water quality in Gaoyou Lake from 2009 to 2021

CAI Ping¹, LIU Rongkun², GAO Mingyuan³, CHEN Bao¹, GAO Ya¹

(1. Jiangdu Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Yangzhou 225200, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the long-term monitoring data of seven main water quality parameters of Gaoyou Lake from 2009 to 2021, the water quality condition was evaluated, and the comprehensive trophic state index (TLI) method was used to analyze the changes of trophic state, and the Mann-Kendall (MK) test was applied to analyze the trends of water quality indicators, and the relationship between the incoming water, climatic conditions and water quality indicators was examined by correlation analysis to reveal the influence of the incoming water and climatic conditions of the Huai River on its water environment. The results show that the multi-year average concentrations of total nitrogen and total phosphorus in Gaoyou Lake from 2009 to 2021 are 1.01 mg/L and 0.069 mg/L, and the overall change trend is not obvious. Gaoyou Lake was in a mild eutrophic state (TLI=55.4), and the mean mass concentration of Chl-a was 14.80 $\mu\text{g/L}$, which was below the acceptable threshold of 20 $\mu\text{g/L}$ for the lake. The results of correlation analysis prove that the water quality of Gaoyou Lake is significantly influenced by the incoming

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021037)

作者简介: 蔡平(1967—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事河湖管理与保护工作。E-mail: 1875185255@qq.com

water of Huai River, in addition, the temperature and wind speed also show some correlation with the water quality index of the lake.

Key words: climate conditions; water quality evolution; shallow lakes; Gaoyou Lake

高邮湖主要承泄淮河来水,是淮水入江的主要通道,具有调蓄洪水的功能。淮河中上游及区间来水汇集于高邮湖,调蓄后经邵伯湖流入长江。过水性湖泊易受气候和上游来水的影响^[1]。气候变化可能通过改变降水和蒸发模式而对全球水循环产生重大影响,降水是内陆湖泊水量的重要贡献者。上游来水对过水性湖泊水生生态系统的影响表现为两方面:一方面水量的增加缩短了湖泊水体的水分交换周期,加速了湖泊污染物的稀释和自净;另一方面上游河流可能将大量污染物带入湖中,造成水质恶化^[2]。

高邮湖作为南水北调东线工程的重要调蓄湖泊及重要饮用水水源地,其水质直接关系到调水成效与供水安全。高邮湖受洪水脉冲作用强烈,水生生态系统脆弱,水质处于轻度富营养状态,有富营养化的趋势^[3]。本文综合高邮湖2009—2021年7个主要水质参数长期监测数据,分析2009—2021年高邮湖水质时空变化状况,定量解析不同因素对其变化的贡献,探究高邮湖水质演变趋势及主导因素,以期高邮湖水环境保护决策制定提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 研究区概况和点位布设

高邮湖位于江苏省中部、安徽省东部(北纬32°42′~33°41′,东经119°06′~119°25′),属淮河流域,是江苏省第三大湖。淮河入江水道贯穿高邮湖,其入湖水量占总入湖水量的95%,是典型的过水性湖泊。综合考虑入湖河流、湖泊形态、水产养殖和水动力条件等因素,共布设8个常规监测样点,其中北部湖区设4个监测点,西部湖区设2个监测点,南部湖区设2个监测点,监测频率为每月1次。

1.2 监测指标

根据区域水环境特征,测定代表性的水质参数包括TN、TP、COD_{Mn}、DO、NH₃-N、Chl-a和SD。为了分析高邮湖与淮河水质的关系,收集高邮站的气象数据,包括温度、风速、水位和降水量,同时收集2009—2021年淮河入湖水量、入湖水质数据。

1.3 数据分析方法

用综合营养状态指数(TLI)来评价每个月湖泊营养状态,计算方法如下。

$$I_{TLI}(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times I_{TLI,j} \quad (1)$$

