

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.002

南漪湖水质时空演化特征及污染来源解析

李雯^{1,2}, 褚巍², 谢坤伦^{1,2}, 许大强², 胡广志²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽皖欣环境科技有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:文章基于水质采样和监测数据开展南漪湖水质评价,采用单因子评价和综合评价法,解析水质时空演化规律,基于聚类分析和主成分分析法识别湖泊水质主要影响因子,判定主要污染来源。单因子评价结果表明,2013—2021 年南漪湖水质均在Ⅳ类及以下。综合水质标识法评价结果表明,南漪湖水质呈波动性变化,水质总体上处于Ⅲ类,主要表现为氮磷污染,且入湖河流对湖泊水质影响较大。汛期(6—8 月)水质的主要影响因子为总氮(total nitrogen, TN)、氨氮和五日生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD₅),主要来自农田径流、外湖水产养殖和生活污水等污染源;非汛期(1—5 月、9—12 月)主要影响因子为氨氮、TN、高锰酸盐指数 COD_{Mn}(chemical oxygen demand)、叶绿素 a 和总磷(total phosphorus, TP),主要受生活污水、湖底内源污染等的共同影响。该研究为制定湖区水质改善方案提供多重污染源控制角度的理论参考。

关键词:南漪湖;水质分析;时空演化特征;污染源解析;氮磷污染;主成分分析

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)08-1015-06

Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of water quality in Nanyi Lake and pollution sources

LI Wen^{1,2}, CHU Wei², XIE Kunlun^{1,2}, XU Daqiang², HU Guangzhi²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Wanxin Environmental Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Based on water quality sampling and monitoring data, this paper carries out water quality evaluation of Nanyi Lake. Single factor evaluation and comprehensive evaluation methods are adopted to analyze the spatiotemporal evolution of water quality. Cluster analysis and principal component analysis are used to identify the main factors influencing the lake water quality and determine the main sources of pollution. The results of single factor evaluation show that the water quality of Nanyi Lake from 2013 to 2021 was all in class IV and below. The evaluation results of comprehensive water quality labeling method show that the water quality of Nanyi Lake fluctuated, and the water quality was in class III on the whole, mainly manifested as nitrogen and phosphorus pollution, and the inflow of rivers had a great impact on the water quality of the lake. The main factors influencing water quality during flood season (June to August) were total nitrogen (TN), ammonia nitrogen and five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), which mainly came from agricultural runoff, aquaculture in outer lakes and domestic sewage sources. In non-flood season (January to May and September to December), the main influencing factors were ammonia nitrogen, TN, permanganate index COD_{Mn} (chemical oxygen demand), chlorophyll a and total phosphorus (TP), which were mainly affected by domestic sewage and internal source pollution of lake bottom. This study provides a theoretical reference for the formulation of water quality improvement plan in the lake area from the perspective of multiple pollution sources control.

收稿日期:2022-12-07;修回日期:2023-03-10

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(20200410720048)

作者简介:李雯(1997—),女,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

褚巍(1984—),男,山东枣庄人,安徽皖欣环境科技有限公司高级工程师,通信作者, E-mail:121308195@qq.com.

Key words: Nanyi Lake; water quality analysis; spatiotemporal evolution characteristics; pollution source analysis; nitrogen and phosphorus pollution; principal component analysis

0 引 言

近些年,我国湖泊生态环境保护问题日益突出,面临着水体富营养化^[1]、水质恶化和面积缩减^[2]等棘手难题,不仅威胁湖泊流域社会与经济发展,还制约着流域生态环境安全的可持续性^[3-4]。虽然造成湖泊水生态环境恶化的污染源类型多样且污染机制复杂,但湖泊水质变化仍显现出规律性的时空演化特征^[5-7]。为科学制定湖泊水生态环境保护对策,需通过对湖泊水质的时空演化特征和污染源进行解析,查找水质呈下降趋势的原因。南漪湖现状水质处于Ⅲ~Ⅳ类,个别月份达到Ⅴ类,总体呈现轻度富营养化状态。针对南漪湖开展的相关课题研究日趋增多,但主要集中在沉积物^[8]、面积变化^[9]、上覆水分析^[10]等方面,系统揭示南漪湖水质时空演化特征和解析污染来源的研究较少。

