

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.024

洪泽湖水质 2010—2020 年时空变化特征

姚敏¹, 毛晓文^{1,2}, 孙瑞瑞³

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省洪泽湖管理委员会办公室, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215042)

摘要:基于 2010—2020 年洪泽湖逐月水质监测数据, 采用最不利值法和距平系数法分析研究洪泽湖水质时空变化特征。结果表明: TN、COD_{Mn} 和 TP 是洪泽湖水环境治理最重要的控制因子。从时间维度上看, 洪泽湖 TN 质量浓度逐月下降, COD_{Mn} 质量浓度逐月稳定, TP 质量浓度逐月先升后降; 2010—2020 年 TN 质量浓度逐年显著下降, TP 质量浓度逐年小幅下降; TN 最不利值逐年下降, 枯水期对 TN 质量浓度的增高作用明显大于汛期, TP 最不利值逐年小幅上升, 多出现在 8—10 月, 出现概率高达 81.8%。从空间维度上看, 淮安湖区 TN 和 COD_{Mn} 距平系数多为正数, 宿迁湖区 TN 和 COD_{Mn} 距平系数均为负数; 淮安湖区 TP 距平系数多为负数, 宿迁湖区 TP 多为正数。现阶段, 控氮治理及降低 COD_{Mn} 排放总量是淮安地区亟待解决的重点问题, 宿迁地区亟待加强控磷治理。

关键词:水质; 最不利值法; 距平系数法; 时空变化; 洪泽湖

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)03-0174-07

Spatio-temporal variation of water quality in Hongze Lake from 2010 to 2020 // YAO Min¹, MAO Xiaowen^{1,2}, SUN Ruirui³ (1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China; 2. Hongze Lake Management Committee Office of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 3. Suzhou Substation of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215042, China)

Abstract: The spatio-temporal variation of the water quality in Hongze Lake were studied with the least favorable value method and the anomaly coefficient method based on the monthly monitoring data from 2010 to 2020. The results show that TN, COD_{Mn}, and TP are the most important factors that affect the water environment of Hongze Lake. With regard to the temporal distribution, the monthly TN concentration in Hongze Lake decreased continuously, the monthly COD_{Mn} concentration gradually stabilized, and the monthly TP concentration increased first and then decreased. The annual TN concentration decreased significantly, while the annual TP concentration decreased slightly from 2010 to 2020. The least favorable value of TN showed a downward trend, with the dry season having a significantly greater effect on the increase of TN than the flood season. The least favorable value of TP showed a slight upward trend, which mainly occurred in August, September, and October, with a probability up to 81.8%. With regard to the spatial distribution, the TN and COD_{Mn} anomaly coefficients in the lake area in Huai'an were mostly positive, while the coefficients in the lake area in Suqian were mostly negative. The TP anomaly coefficient was mostly negative in the lake area in Huai'an, while mostly positive in the lake area in Suqian. Currently, control of TN and reduction of the total emissions of COD_{Mn} are the two prominent issues needed to be addressed in the Huai'an area, and TP control is an urgent issue to be strengthened in the Suqian area.

Key words: water quality; least favorable value method; anomaly coefficient method; spatio-temporal variation; Hongze Lake

洪泽湖位于江苏省西北部, 淮安、宿迁两市境内, 在东经 118°10' ~ 118°52'、北纬 33°06' ~ 33°40' 之间。洪泽湖源于南宋时期的黄河夺淮^[1-2], 黄河水倒灌入洪泽湖区并由淮河下游的富陵湖、万家湖、

破釜塘、白水塘等汇聚发展而成, 现已成为江苏省的第二大湖泊。在正常蓄水水位 12.5 m 时水域总面积为 2 069 km², 洪泽湖年平均气温 16.3℃, 自北向南递增。根据蒋坝水位站多年实测水文资料, 平均水

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019003)

作者简介: 姚敏(1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水质监测与分析评价研究。E-mail: yaomin0922@126.com

深约 1.90 m,最大水深 4.50 m;多年(1953—2015 年)平均入湖水量为 342 亿 m³,出湖水量为 313 亿 m³;多年(1953—2015 年)平均水位为 12.55 m,历史最高水位出现在 1851 年,为 16.90 m,超出警戒水位 3.40 m,历史最低水位出现在 1951 年 2 月,为 8.80 m。江苏省将洪泽湖定位为江淮生态大走廊的生态绿心,洪泽湖是南水北调东线工程的重要调节湖泊和苏北地区的重要水源,具有重要的生态区位价值与资源优势。

