

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0104

近二十年南四湖水环境演变及其驱动因素分析

张健, 刘猛*, 梁斐斐, 齐云婷, 张振成

(济宁市水文中心, 山东 济宁 272000)

摘要: 应用南四湖湖区 2003—2022 年水质监测资料, 选取五日生化需氧量、高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总磷等 5 个主要水质参数, 按照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002), 采用单因子污染指数法、综合污染指数法和 Pearson 相关系数法, 进行南四湖污染状况演变趋势分析。结果表明, 南四湖湖区污染指数呈逐年明显下降趋势, 2011 年后湖区水体达到 III 类水标准。南四湖各监测断面水环境质量呈平稳好转趋势, 水污染问题得到有效遏制。城镇污水集中处理、入湖河流截污导流工程等措施使南四湖外源性污染物输入持续下降是南四湖水环境状况趋于改善的驱动因素。

关键词: 南四湖; 水质; 污染指数; 演变趋势; 驱动因素

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0042-06

党的二十大报告指出, 必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念, 站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。水环境作为自然环境的重要组成部分, 是人类政治、经济、文化发展的基础。目前国内外学者主要应用单因子污染评价法、综合污染因子评价法、污染物化学成分分析法、回归分析法进行分析^[1-4], 判断地表水环境质量状况。

南四湖是我国北方地区第一大淡水湖泊, 多年平均入湖径流量 29.60 亿 m³, 最大年入湖径流量 97.72 亿 m³, 湖区总库容 53.72 亿 m³, 多年平均可利用水资源量 12.73 亿 m³, 为国家一级水功能保护区, 是鲁南地区和苏北徐州地区的重要水源地。2003 年国家南水北调东线工程启动, 南四湖被列为干线工程输水通道和调蓄水库, 国务院南水北调办公室、山东省人民政府出台了南水北调及南四湖水环境保护管理办法, 对湖区水质提出了严格要求, 2013 年 6 月南水北调东线工程开始通水。为保证南水北调工程调水质量, 近二十年来, 各级地方政府通过一系列的治理措施, 南四湖水污染治理取得了重要成效。开展南四湖水环境评价的相

关研究, 了解和掌握湖区水质状况演变趋势, 对于流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

针对南四湖水环境评价研究, 大多数学者主要依据南四湖 1~10 a 短序列水质资料开展现状评价或改善效果分析^[5-8], 如师吉华等^[6]对南四湖环境现状进行评价, 陈妮等^[7]对 2006—2015 年南四湖水质改善效果开展分析, 而基于南四湖较长时间系列水环境演化趋势的研究较少, 且湖区水环境演化驱动因素的研究不足。本文基于南水北调东线工程实施以来, 2003—2022 年南四湖 20 a 水质监测资料, 利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、Pearson 相关系数法对南四湖水污染状况和演化趋势进行系统分析, 探讨南四湖水环境演变驱动因素, 以期对南四湖污染治理和水生态保护提供一定的技术支撑。

1 数据来源和分析方法

1.1 数据来源

为准确反映南四湖区域各湖泊水环境状况, 研究区域选取湖区 6 个水质监测断面。上级湖选取

收稿日期: 2023-01-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 济宁市重点研发计划软科学项目(2022JNZC113)。

第一作者: 张健(1988—), 男, 山东济宁人, 工程师, 主要研究方向: 水文不确定性、水环境系统分析。E-mail: zhangjian343@126.com

*通信作者: 刘猛(1978—), 男, 山东济宁人, 高级工程师, 主要研究方向: 水环境系统分析。E-mail: liumeng_jniswj@shandong.cn

王庙、南阳、沙堤 3 个水质监测断面, 下级湖选取二级坝(闸下)、大捐、微山岛 3 个水质监测断面. 监测断面分布情况见表 1.