本文在对南漪湖水环境质量评价基础上,解析湖泊水质时空演化规律,通过聚类分析和主成分分析法提取南漪湖水质的主要影响因素并识别关键的污染来源,从而为后续科学制定南漪湖水生态环境治理对策提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

南漪湖又名“南湖”,是皖南最大天然淡水湖泊,位于安徽省宣城市境内,地理坐标在东经 $111^{\circ}43' \sim 119^{\circ}13'$ 、北纬 $30^{\circ}57' \sim 31^{\circ}15'$ 之间。湖区总面积约 200 km^2 ,平均水深约 2.2 m ,湖面呈桑叶形,以南姥嘴为界分成东、西两湖,东湖水面开阔,占全湖水面的 $2/3$ 。南漪湖整体上依靠北山河和涵闸控制排水,主要从东湖湖区进水,西湖区域出水,一般不进行大水量排水,致使湖内水体的流通性较差。另外,由于以往水产养殖使得湖区水质不稳定,西湖区部分水域还出现大面积野生菱角。同时南漪湖附近居民生活污水直排入湖,区域城镇生活污水经处理后随河流入湖。

1.2 数据获取

根据南漪湖污染源和水系分布情况,大致均匀布设 23 个采样点位(包括西湖、东湖湖心处 2 个国控断面监测站点),如图 1 所示,采样时间为

2020 年 4、6、9 月。本文对 2 个国控断面监测点另外选用了 2013 年 1 月至 2021 年 12 月的自动监测数据信息。选取总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、高锰酸盐指数 COD_{Mn} (chemical oxygen demand)、叶绿素 a、五日生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD_5)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、透明度等作为评价指标。

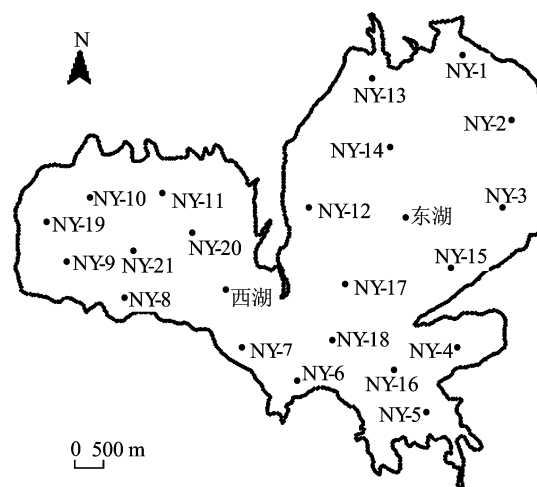


图 1 水质采样点位及国控监测断面示意图

1.3 数据处理与分析

本研究使用 Excel2016、OriginPro 2019b 整理数据并进行分析。根据不同数据对象间的相似性,运用聚类分析进行合理分组^[11],再通过主成分分析法减少数据矩阵的维度,确定主要污染来源。

2 结果与分析

2.1 水质年际变化特征

根据湖心 2 个国控点水质数据(2020 年同时使用了其他监测点位数据),得到 2013—2021 年南漪湖水质总体上未满足水功能区划规定的Ⅲ类水质标准^[12],年际单因子评价结果见表 1 所列,即南漪湖 2013—2021 年水质均在Ⅳ类及以下。

由表 1 可知,南漪湖近 9 年水质超标的主要环境因子一致,基本都为 TN 超标,而且 2017—2019 年 TP 也为主要超标因子。其中, TN 的超标倍数较高,2016 年超出Ⅲ类标准质量浓度 3.25 倍。