前人对洪泽湖的研究主要集中在湖区水质^[3-6]、叶绿素 a^[7-9]和富营养状态^[10-12]的变化上,采用的监测数据时间序列相对较短^[13-15],尤其是针对 2010 年以来洪泽湖水质的长序列时空分布特征研究较少。本文基于 2010—2020 年的水质数据进行较长时间序列水质变化分析,探讨洪泽湖水水质时空变化特征,以期洪泽湖水环境的保护提供参考。

1 研究方法

洪泽湖自南向北共布设 16 个监测站(图 1),监测时间为 2010 年 1 月至 2020 年 12 月,每月采样 1 次。水质监测指标包括水温、pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、铜、锌、氟化物、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅、氰化物、挥发酚、阴离子表面活性剂和硫化物等 22 项。

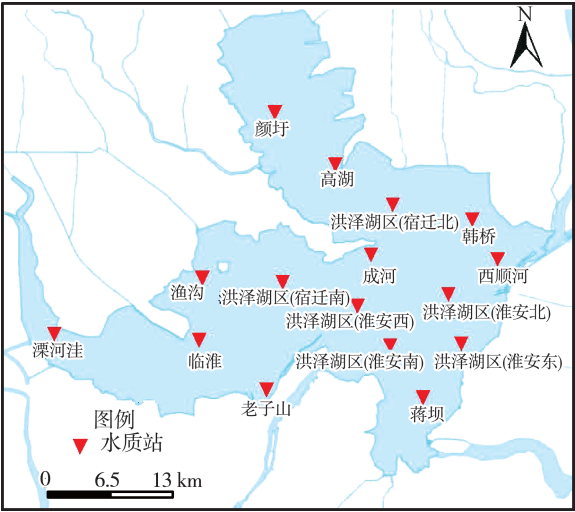


图 1 洪泽湖水水质监测站分布

Fig.1 Water quality monitoring stations in Hongze Lake

水质评价依据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》以及国家生态环境部《地表水环境质量评价办法》(2011 年)。根据江苏省水环境监测中心多年(2010—2020 年,下同)数据资料,选取 TN、COD_{Mn}和 TP 作为洪泽湖湖区水质时空变化分析的特征指标。时间变化特征分析采用年内、年际水质变化评

价;TN 和 TP 代表的突出污染因子采用最不利值法分析,最不利值是水域某一突出污染因子一定时期内的极值水平。利用空间变化特征分析,在常规区域分布分析的基础上采用距平系数法^[16]对洪泽湖主要监测站点 2018—2010 年的水质状况进行了表征研究,表征算法为

$$\eta = \frac{x_i - x}{x} \times 100\% \tag{1}$$

式中:η 为距平系数;x_i 为洪泽湖 i 站点 2018—2020 年某水质指标的质量浓度或项目值的均值;x 为洪泽湖所有站点某水质指标质量浓度或项目值的平均值。

2 特征分析

2.1 时间变化特征

2.1.1 年内变化

根据多年洪泽湖逐月水质监测数据,对各项水质指标质量浓度或项目值进行逐月均值计算,水温、pH 值、化学需氧量、BOD₅、氟化物、氰化物、挥发性酚、阴离子表面活性剂、硫化物、铜、锌、硒、砷、汞、镉、六价铬和铅等 17 项均低于地表水环境质量标准 I 类水质标准限值,不作为本文研究对象。COD_{Mn}、DO、TN、NH₃-N 和 TP 等 5 项多年月均质量浓度结果见图 2。

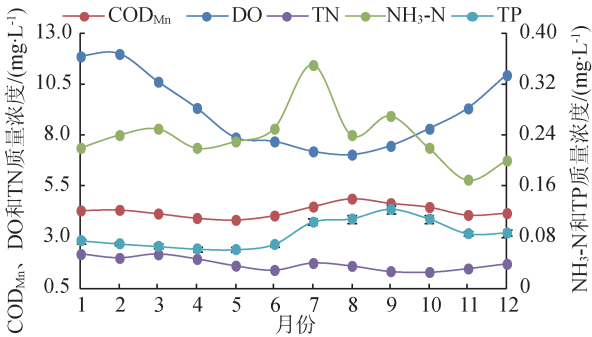


图 2 2010—2020 年洪泽湖水水质指标多年月均变化
Fig.2 Monthly variation of water quality indices in Hongze Lake from 2010 to 2020