表 1 监测断面分布情况

站点	站类	断面位置	坐标	所在湖泊
王庙	水质	微山县侯楼乡	116.608°E,	南阳湖
		王庙村	35.218°N	
南阳	水位	微山县南阳镇	116.680°E,	南阳湖
		南阳岛	35.097°N	
沙堤	水质	微山县留庄镇	116.964°E,	独山湖
		沙堤村	34.933°N	
二级坝 (闸下)	水文	微山县欢城镇	116.994°E,	昭阳湖
		二级坝	34.875°N	
大捐	水位	微山县昭阳街	117.113°E,	昭阳湖
		道大捐	34.764°N	
微山岛	水位	微山县微山岛	117.251°E,	微山湖
		乡杨村	34.675°N	

按照南四湖水水质监测参数的连续性、同步性、可靠性, 资料选取南水北调东线工程启动的 2003 年至今, 研究时段为 2003—2022 年, 应用山东省水环境监测中心济宁分中心水质监测资料, 监测数据完整可靠; 站点选用代表性强, 基本反映湖区水污染分布状况. 监测数据的测次分布按照任务书要求, 2003—2006 年每 2 个月监测一次, 每年监测 6 次; 2007—2022 年每月监测一次, 每年监测 12 次, 每个监测断面收集 216 次监测数据, 各项监测指标年度值采用全年监测数据平均值计算分析. 按《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), 对高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总磷(P) 5 个主要水质参数进行分析.

1.2 分析方法

1.2.1 单因子污染指数

单因子污染指数是将单项水质指标监测值与标准值进行对比, 确定该项指标的污染程度.

$$I_i = \frac{C_i}{C_{oi}}, \tag{1}$$

式中: I_i 为单项水质参数污染指数; C_i 为单项水质参数监测值; C_{oi} 为单项水质参数的标准值^[9].

1.2.2 内梅罗综合污染指数

内梅罗综合污染指数(S)同时考虑了各种水质

参数的最大值、平均值和各监测污染指标的权重, 能够客观反映水体整体污染状况.

$$S = \sqrt{\frac{\overline{I_i}^2 + I_{i,\max}^2}{2}}, \tag{2}$$

式中: $\overline{I_i}$ 为各项水质参数污染指数的平均值; $I_{i,\max}$ 为各项水质参数中污染指数的最大值^[9].

污染指数大于 1 说明存在污染情况, 污染指数越大, 污染程度越高. 内梅罗综合污染指数等级^[10]见表 2.

表 2 内梅罗综合污染指数等级

S 取值范围	污染等级	S 取值范围	污染等级
$S \leq 1$	清洁	$3 < S \leq 5$	重污染
$1 < S \leq 2$	轻污染	$S > 5$	严重污染
$2 < S \leq 3$	中污染		

1.2.3 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数(r)是用来衡量两个变量数据系列变化趋势相关程度的指标, 其值介于-1 与 1 之间. 正值表示数据系列为正向相关, 数据系列趋势走向相同; 负值表示数据系列为负向相关, 数据系列趋势走向相反. Pearson 相关系数绝对值越接近于 1, 表示相关程度越高.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X} \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma_Y}, \tag{3}$$

式中: $\bar{X}$ 为 X 系列样本平均值; σ_X 为 X 样本标准差; $\bar{Y}$ 为 Y 系列样本平均值; σ_Y 为 Y 样本标准差. Pearson 相关系数等级见表 3.

表 3 Pearson 相关系数等级

r 取值范围	相关程度	r 取值范围	相关程度
$0.8 < r \leq 1.0$	极强相关	$0.2 < r \leq 0.4$	弱相关
$0.6 < r \leq 0.8$	强相关	$0 < r \leq 0.2$	极弱相关或无相关
$0.4 < r \leq 0.6$	中等相关		

2 污染状况分析

根据《山东省水功能区划》(鲁政字〔2006〕22 号), 南四湖湖区分为上级湖调水水源保护区和下级湖调水水源保护区, 执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水标准. 因此, 王庙、南阳、沙堤、二级坝(闸下)、大捐、微山岛 6 个水质监测断面均按照 III 类水标准进行单因子污染指数和综合污染指数分析.