表 1 南漪湖年际水质单因子评价结果

年份	TN	TP	氨氮	COD _{Mn}	单因子	超标因子
2013	IV	III	II	II	IV	TN(1.34)
2014	V	III	II	II	V	TN(1.64)
2015	劣V	III	II	II	劣V	TN(2.31)
2016	劣V	III	II	II	劣V	TN(3.25)
2017	劣V	IV	I	II	劣V	TN(2.14) TP(1.03)
2018	IV	IV	II	II	IV	TN(1.20) TP(1.30)
2019	IV	IV	II	II	IV	TN(1.39) TP(1.15)
2020	IV	III	I	II	IV	TN(1.22)
2021	IV	III	I	II	IV	TN(1.20)

南漪湖单因子水质标识指数及综合水质标识指数结果如图 2 所示。由图 2 可知,2013—2021 年南漪湖综合水质标识指数在 3.01~3.91 之间波动,整体呈现下降趋势,表明在这 9 年间水质逐渐变好。TN 和 TP 单因子指数均呈现先上升后下降趋势,且均高于综合水质标识指数。说明 TN 是影响综合水质标识指数的主要因素,氨氮的单因子指数也呈较为明显的下降趋势。

在观测的 9 年时间内,TN、TP 均呈先上升后下降的趋势,氨氮总体上呈下降趋势,COD_{Mn}呈波动性趋势。根据分析结果及调查显示,在这 9 年中南漪湖在持续性进行综合整治,并有一定成效。