由图 2 可见,COD_{Mn}多年月均质量浓度范围为 3.84~4.88 mg/L,年内变化整体平稳,接近或满足 II 类水质标准。DO 多年月均质量浓度范围为 7.04~11.98 mg/L,接近或满足 I 类水质标准,峰值为 11.98 mg/L,出现在 2 月,随着温度逐渐升高以及淮河流域主汛期的临近,逐渐下降至 8 月的谷值 7.04 mg/L,9—12 月不断上升。NH₃-N 多年月均质量浓度范围为 0.17~0.35 mg/L,年内变化整体较平稳,符合 II 类水质标准。TN 多年月均质量浓度范围为 1.28~2.16 mg/L,水质为 IV~劣 V 类,质量浓度

逐月下降,1—4 月明显高于其他月份。TP 多年月均质量浓度范围为 0.061 ~0.124 mg/L,水质为Ⅳ ~Ⅴ类,呈先升后降趋势,9 月出现峰值,7—10 月明显高于其他月份,之后逐渐下降。

洪泽湖湖区 DO 和 NH₃-N 质量浓度变化较小,接近或满足Ⅰ ~Ⅱ类水质标准,对湖区影响较小。而 TN、COD_{Mn} 和 TP 逐月质量浓度峰值与谷值的比值分别为 1.7、1.3 和 2.0,多年月均质量浓度相对标准偏差分别为 18.3%、7.1% 和 25.3%,年内差异较大。

2.1.2 年际变化

图 3 为洪泽湖湖区 TN、COD_{Mn} 和 TP 质量浓度年际变化趋势图。年均值是评价洪泽湖水域水质总体情况的主要特征值。2010—2020 年 TN 年均值基本在Ⅳ ~Ⅴ类水质标准之间,其中 2012 年湖区 TN 年均值达最高峰,为劣Ⅴ类水质标准,2020 年湖区 TN 年均值为Ⅳ类水质标准;从趋势看,TN 年均值水平呈显著下降态势。COD_{Mn} 年均值在Ⅱ ~Ⅲ类水质标准之间,呈小幅下降态势,接近Ⅱ类水质标准,其中 2010 年达到最高峰,年均值为Ⅲ类水质标准。TP 年均值在Ⅲ ~Ⅳ类水质标准之间,呈小幅下降态势,湖区更接近Ⅳ类水质标准,其中 2014 年达到最高峰,年均值为Ⅴ类水质标准。

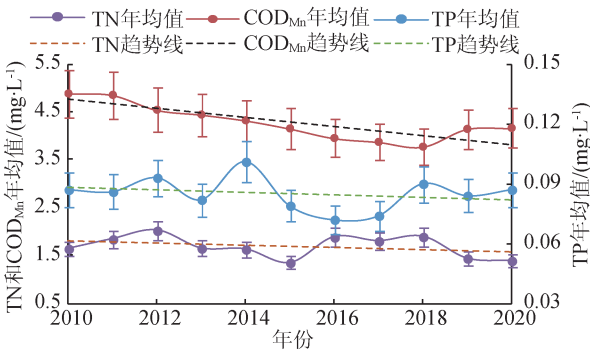


图 3 2010—2020 年洪泽湖湖区 TN、COD_{Mn} 和 TP 质量浓度年均值变化趋势

Fig.3 Annual variations of mass concentrations of TN, COD_{Mn}, and TP in Hongze Lake from 2010 to 2020

TN、COD_{Mn} 和 TP 的多年平均质量浓度分别为 1.68 mg/L、4.28 mg/L 和 0.085 mg/L,相对标准偏差分别为 13.2%、8.6% 和 9.8%,年际差异较大。TN 年均值从 2012 年的峰值 2.02 mg/L 波动下降至 2020 年的 1.39 mg/L;COD_{Mn} 年均值从 2010 年的峰值 4.88 mg/L 波动下降至 2020 年 4.16 mg/L;TP 年均值从 2014 年的峰值 0.101 mg/L 波动下降至 2020 年 0.087 mg/L。2010—2020 年洪泽湖 TN、COD_{Mn} 和 TP 整体呈现持续向好的状态,特别是 2019—2020

年,水质指标分别维持在Ⅳ类、Ⅲ类和Ⅳ类水质标准。

2.1.3 年最不利值变化

图 4 为洪泽湖湖区 TN 和 TP 质量浓度年最不利值变化结果。最不利值可以侧面反映突发水污染事故或水质异常状态,要实现洪泽湖湖区水质稳定达标,控制水环境治理最重要限制因子的最不利值的发生,降低极值水平十分必要。2020 年 7 月出现了洪泽湖湖区水质总体达Ⅴ类的短期污染事件,经分析与宿城北部入湖河道洪涝水大量汇入有着密切关联,加之防汛需要的淮水调度汇入,也加剧了 7 月湖区水质的短期恶化。