2.1 单因子污染指数分析

2.1.1 有机污染状况

水质评价指标中高锰酸盐指数、五日生化需氧量、化学需氧量是水体有机污染状况评价的重要参数. 各断面有机污染单因子污染指数如图 1 所示. 上级湖王庙、南阳、沙堤 3 个监测断面有机污染情况主要出现在 2003—2010 年, 下级湖二级坝(闸下)、大捐、微山岛 3 个水质监测断面有机污染情况主要出现在 2006—2010 年, 2011 年以后南四湖各监测站点有机污染指标均能达到Ⅲ类水标准. 其中, 沙堤监测断面有机污染改善最为明显. 从总体来看, 各监测断面 3 项水质指标的有机污染指数呈现波动下降的趋势.

2.1.2 氮、磷污染状况

氮磷超标是导致水体富营养化问题的重要因素. 南四湖氨氮、总磷两项水质参数的变化情况如图 2 所示. 上级湖王庙、南阳、沙堤 3 个监测断面总磷污染情况主要出现在 2003—2011 年, 氨氮污染情况主要出现在 2003—2007 年. 下级湖二级坝

(闸下)、大捐、微山岛 3 个水质监测断面总磷污染情况主要出现在 2003—2010 年, 氨氮污染情况主要出现在 2003—2005 年. 总磷污染最严重为 2007 年沙堤站, 污染指数达到 21.0, 为严重污染等级; 氨氮污染最严重为 2004 年沙堤站, 污染指数达到 12.85, 为严重污染等级. 2011 年以后氮磷污染指数均较小, 除 2020 年王庙、南阳、微山岛总磷轻污染, 其他年份均达到清洁等级, 其中, 沙堤监测断面氮、磷污染改善最为明显. 各监测断面氮、磷污染指数呈波动下降趋势.

2.2 综合污染程度分析

通过对南四湖各监测断面内梅罗综合污染指数(图 3)的分析发现, 南四湖各监测断面综合污染情况主要出现在 2003—2010 年, 综合污染指数最大为 2007 年沙堤站, 达到 15.4, 为严重污染等级. 2011 年以后水质较好, 各监测站点综合污染指数均在 2 以下, 除 2020 年王庙、南阳和微山岛综合污染指数略大于 1, 为轻度污染外, 其他均为清洁等级, 造成 2020 年综合污染指数反弹的主要原因