式中: $I_{TLI}(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; $I_{TLI,j}$ 为第 j 个参数的营养状态指数; W_j 为第 j 个参数的营养状态指数的相关权重。各参数营养状态指数的计算公式和分级标准参照相关文献[6]。Chl-a、TP、TN、SD和COD_{Mn}的权重分别为0.267、0.188、0.179、0.183和0.183。采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级: $I_{TLI}(\Sigma) < 30$ 贫营养, $30 \leq I_{TLI}(\Sigma) \leq 50$ 中营养, $I_{TLI}(\Sigma) > 50$ 富营养, $50 < I_{TLI}(\Sigma) < 60$ 轻度富营养, $60 < I_{TLI}(\Sigma) \leq 70$ 中度富营养, $I_{TLI}(\Sigma) > 70$ 重度富营养。

采用Mann-Kendall(M-K)非参数突变检验法来分析水质变化趋势和突变点。MK统计检验由R(4.1.1版)平台中的趋势包mk.test函数完成。在双侧趋势检验中,如果统计检验的数量满足 $|Z| \geq Z(1-\alpha/2)$,则说明时间序列在 α 置信度下存在显著的变异趋势:当 $Z > 0$ 时显著增加,当 $Z < 0$ 时显著减少。

2 监测成果与数据分析

2.1 气象水文特征及入湖水质

2009—2021年高邮湖多年平均降水1101.5 mm,年平均气温16.2℃,呈周期性变化;年平均风速为2.2 m/s,呈极显著下降趋势($Z = -6.30$, $P < 0.001$);上游来水量各年份差异较大,近年来明显增加,2009年、2011—2014年、2019年入湖水量较小(0~74.1亿m³),其余年份入湖水量均超过100亿m³,2020年最大(305.1亿m³),多年平均入湖118.5亿m³,来水时间主要集中在7—9月。

淮河是高邮湖最主要的入湖河流,入湖水量占总入湖河流90%以上。2009—2021年淮河TN平均质量浓度为1.83 mg/L($Z = 0.08$);TP平均质量浓度为0.064 mg/L($Z = 1.76$, $P = 0.08$);COD_{Mn}质量浓度为4.23 mg/L($Z = 1.48$, $P = 0.14$);NH₃-N质量浓度为0.18 mg/L($Z = -4.77$, $P < 0.001$);DO质量浓度为8.92 mg/L($Z = 0.90$, $P = 0.37$)。整体来看水质变化不大,TN质量浓度较高,NH₃-N质量浓度有降低趋势。

2.2 水质年际变化特征

高邮湖2009—2021年的水质参数和TLI的平均值见图1。2009—2021年高邮湖超过Ⅲ类水

的指标是TN和TP,TP、NH₃-N和TN是影响水质和水生生物的营养物质。高邮湖的TN变化范围0.86~1.24 mg/L之间,平均值为1.01 mg/L(图1),M-K趋势检验结果(图2)显示,TN呈轻微上升趋势($Z=2.50, P<0.05$),存在多次突变,2009—2012年呈下降趋势,2012—2021年略有上升;高邮湖的NH₃-N变化范围0.10~0.20 mg/L,总体呈极显著下降趋势($Z=-7.02, P<0.001$),表明水质改善趋势明显;COD_{Mn}表征地表水中的有机污染物,高邮湖COD_{Mn}变化范围为3.95~4.88 mg/L,平均值为4.43 mg/L,COD_{Mn}2009—2012年和2017—2021年呈上升趋势,从2012—2017年呈下降趋势($P<0.01$)。

高邮湖2009—2013年和2017—2021年TP呈上升趋势,2013—2017年呈下降趋势,总体变化趋势不显著。高邮湖的透明度变化范围为0.27~0.40 m,2010—2014年透明度显著上升,2014—2018年透明度减小,2018年以后透明度变化不明显,总体变化趋势不明显($Z=-1.51$)。

Chl-a是浮游植物生物量的表征指标,高邮湖Chl-a质量浓度变化范围为7.52~23.33 μg/L,平均值为14.81 μg/L,总体呈缓慢上升趋势($Z=4.33, P<$