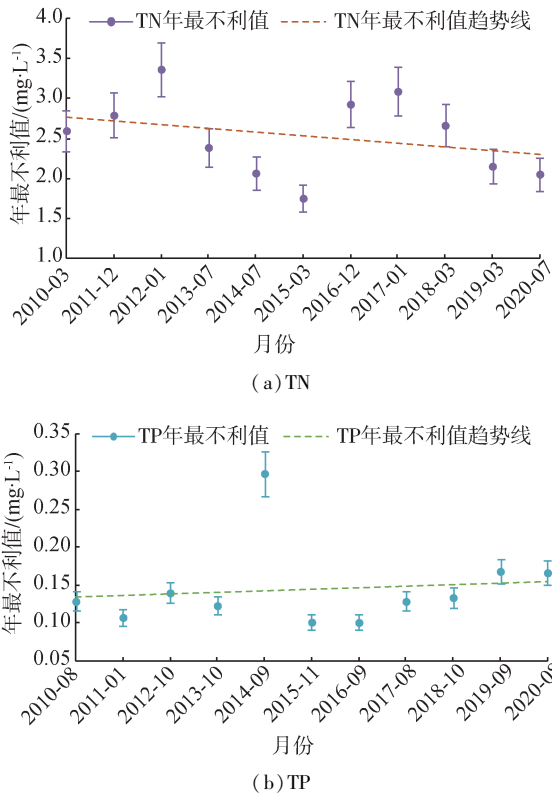


图 4 2010—2020 年洪泽湖湖区 TN 和 TP 最不利值发生趋势

Fig.4 Distribution of least favorable values of TN and TP in Hongze Lake from 2010 to 2020

2010—2020 年湖区 TN 最不利值全部超过Ⅳ类水质标准,绝大多数超过Ⅴ类。其中,2012 年 1 月湖区 TN 最不利值出现最高峰值,达劣Ⅴ类水质标准;2010—2020 年,TN 最不利值呈下降态势;TN 最不利值多发生在枯水月份,11 年中 8 次出现在 12 月至次年 3 月,概率为 72.7%,3 次最不利值发生在 7 月的主汛期,可见,汛期洪涝水和枯水期干旱都可能引起湖区 TN 质量浓度的升高,但相对而言,枯水期 TN 质量浓度的增高明显大于汛期。

湖区 TP 质量浓度的最不利值基本都超过Ⅳ类水质标准,其中,最不利值最高峰出现在 2014 年 9

月,达劣 V 类水质标准;由 11 年趋势可见,TP 最不利值呈小幅上升态势;TP 最不利值多发生在 8、9、10 月,11 年中出现了 9 次,概率为 81.8%,汛期洪涝水影响是加剧 TP 污染的重要因素。

2.2 空间变化特征

2.2.1 区域分布特征

图 5 为洪泽湖淮安湖区和宿迁湖区的 TN、COD_{Mn}和 TP 质量浓度的变化情况。从湖区分布看,2010—2020 年淮安湖区的 TN 年均值均明显高于宿迁湖区。