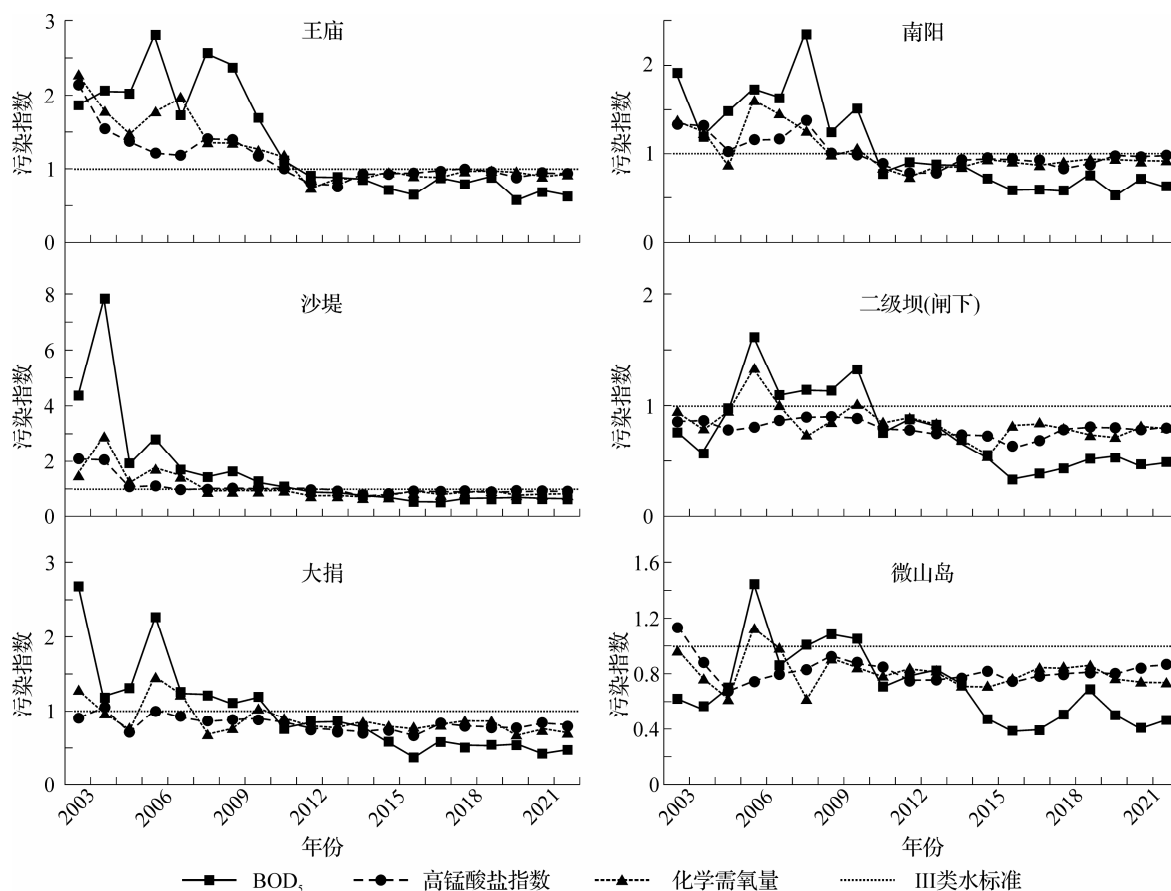


图1 2003—2022 年南四湖各断面有机污染单因子污染指数

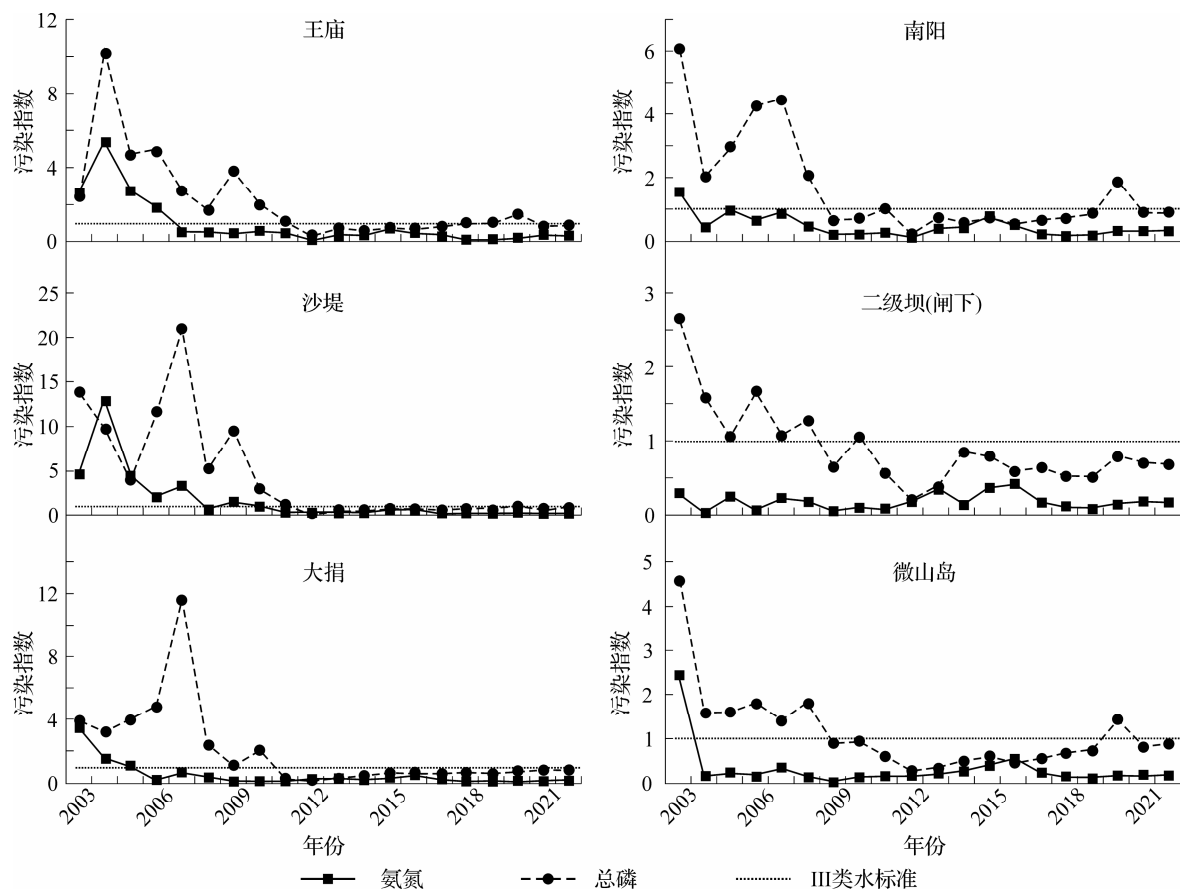


图2 2003—2022年南四湖各断面氮、磷单因子污染指数

为王庙、南阳和微山岛监测站点总磷超标。各监测断面综合污染指数呈波动下降趋势。综合污染指数分析结果与单因子污染指数分析结果基本一致。

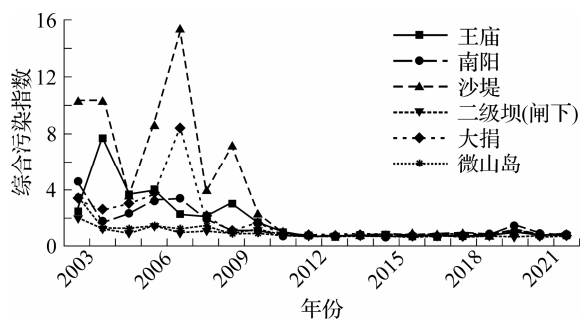


图3 南四湖各监测断面综合污染指数

南四湖区和上、下级湖综合污染程度采用相应断面水质检测值的算术平均值进行计算, 由图4可知, 2003—2010年南四湖综合污染指数在1.5~5.3之间, 属于轻污染至严重污染水平, 2007年污染最为严重, 内梅罗综合污染指数为5.3, 2011年以后水体达到清洁等级, 南四湖区综合污染指数呈波动下降趋势, 水环境趋于改善。