0.001)。TLI在50.3到55.4之间,总体变化趋势不明显,Chl-a质量浓度低于20 μg/L的可接受阈值^[7]。COD_{Mn}自2019年以来呈一定下降趋势,这得益于近几年高邮湖实施的退圩还湖和退养还湖工程。高邮湖退养还湖2017年底实施,其中高邮市退养还湖17.3 km²;退圩还湖专项规划于2017年获江苏省政府批复,于2020年1月在高邮湖陈家圩实施完成高邮湖退圩还湖一期工程,共清退圩区6.34 km²,清退圩埂35.1 km,恢复库容968.35万 m³。退圩还湖增加了水域面积,提高了水体自净能力,同时减少了圈圩、围网养殖带来的营养物和有机质,推进水域生态环境改善。

2.3 水质空间分异特征

方差分析结果显示,西部湖区、北部湖区和南部湖区的TN、TP、COD_{Mn}、Chl-a和DO质量浓度均值存在显著差异(表1),多重比较结果显示,西部湖区的TP、COD_{Mn}质量浓度均值分别为0.084、4.81 mg/L,显著高于北部湖区和南部湖区,南部湖区的TN、Chl-a质量浓度均值分别为1.18 mg/L、17.87 μg/L,较西部湖区和北部湖区高;而SD和NH₃-N质量浓度在各湖区间差异不显著。