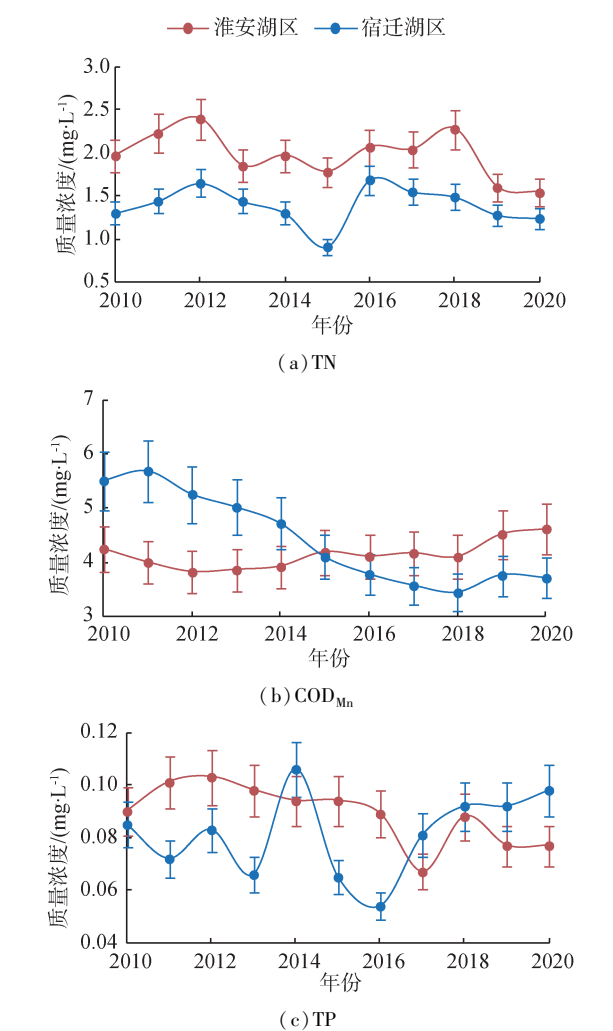


图 5 2010—2020 年湖区 TN、COD_{Mn}和 TP 质量浓度
Fig.5 Regional distribution of TN, COD_{Mn}, and TP in Hongze Lake from 2010 to 2020

2015 年以前,淮安湖区的 COD_{Mn} 低于宿迁湖区,而 2015 年以后,淮安湖区的 COD_{Mn} 反超宿迁,且差距逐年增加。2017 年以前(除 2014 年),淮安湖区 TP 质量浓度高于宿迁湖区;2017 年以后,宿迁湖区的 TP 反超淮安湖区,且差距逐年增加。

2.2.2 空间变化特征

洪泽湖淮安湖区和宿迁湖区 2018—2020 年 TN、COD_{Mn}和 TP 距平系数计算结果见表 1。位于洪

泽湖南部和东部的淮安湖区监测站 TN 距平系数除韩桥站外均为正数,特别是老子山、蒋坝和洪泽湖区(淮安南)距平系数高达 40.8%、29.9% 和 21.7%;洪泽湖北部和西部的宿迁湖区监测站 TN 均为负数,范围为 -19.7% ~ -11.5%。淮安湖区监测站 COD_{Mn}距平系数均为正数,范围为 5.0% ~ 16.1%;宿迁湖区监测站 COD_{Mn}距平系数均为负数,范围为 -16.4% ~ -3.5%。淮安湖区监测站 TP 距平系数多为负数,范围为 -24.1% ~ 10.3%;宿迁湖区监测站 TP 距平系数多为正数,范围为 -3.4% ~ 18.4%。

表 1 2018—2020 年洪泽湖主要湖区水质指标距平系数
Table 1 Anomaly coefficients of water quality indices in Hongze Lake from 2018 to 2020

湖区	站点	距平系数/%		
		TN	COD _{Mn}	TP
淮安	老子山	40.8	7.8	-6.9
	洪泽湖区(淮安西)	17.2	13.1	10.3
	洪泽湖区(淮安南)	21.7	8.6	3.4
	蒋坝	29.9	5.0	-13.8
	洪泽湖区(淮安东)	17.8	7.0	4.6
	洪泽湖区(淮安北)	1.3	8.7	-16.1
	西顺河	1.9	11.2	-20.7
宿迁	韩桥	-10.2	16.1	-24.1
	洪泽湖区(宿迁北)	-12.1	-14.1	13.8
	高湖	-11.5	-16.4	-3.4
	颜圩	-14.0	-6.3	-2.3
	成河	-15.9	-8.6	16.1
	洪泽湖区(宿迁南)	-19.7	-10.7	8.0
	渔沟	-12.7	-10.5	4.6
	临淮	-18.5	-6.4	10.3
	溧河洼	-12.1	-3.5	18.4

从 TN 来看,淮安湖区的水质最差,需重点控制 TN;从 COD_{Mn} 来看,两个湖区总体变化较小,但淮安湖区 COD_{Mn} 水质较差,淮安湖区的 COD_{Mn} 需要重点关注;从 TP 来看,宿迁湖区 TP 水质最差,需重点控制 TP。TN 和 COD_{Mn} 是淮安湖区最主要污染控制因子,TP 是宿迁湖区最主要污染控制因子,与区域分布特征分析结论基本一致。

3 洪泽湖污染成因及治污对策

洪泽湖流域内 TN、TP 的污染负荷较为严重。氮、磷等污染物质的来源包括外源和内源^[10,15,17-19]。外源的类型和途径较多,其中湖区地表径流和入湖河道径流输入是外源最主要的来源途径,其次是淮河上游和洪泽湖周边城市的工农业污染物、生活污染物排放,再是湖区畜禽养殖和水产养殖过程中所产生的残饵和生物养殖排放的氮、磷等。内源主要来源于底泥的释放、死亡的生物体分解等。