2003—2010年上级湖综合污染指数在1.8~7.0之间, 属于轻污染至严重污染水平; 下级湖综合污染指数在1.0~3.6之间, 属于轻污染至重污染水平, 南四湖下级湖综合污染指数明显小于上级湖, 表明下级湖水环境状况好于上级湖。

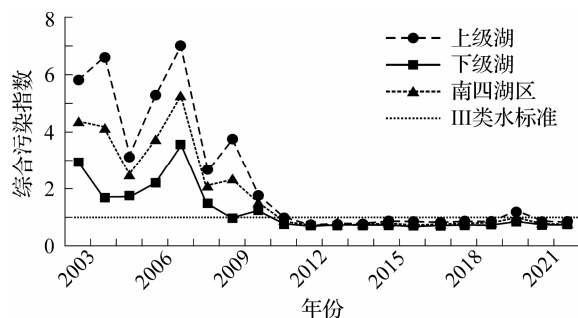


图4 南四湖区综合污染指数

2.3 南四湖水环境演化趋势分析

南四湖水环境演化趋势分析以各站点逐年综合污染指数为Y变量, 年份时间为X变量, 分析各站点逐年综合污染指数随时间的变化趋势。Pearson相关系数为正值时, 表明污染指数随年份

呈递增趋势,水环境状况趋于变坏; Pearson 相关系数为负值时,表明污染指数随年份呈递减趋势,水环境状况趋于改善. 对南四湖 6 个监测站点综合污染指数进行 Pearson 相关系数分析,由表 4 可知, Pearson 相关系数结果均为负值,且相关程度均在强相关等级,说明 6 个监测站点综合污染指数随时间呈递减趋势,递减趋势明显,南四湖水环境状况趋于改善.