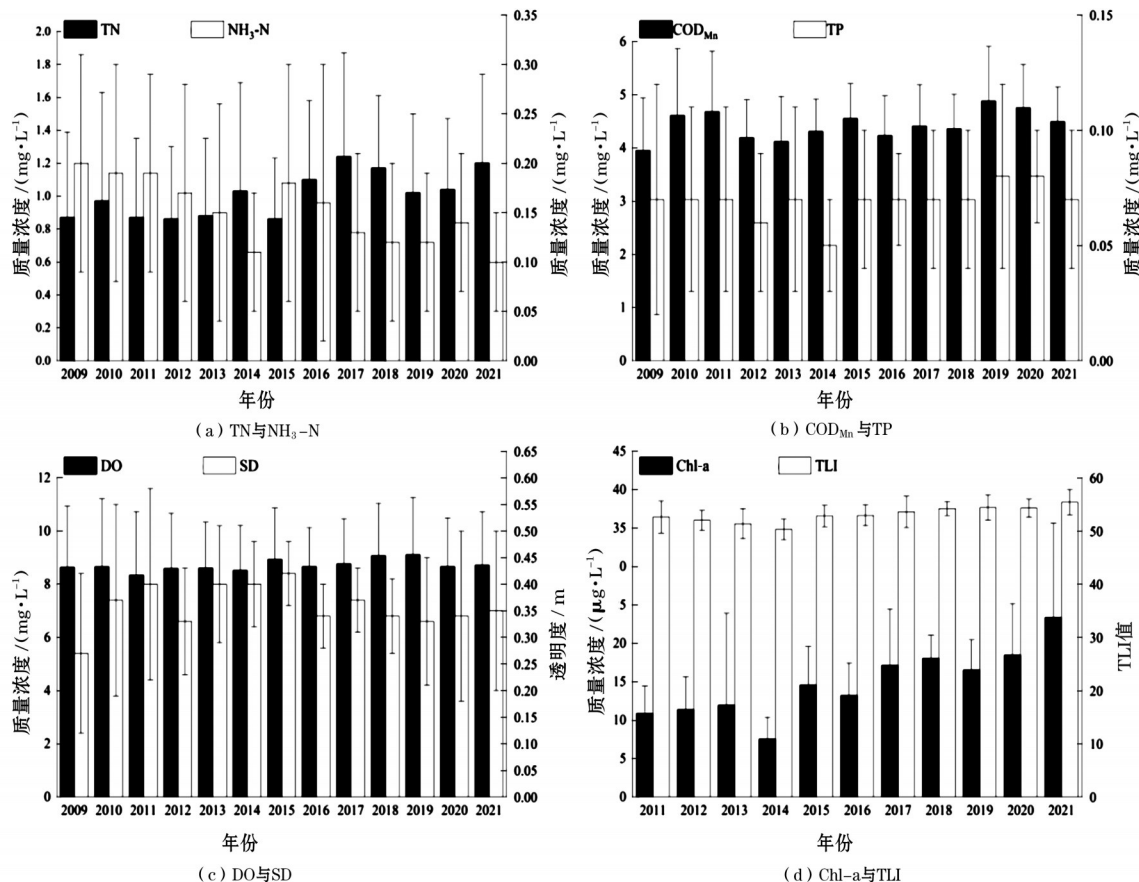


图1 2009—2021年高邮湖主要水质指标年际变化

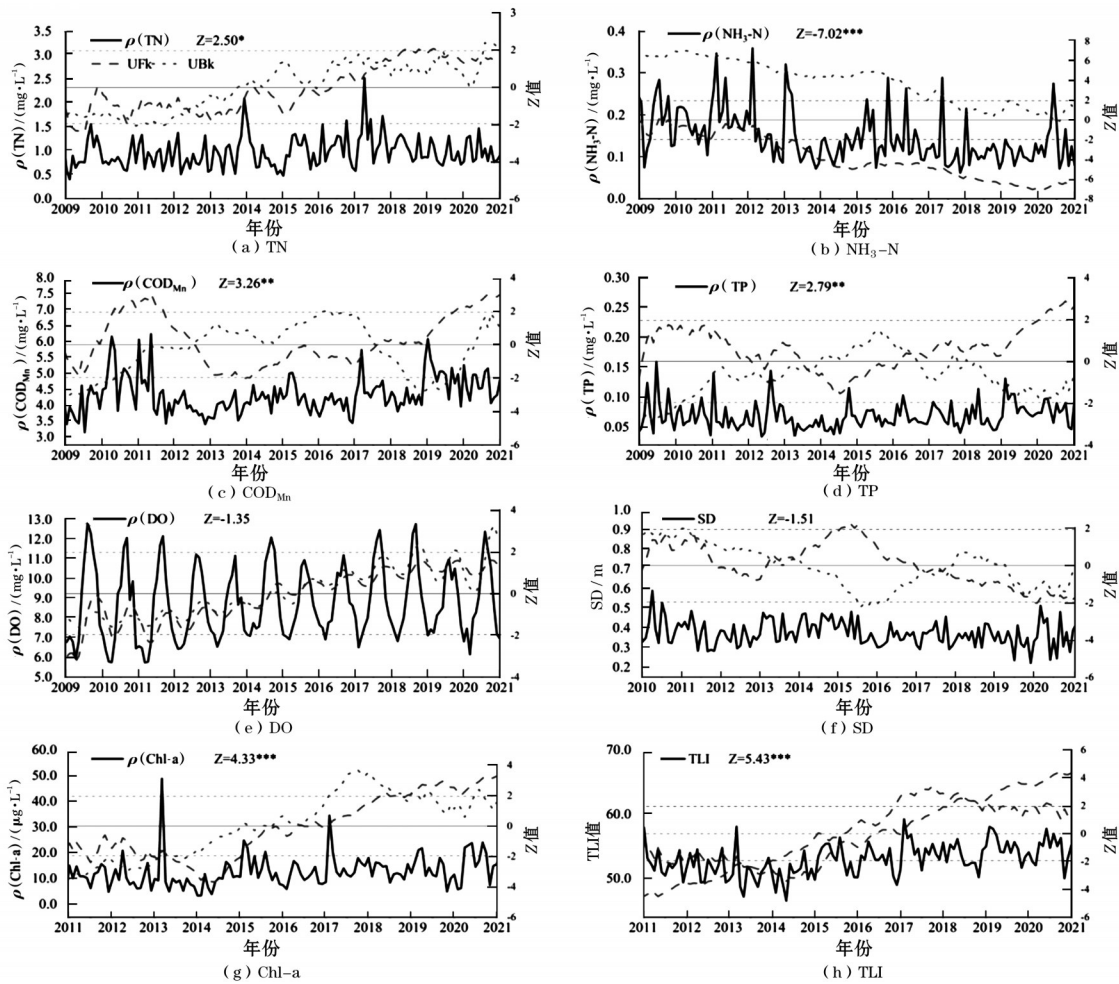


图2 2009—2021 年高邮湖水质指标逐月变化趋势

表1 高邮湖不同湖区水质指标方差分析和多重比较

湖区	DO/(mg·L ⁻¹)	SD / m	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	Chl-a/(μg·L ⁻¹)
西部湖区	8.77±2.01 ^a	0.36±0.12	1.04±0.57 ^c	0.084±0.033 ^a	0.16±0.10	4.81±0.84 ^a	16.39±16.11 ^a
北部湖区	8.89±1.92 ^a	0.36±0.12	0.87±0.47 ^b	0.064±0.036 ^b	0.15±0.10	4.57±0.94 ^b	12.26±12.20 ^b
南部湖区	8.45±2.18 ^b	0.37±0.12	1.18±0.49 ^a	0.063±0.024 ^b	0.14±0.09	3.91±0.56 ^c	17.87±9.71 ^a
全湖	8.72±2.00	0.36±0.12	1.01±0.52	0.069±0.033	0.15±0.10	4.44±0.89	15.01±12.89
P	0.015*	0.141	<0.001***	<0.001***	0.052	<0.001***	<0.001***

注:*, **, ***分别表示在0.05、0.01和0.001水平呈显著差异。

从空间上来看,西部湖区各水质指标均显著高于其他湖区,西部湖区主要是淮河入江水道改道段,受水补给影响最大,同时受到上游安徽利农河、铜龙河、沂龙河、白塔河等入湖河流的影响。当夏季淮河汛期来临时,入江水道大流量泄洪,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,西部湖区、南部湖区水流速度较快,而北部湖区水体交换速度较慢^[4-5]。一方面,北部湖区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、磷元素易发生沉降,使得水体中营养盐质量浓度相对较低^[8]。同时,西部湖区更高的流速会形成大量悬浮物,底泥释放也可能会导致较高的TN、TP质量浓度,从而形成了TN、TP质量浓度的空间差异。