洪泽湖作为淮河末端的过水湖泊,客水污染严

重,主汛期入湖河道尤其是淮河洪涝水带来大量的氮、磷等污染物质,对洪泽湖的水质产生显著影响。外源污染物进入湖泊后,一部分随着湖水流出洪泽湖,另一部分滞留在湖中。部分内源污染物在风浪等物理扰动作用下进入水体,还有部分在 pH 值、氧化还原电位等化学因素和微生物等作用下释放进入洪泽湖水体。洪泽湖水体水质的改善,必须针对不同时期、不同区域统筹安排,有序推进。既要控制洪泽湖的外源污染,又要尽可能避免或减少内源污染,在必要时还应制定水体综合治理方案^[20-22],进一步改善水体水质,具体对策如下:

a. 严格管控,加强外源污染管理。洪泽湖的水质问题取决于点源(如工业企业和城市生活污染,特别是上游工业、生活污染源)、面源(如农业污染,特别是农药、氮磷肥的使用和排放)的综合治理。对于点源的污染管控,可以通过实行最严格的水资源管理和污染物的达标排放,严格执行污染物排放总量控制制度,促使企业提升污水处理水平,同时实施截污纳管、雨污分流等措施,在较短时间内取得较为显著的管控效果。对于遍布洪泽湖流域的农药、化肥等农业面源,以及淮河等入湖河道的污染物输入,短期内很难有明显的治理效果,应调整区域内农业生产的结构,推广测土配方施肥等技术,按照“减量化、无害化、资源化、生态化”要求提升畜禽养殖污染治理水平,积极推进淮河等入湖河道的综合整治,全面削减面源污染。

b. 科学施措,强化内源污染控制。洪泽湖底泥和水生植物等内源在特定条件下会释放氮、磷等污染物质,对水体造成二次污染。根据洪泽湖底泥特征及水体中污染物性质,在全面系统调查分析的基础上,有针对性地清除水体中内源污染物,适时开展清淤疏浚以及蓝藻等水生植物打捞,降低治理过程中对水生动植物生境的影响,保护生物多样性。

c. 因地制宜,推进生态系统建设。加快洪泽湖湖滨带生态系统建设,严格执行生态保护红线,逐步减少人为破坏活动,逐步恢复和改善区域的生态系统平衡。因地制宜地推广环境友好型生态修复技术,使用水生植物修复、微生物修复、水生动物修复等技术,放养鲢鱼、青鱼等收获型经济底栖动物,综合考虑生物物种间的相互作用及水生态安全,切实有效地开展污染控制和治理。

d. 精准调度,科学使用水利设施。科学管控洪泽湖上下游闸坝口门运行,与南水北调等水利工程调度相结合,科学使用水利设施维持洪泽湖水位稳定,通过调水补充清洁水源,为洪泽湖生态提供稳定的环境状态,进一步降低污染事故以及湖泊富营养

化的发生可能性。

e. 统筹规划,提升洪泽湖监测能力。完善洪泽湖水生态系统网络监测体系,加强主要入湖河道尤其是淮河的水质水量监测,提高主汛期洪泽湖以及主要入湖河道的监测频次,及时掌握水体水质状况。准确把握洪泽湖湖区以及周边区域的污染状况、水生态状况和水文特征,及时采取适宜的对策确保洪泽湖的水安全。

4 结 论

a. TN、COD_{Mn}和 TP 是洪泽湖水环境治理最重要的因子,其他指标现状稳定,且接近或满足 I ~ II 类水质标准,对湖区影响较小。

b. 2010—2020 年 TP 年均值呈小幅下降态势, TN 年均值呈显著下降态势,控磷、控氮治理成效较为显著。

c. 2010—2020 年 TP 最不利值呈小幅上升态势,汛期洪涝水加剧了 TP 污染程度;TN 最不利值虽有下降态势,但枯水期 TN 质量浓度增高显著。

d. 淮安湖区 TN 和 COD_{Mn}距平系数多为正数,特别是老子山、蒋坝和洪泽湖区(淮安南)TN 距平系数高达 40.8%、29.9%和 21.7%,宿迁湖区 TN 和 COD_{Mn}质量浓度距平系数均为正数。淮安湖区 TP 距平系数多为负数,宿迁湖区 TP 多为正数。

e. 洪泽湖内外污染源输入的比例难以准确估算、面源治理成效不显著以及淮河等入湖河道主汛期大量污染物输入,给洪泽湖水生态安全带来挑战和巨大的不确定性。现阶段,控氮治理及降低 COD_{Mn}排放总量是淮安地区亟待解决的重点问题,宿迁地区亟待加强控磷治理。

参考文献:

- [1] 张崇旺. 论淮河流域水生态环境的历史变迁[J]. 安徽大学学报(哲学社会科学版), 2012, 36(3): 81-89. (ZHANG Chongwang. Study on historical changes of water ecological environment in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Anhui University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 36(3): 81-89. (in Chinese))
- [2] 赵筱侠. 黄河夺淮对苏北水环境的影响[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版), 2013, 13(3): 92-101. (ZHAO Xiaoxia. Influences of discharge of the Yellow River into the sea through the Huai River Estuary on water environment in northern Jiangsu region[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Humanities and Social Sciences Edition), 2013, 13(3): 92-101. (in Chinese))
- [3] 李波, 濮培民, 韩爱民. 洪泽湖水质的时空相关性分析

- [J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 259-266. (LI Bo, PU Peimin, HAN Aimin. Spatio-temporal correlation analysis of water quality in Hongze Lake [J]. Journal of Lake Science, 2002, 14(3): 259-266. (in Chinese))
- [4] 周玲, 郭胜利, 张涛, 等. 洪泽湖水水质模糊综合评价研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 289-291. (ZHOU Ling, GUO Shengli, ZHANG Tao, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation of water quality in Hongze Lake [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 289-291. (in Chinese))
- [5] 吉婷婷, 钟堃, 王涛, 等. 洪泽湖生态经济区重要水域水质的时空变化特征: 以淮安市为例[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2018, 17(1): 52-56. (JI Tingting, ZHONG Kun, WANG Tao, et al. Variations of spatial-temporal changes of water quality in Hongze Lake eco-economic region: a case study in Huaian [J]. Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science Edition), 2018, 17(1): 52-56. (in Chinese))
- [6] 吴延东, 刘绪庆, 陈飞龙. 洪泽湖水水质状况的主成分分析和聚类分析[J]. 淮阴工学院学报, 2010, 19(1): 71-76 (WU Yandong, LIU Xuqing, CHEN Feilong. Evaluation and analysis on the water quality of Hong-tse Lake sections [J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2010, 19(1): 71-76. (in Chinese))
- [7] 齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等. 基于二维湖泊藻类模型的洪泽湖藻类空间动态模拟[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3090-3100. (QI Lingyan, HUANG Jiacong, GAO Junfeng, et al. Spatial-temporal modeling of phytoplankton in Hongze Lake using a 2-D hydrodynamic-phytoplankton model [J]. China Environmental Science, 2015, 35(10): 3090-3100. (in Chinese))
- [8] 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[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 583-591. (QI Lingyan HUANG Jiacong, GAO Junfeng, et al. Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Hongze Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 583-591. (in Chinese))
- [9] 刘阁, 李云梅, 吕恒, 等. 基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3645-3656. (LIU Ge, LI Yunmei, LYU Heng, et al. Remote sensing of chlorophyll-a concentrations in Lake Hongze using long time series MERIS observations [J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3645-3656. (in Chinese))
- [10] 王兆群, 张宁红, 张咏, 等. 洪泽湖水水质富营养化评价[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6): 31-35. (WANG Zhaoqun, ZHANG Ninghong, ZHANG Yong, et al. Eutrophication assessment of water quality in Hongze Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010, 2(6): 31-35. (in Chinese))
- [11] MENG W, HE M, Hu B, et al. Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement [J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 146(9): 50-59.
- [12] 王霞, 刘雷, 何跃. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2): 58-61. (WANG Xia, LIU Lei, HE Yue, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and factor analysis of eutrophication in Hongze Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, 31(2): 58-61. (in Chinese))
- [13] 崔彩霞, 花卫华, 袁广旺, 等. 洪泽湖水水质现状评价与趋势分析[J]. 中国资源综合利用, 2013(10): 44-47. (CUI Caixia, HUA Weihua, YUAN Guangwang, et al. Assessment and trend analysis on water quality in Hongze Lake [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013(10): 44-47. (in Chinese))
- [14] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水水质时空变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1593-1601. (LI Wei, DU Xue, LIN Ming-li, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water quality in Hongze Lake based on PCA and SOM [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(12): 1593-1601. (in Chinese))
- [15] 王霞, 沈红军, 刘雷, 等. 洪泽湖水水质特征分析及评价[J]. 环境与发展, 2019, 31(9): 11-13. (WANG Xia, SHEN Hongjun, LIU Lei, et al. Analysis and assessment on water quality of Hongze Lake [J]. Environment & Development, 2019, 31(9): 11-13. (in Chinese))
- [16] 孙瑞瑞, 吕文, 顾林森, 等. 阳澄西湖入湖河道水质时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 105-108. (SUN Ruirui, LYU Wen, GU Linsen, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 105-108. (in Chinese))
- [17] 吴涛, 王建波, 杨洁, 等. 大黑汀水库水质时空变化特征及下游引水策略[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 65-72. (WU Tao, WANG Jianbo, YANG Jie, et al. Spatio-temporal characteristics of water quality in Daheiting Reservoir and downstream water transfer strategy [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 65-72. (in Chinese))
- [18] 梁志宏, 陈秀洪, 罗欢, 等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
- [19] 赵宇, 周思聪, 沈汇超, 等. 泗洪洪泽湖湿地底泥中氮、磷特征及其与水体富营养化关系[J]. 环境科技, 2020, 33(3): 24-27. (ZHAO Yu, ZHOU Sicong, SHEN Hui-