表 4 各监测站综合污染指数 Pearson 相关系数及相关程度

监测站	Pearson 相关系数	相关 程度	监测站	Pearson 相关系数	相关 程度
南阳	-0.706	强相关	二级坝(闸下)	-0.772	强相关
王庙	-0.711	强相关	微山岛	-0.611	强相关
沙堤	-0.746	强相关	大捐	-0.606	强相关

3 水环境演变驱动因素分析与探讨

人类活动尤其是工业污水排放、农业种植养殖、河道航运、矿山退水等是导致南四湖污染的主要原因^[11]. 赵贝贝^[12]的研究指出,流域接收废水中氮、磷、有机物含量增加,容易导致流域水体出现污染和富营养化等问题. 南四湖接收了流域内工农业开发和城镇发展产生的大量废水,使水环境状况与人类活动有密切联系.

“十三五”以来,地方政府大力推进城镇污水集中处理、入湖河流截污导流等工程,将流域内入湖河道污水拦截在外,按照各类污染源情况,利用各种有效措施,降解、净化、吸收,减少对湖区水体的污染. 根据济宁市统计年鉴,2016—2021 年新增污水集中处理厂 6 处,2021 年济宁市城镇污水集中处理率达到 98.26%. 在南水北调东线一期工程的治污单元中,涉及南四湖的控制单元有 12 个^[13]. 为保证南四湖水质目标,实施了治、截、导、用、整点面污染源防治体系. “治”是从源头治理工业和农业污染,严格入河排污口设置审批,减少区域内农药、化肥的超量使用;“截”是利用流域内现有节制闸和新建节制闸控制污水不进输水线路;“导、用”是利用旧河道改造为氧化塘或湿地,水体经过净化后用于农业灌溉. 由图 5 可知,2011—2021 年济宁市污水排放总量变化不大,但氨氮年排放量由 12 936 t 大幅下降至 3 972 t, COD 年排放量由 130 872 t 下降至 47 648 t,其中,2016 年济宁市

氨氮和 COD 排放量下降明显. 根据济宁市统计年鉴资料,氨氮和 COD 排放量的下降主要源自农业污染排放量的大幅下降,与 2015 年相比,2016 年农业源氨氮和 COD 污染排放量分别减少了 6 213 t 和 87 236 t,分别占 2015 年氨氮和 COD 排放量总量的 48.0% 和 66.7%,说明外源污染物排放量明显降低,这是南四湖水环境趋于改善的驱动因素.

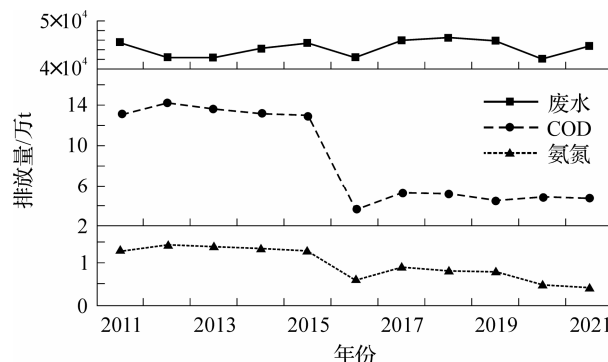


图 5 2011—2021 年济宁市废水及污染物排放量

由 Pearson 相关性分析可以看出南四湖水环境随时间推移呈现逐步改善的趋势,且趋势明显. 湖区水质改善的主要驱动因素是南四湖流域外源污染物的减少. 2011—2021 年济宁市 COD、氨氮排放量呈大幅下降趋势,与各监测站点 COD、氨氮污染指数趋势基本相同. 同期地方政府实施的城市污水集中处理、入湖河流截污导流工程、农业面源污染治理等提升了南四湖污染治理效能. 因此,南四湖水环境的改善与地方政府污染治理措施的加强息息相关,这与陈妮等^[7]研究结果基本一致.

通过上下级湖综合污染指数的对比可以看出,南四湖下级湖水环境状况好于上级湖,主要是因为南四湖上级湖流域面积为 27 500 km²,占全流域的 86.8%,主要入湖河道集中在上级湖. 在入湖河道中,流域面积 1 000 km² 以上的 9 条河道全部入上级湖; 100~1 000 km² 的河道有 15 条,其中 7 条入上级湖. 外源性污染物随河道大部分汇入上级湖,下级湖的蓄水主要经上级湖调蓄泄水,因此下级湖水水质总体比上级湖好.