2.4 水质演变驱动因素

分别对北部、西部、南部和全湖的水质指标与驱动因子做相关分析(图3),西部湖区TN与WL、FLOW、HTN,TP与COD_{Mn}也均与淮河相对应指标呈

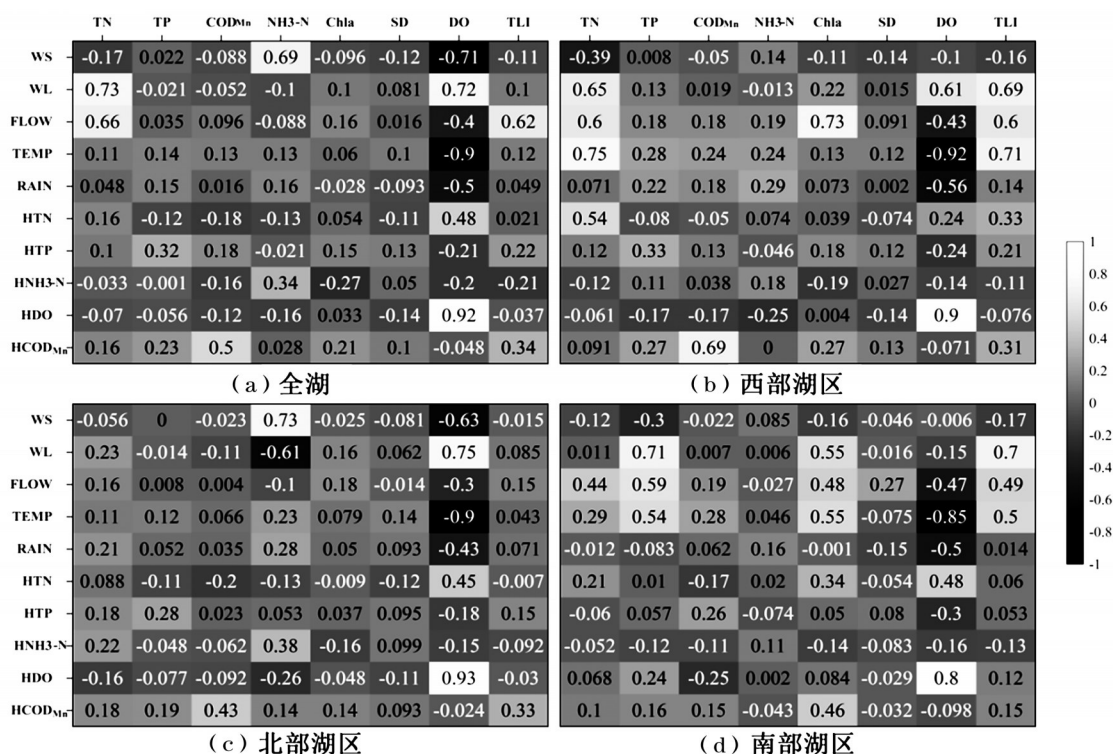


图3 不同湖区及水质指标与气象水文因子的相关性

显著正相关关系,TLI与WL、FLOW及淮河水质,均呈显著正相关关系($P<0.01$)。北部和南部湖区的各指标与入湖水量及水质的相关性不高。

根据 Spearman 相关性分析淮河来水和气候参数对高邮湖水质和TLI变化的影响。西部湖区的水质受入湖河流和水文气象的影响最为显著,南部湖区次之,北部湖区影响较小。TN、Chl-a和TLI与西部和南部湖区的入湖水量和水质有极显著的正相关关系($P<0.01$),西部湖区的TN和南部湖区的TP与入湖水量、水位和温度也呈高度正相关关系($P<0.01$),西部湖区的TN和南部湖区的TP与WS呈显著负相关关系($P<0.05$),有研究表明,风速下降会增加浅水湖泊水柱稳定性,这种稳定性会引起湖泊底层缺氧,从而导致沉积物中营养物质释放^[8]。北部湖区的TP和COD_{Mn}与淮河水质呈显著正相关关系($P<0.05$)。所有湖泊的DO与入湖水量、温度和降水量呈显著负相关关系,与淮河的DO呈显著正相关关系($P<0.01$)。

3 结论与建议

3.1 结论

(1)2009—2021年高邮湖TN、TP质量浓度超Ⅲ类水,为水质主要限制指标,COD_{Mn}达Ⅲ类水,长期变化趋势不明显,NH₃-N呈显著下降趋势,Chl-a呈

总体缓慢上升趋势。TLI结果显示高邮湖处于轻度富营养状态。水质空间差异体现为西部湖区各水质指标均显著高于其他湖区。

(2)由于淮河营养盐质量浓度较高,高邮湖污染物质量浓度随入湖水量的增加而升高,西部湖区受淮河来水影响最显著,湖体氮磷质量浓度与淮河氮磷质量浓度呈正相关关系,气温、风速变化也是驱动水质变化的重要原因。

3.2 水环境保护建议

高邮湖现阶段处于轻度富营养状态,氮磷质量浓度偏高。为维持高邮湖水质和保障供水安全,控制入湖营养盐负荷是改善高邮湖营养状态的前提,可通过生态修复削减入湖河流营养盐,在区域主要入湖河道两侧退化湿地开展湿地生态建设,恢复植被缓冲带和生态隔离带,增强湿地污染拦截功能。

面源污染输入是湖泊污染物的主要来源之一,高邮湖流域农业面源污染负荷占入湖负荷50%左右,可利用现有沟、渠、塘等建设生态沟渠、污水净化塘、地表径流集蓄池等设施,净化农田排水及地表径流。周边大量养殖池塘是威胁湖区水质的一个重要原因,建议推进落实《池塘养殖尾水排放标准》(DB 32/4043—2021),加大力度实施池塘生态化改造,促进养殖尾水达标排放和循环利用。