- chao, et al. The characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of Sihong Hongze Lake Wetland and their relationship with eutrophication of water body [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(3): 24-27. (in Chinese))
- [20] 胡洋, 巴图那生, 蔡舰, 等. 焉耆盆地农排渠水质变化特征及其污染源分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 154-158. (HU Yang, BATU Nasheng, CAI Jian, et al. Analysis of water quality change characteristics of agricultural drainage canals and their pollutant sources in Yanqi Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 154-158. (in Chinese))
- [21] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 79-84. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 79-84. (in Chinese))
- [22] 刘修英, 黄功学, 郑志宏, 等. 贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 40-46. (LIU Xiuying, HUANG Gongxue, ZHENG Zhihong, et al. Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 40-46. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-03-03 编辑: 俞云利)

(上接第 167 页)

- [18] ZHU C, LIU G L, CHEUNG C S, et al. Ultrasonic stimulation on enhancement of air gap membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 1999, 161: 85-93.
- [19] CHAO Z, LIU G. Modeling of ultrasonic enhancement on membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2000, 176: 31-41.
- [20] HOU D, WANG Z, LI G, et al. Ultrasonic assisted direct contact membrane distillation hybrid process for membrane scaling mitigation [J]. Desalination, 2015, 375: 33-39.
- [21] REN X, LIU D, CHEN W, et al. Investigation of the characteristics of concentrated leachate from six municipal solid waste incineration power plants in China [J]. RSC Advances, 2018, 8: 13159-13166.
- [22] GRYTA M. Desalination of thermally softened water by membrane distillation process [J]. Desalination, 2010, 257: 30-35.
- [23] BOO C, HONG S, ELIMELECH M. Relating organic fouling in membrane distillation to intermolecular adhesion forces and interfacial surface energies [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(24): 14198-14207.
- [24] WANG J, WANG L, MIAO R, et al. Enhanced gypsum scaling by organic fouling layer on nanofiltration membrane: characteristics and mechanisms [J]. Water Research, 2016, 91: 203-213.
- [25] HOU D, ZHANG L, WANG Z, et al. Humic acid fouling mitigation by ultrasonic irradiation in membrane distillation process [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 154: 328-337.
- [26] CHRISTIE K S S, YIN Y, LIN S, et al. Distinct behaviors between gypsum and silica scaling in membrane distillation [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54: 568-576.
- [27] CHOI Y, NAIDU G, NGHIEM L D, et al. Membrane distillation crystallization for brine mining and zero liquid discharge: opportunities, challenges, and recent progress [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, 5: 1202-1221.
- [28] SEUNGKWAN H M E. Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 1997, 132: 159-181.
- [29] HO C C, ZYDNEY A L. Theoretical analysis of the effect of membrane morphology on fouling during microfiltration [J]. Separation Science and Technology, 1999, 34: 2461-2483.
- [30] JULIAN H, MENG S, LI H, et al. Effect of operation parameters on the mass transfer and fouling in submerged vacuum membrane distillation crystallization (VMDC) for inland brine water treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 520: 679-92.
- [31] PRASAD R, DALVI S V. Sonocrystallization: monitoring and controlling crystallization using ultrasound [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 226: 115911-115941.
- [32] WAGTERVELD R M, MIEDEMA H, WITKAMP G J. Effect of ultrasonic treatment on early growth during CaCO_3 precipitation [J]. Crystal Growth & Design, 2012, 12: 4403-4410.
- [33] QASIM M, DARWISH N N, MHIYO S, et al. The use of ultrasound to mitigate membrane fouling in desalination and water treatment [J]. Desalination, 2018, 443: 143-164.
- [34] LI B, HE X, WANG P, et al. Opposite impacts of K^+ and Ca^{2+} on membrane fouling by humic acid and cleaning process: evaluation and mechanism investigation [J]. Water Research, 2020, 183: 116006-116016.
- (收稿日期: 2021-10-26 编辑: 王芳)