4 结论与建议

通过对 2003—2022 年水质资料的分析,南四湖有机污染、氮磷污染主要出现在 2003—2010 年,处于轻污染至重污染水平,污染指数呈逐年波动

下降趋势, 2011 年以后整个南四湖水质均能达到Ⅲ类水标准; 根据湖区综合污染指数分析结果, 南四湖下级湖水环境状况好于上级湖。南四湖各监测站点综合污染指数的 Pearson 相关性分析显示, 相关程度均在强相关等级, 污染程度随年份呈递减趋势且趋势明显, 南四湖水环境得到了明显改善。

城镇污水集中处理、入湖河流截污导流工程等措施的实施成效显著, 外源性污染物输入持续下降是南四湖水环境状况趋于改善的驱动因素。

根据分析结果, 上级湖王庙、南阳, 下级湖微山岛 3 个监测断面总磷在 2020 年污染指数出现反弹上升, 总磷呈现轻污染的状态, 需要引起相关部门的重视, 建议进一步加强对工矿企业、污水集中处理设施、截污导流工程及畜禽养殖场等污染物排放重点源头的监管, 确保南四湖水环境状况平稳向好。

参考文献:

- [1] 廖梓龙, 魏永富, 郭中小, 等. 干旱牧区水环境质量评价[J]. 水文, 2012, 32(6):42-46.
- [2] 马振, 周密. 聚类分析在秦淮河水水质指标相关性研究中的应用[J]. 水文, 2018, 38(1):77-80.
- [3] 朱挺兵, 杜红春, 胡晓娜, 等. 基于水质综合指数的澜沧江西藏段水质评价及其影响因素[J]. 淡水渔业, 2022, 52(5):104-111.
- [4] 刘瑜婷, 韩美, 潘彬, 等. 小清河下游水质评价及污染物入海通量研究[J]. 水文, 2020, 40(3):88-96.
- [5] 解文静, 王松, 娄山崇, 等. 山东南四湖上级湖水水质变化评价(2008—2014 年)及成因分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3):513-519.
- [6] 师吉华, 刘峰, 客涵. 南四湖水环境状态分析与评价[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4):36-41.
- [7] 陈妮, 武周虎, 郭琦, 等. 2006—2015 年南四湖水水质评价及改善效果分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6):44-47.
- [8] 徐好, 桑国庆, 杨丽原, 等. 近十年来南四湖水质时空变化特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2):47-52.
- [9] 王学忠, 王鹏. 不同水质评价方法在怀柔水库水质评价中的应用与分析[J]. 北京水务, 2011(1):31-33.
- [10] 代雪静, 姜腾龙, 刘杨, 等. 近二十年小清河济南段污染状况及其趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1):143-150.
- [11] 张皓, 闫祯, 张哲. 南四湖水生态环境综合整治提升探讨[J]. 环境科技, 2022, 35(5):38-43.
- [12] 赵贝贝. 水体富营养化成因及危害[J]. 山西农经, 2018, 225(9):102.
- [13] 杜婷. 南四湖入湖河流水量水质联合调度效果研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

Analysis of the water environment evolution and driving factors of Nansi Lake in the last twenty years

ZHANG Jian, LIU Meng*, LIANG Feifei, QI Yunting, ZHANG Zhencheng
(Jining Hydrological Center, Jining 272000, China)

Abstract: Based on the water quality monitoring data from 2003 to 2022, five main water quality parameters, including BOD₅, permanganate index, COD, NH₃-N and total phosphorus, are selected for analytical purposes. In conformity to “Surface water environmental quality standard” (GB 3838—2002), single factor pollution index method, comprehensive pollution index method and Pearson correlation coefficient method are applied to analyze the pollution evolution trend of Nansi Lake. The results indicate that the pollution index of the Nansi Lake area implies an obvious downward trend year by year, and the water in the lake area satisfies the Class III water standard after 2011. The water environmental quality of all monitoring sections in Nansi Lake presents a steady improvement trend, and the problem of water pollution has been effectively addressed. Continuous decrease of exogenous pollutants in Nansi Lake is the driving factor for the improvement of the local water environment.

Key words: Nansi Lake; water quality; pollution index; evolution trend; driving factors

(责任编辑 韩超)