退圩还湖是我省湖泊保护的一项重要工程,建

议按照相关规划有序推进高邮湖的退圩还湖工程,稳步推进湖区内的圈圩、围网清退,充分发挥市场融资作用,建立政府与市场联动的河湖生态复苏投融资机制,对于腾退出来的水域,结合湖盆湖岸地形地貌特征与功能定位,开展洪泽湖退圩还湖区草型生态系统修复,构建健康水生生态系统。

参考文献:

- [1] 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[J].环境科学学报,2017,37(8):2862-2869.
- [2] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等.南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49.
- [3] CHANG F, CHANG Y. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir [J].

Advances in Water Resources, 2006, 29(1): 1-10.

- [4] WILSON CO, WENG Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois [J]. Science of the total environment, 2011, 409(20): 4387-4405.
- [5] 陈玥,管仪庆,苗建中,等.基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度[J].湖泊科学,2017,29(2): 398-408.
- [6] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002(5):47-49.
- [7] 魏文志,付立霞,陈日明,等.高邮湖水质与浮游植物调查及营养状况评价[J].长江流域资源与环境,2010,19(增刊1):106-110.
- [8] 李一平,逢勇,吕俊,等.水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J].湖泊科学,2004,16(4):318-324.

(上接第3页)

灾能力,客观认识了江苏省各地区水旱灾害风险水平,为各级政府有效开展水旱灾害防治和应急管理工作,切实保障经济社会可持续发展,提供权威的水旱灾害风险信息 and 科学决策依据^[3-4]。下一步工作中,应考虑结合重大工程建设、重要发展规划、重点领域需求,因地制宜、科学合理、安全规范将普查成果数据应用到日常工作中。

5.1 深化成果应用

此次风险普查调查扎实、成果详实,是目前全省水利系统掌握的更新、最全、最准、最权威的一套水利工程家底,在新一轮流域防洪规划、专项规划修编、河湖健康评价、规划统计年报等工作中可充分利用普查数据,发挥普查成果效益。

5.2 补齐抗旱短板

各地可利用本次干旱灾害致灾调查成果及干旱风险评估与区划成果,进一步加强抗旱组织建设,适当添置抗旱设备,修编抗旱预案。完善高亢地区调水体系,提高抗旱引水和蓄水工程调蓄能力,强化用水管理,科学制定用水计划,加强节水宣传和监督力度。

5.3 保证数据安全

普查数据安全、成果发布管理等相关文件,明确了普查数据“谁生产谁负责、谁使用谁负

责、谁委托谁负责”原则,在做好成果应用的同时要兼顾数据安全,明确成果责任单位、数据使用权限、数据交互方式等,规范数据成果管理工作,确保数据安全。

5.4 强化隐患治理

结合水库、水闸、堤防、蓄滞洪区等工程普查成果,强化隐患排查,紧密跟踪尚未达标堤防、病险涵闸、水库等工程薄弱部位,加快工程消险、安全鉴定,对短期难以处置的隐患落实应急处置方案。同时,各地可在全省洪水区划与防治区划成果基础上,结合本地防治重要性、治理紧迫性等情况,加大中小河流治理力度,加快河道堤防治理、蓄滞洪区安全建设等有关防洪工程建设。

参考文献:

- [1] 魏永强,吕石生,李永刚,等.湖南省水旱灾害风险普查的“安化经验模式”[J].中国防汛抗旱,2022,32(5):44-49.
- [2] 宋树华,张敏,陈东,等.浅析房山区自然灾害综合风险普查实施方法[J].城市与减灾,2021(3):29-33.
- [3] 汪明.第一次全国自然灾害综合风险普查总体技术体系解读[J].城市与减灾,2021(2):2-4.
- [4] 刘丽君,朱建英,周春飞,等.江苏省洪水风险图编制及应用思考[J].中国防汛抗旱,2018,28(3):7-11.