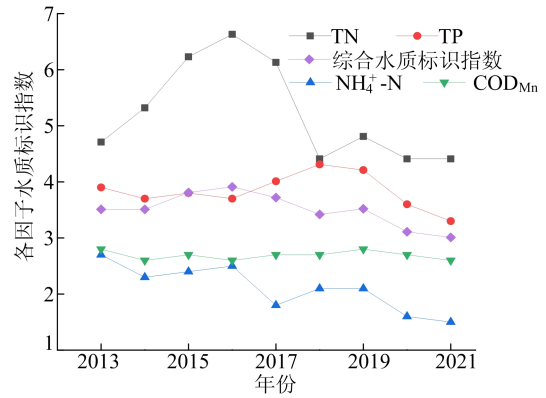


图 2 南漪湖水质标识指数的年际变化

2.2 水质季节变化特征

由于篇幅所限,选取 2013—2021 年中的典型年份的南漪湖水质指标统计结果,见表 2 所列。

表 2 2013—2021 年南漪湖水质指标统计结果

指标	统计项	2013 年	2014 年	2016 年	2017 年	2019 年	2020 年	2021 年
ρ(TN)	范围/(mg/L)	0.50~2.60	0.57~2.75	1.05~5.98	0.91~3.12	0.42~3.20	0.55~1.90	0.02~2.09
	标准差(均值)/(mg/L)	0.60(1.33)	0.53(1.64)	1.34(3.25)	0.83(2.14)	0.74(1.39)	0.33(1.21)	0.53(1.20)
	变异系数%	45.12	32.52	41.42	38.87	53.23	27.07	43.80
ρ(TP)	范围/(mg/L)	0.02~0.12	0.03~0.09	0.01~0.15	0.02~0.09	0.03~0.23	0.02~0.08	0.01~0.08
	标准差(均值)/(mg/L)	0.03(0.05)	0.01(0.04)	0.036(0.04)	0.02(0.05)	0.04(0.06)	0.01(0.04)	0.01(0.03)
	变异系数%	58.92	31.59	82.58	37.86	69.25	33.54	40.81
ρ(氨氮)	范围/(mg/L)	0.04~0.97	0.15~0.58	0.10~0.66	0.03~0.22	0.02~0.96	0.02~0.32	0.02~0.33
	标准差(均值)/(mg/L)	0.28(0.39)	0.10(0.27)	0.14(0.33)	0.06(0.12)	0.24(0.17)	0.08(0.09)	0.07(0.07)
	变异系数%	72.95	39.40	42.64	54.53	147.47	86.91	105.00
ρ(COD _{Mn})	范围/(mg/L)	2.90~4.40	1.60~4.70	0.60~5.30	2.10~4.10	2.60~4.50	2.50~4.80	2.30~4.30
	标准差(均值)/(mg/L)	0.45(3.54)	0.76(3.13)	1.45(3.08)	0.48(3.30)	0.57(3.48)	0.57(3.33)	0.51(3.12)
	变异系数%	12.66	24.39	47.25	14.62	16.52	17.20	16.36
ρ(叶绿素 a)	范围/(μg/L)	2.71~14.60	1.64~8.77	0.75~19.92	2.79~26.81	4.04~58.01	1.00~58.00	2.12~56.01
	标准差(均值)/(μg/L)	3.76(7.30)	2.42(5.21)	5.38(6.40)	5.30(9.10)	12.20(16.60)	17.35(17.38)	11.40(9.32)
	变异系数%	51.56	46.54	84.07	58.27	73.36	99.85	122.03
ρ(BOD ₅)	范围/(mg/L)	1.50~3.90	1.20~3.80	0.80~3.80	1.00~4.00	0.50~2.90	0.50~3.10	0.80~2.10
	标准差(均值)/(mg/L)	0.68(2.93)	0.81(2.69)	0.96(2.35)	0.82(2.15)	0.75(1.75)	0.73(1.80)	0.42(1.33)
	变异系数%	23.17	29.91	40.80	37.88	42.83	40.40	31.74
ρ(溶解氧)	范围/(mg/L)	5.10~13.00	6.20~12.90	6.10~13.45	5.80~10.48	6.24~13.60	6.40~12.90	6.30~12.00
	标准差(均值)/(mg/L)	2.40(9.10)	2.03(9.41)	2.01(8.60)	1.24(7.80)	2.49(9.43)	1.81(8.90)	1.64(9.08)
	变异系数%	26.38	21.57	23.40	15.93	26.40	20.30	18.02
透明度	范围/cm	10.0~70.0	25.0~92.0	5.0~110.0	17.0~110.0	25.0~90.0	24.0~87.0	37.0~107.0
	标准差(均值)/cm	13.88(32.50)	19.12(48.17)	24.37(31.54)	23.40(53.13)	17.96(46.88)	14.62(49.83)	16.73(63.55)
	变异系数%	42.72	39.69	77.25	44.04	38.31	29.33	26.32

由表 2 可知,相较于其他年份,2016 年和 2017 年 TN 质量浓度全年偏高,特别是 2016 年

冬季质量浓度陡增。在 8 月份时质量浓度显著降低,在整体空间分布上 TN 是污染最严重的因子

之一,湖区 TN 质量浓度基本在Ⅳ类水及以下。春季和冬季的氨氮与 TN 时空分布较为相似,两者呈显著相关性($R=0.92, P<0.01$),这可能与水产养殖、农业活动和生活污水等有关。大部分湖区氨氮质量浓度为Ⅲ~Ⅳ类,表现为春、冬两季高于夏-秋两季,且东湖区较西湖区高。总体来说,TP 春、冬两季质量浓度较高,但东湖区与西湖区质量浓度分布略有不同。而且,有些时段 TP 质量浓度出现陡增现象,可能是外来污染物汇入造成了质量浓度变化。夏季时由于气温较高,部分水生植物易腐烂分解,产生二次污染^[13]。

TN、TP 等存在明显的季节变化,但少数月份有所差异,可能是外来污染物造成的质量浓度陡增。一般地,春、冬两季 TN 质量浓度较高,可能主要来源于颗粒态含氮污染物。此外,湖区 COD_{Mn} 、 BOD_5 等指标呈波动性变化,9 年来湖区 COD_{Mn} 质量浓度总体表现为Ⅱ类, BOD_5 整体表现较好,也为Ⅱ类。南漪湖流域夏季暑热期长,过度的光照和温度都会抑制藻类的生长^[14];秋、冬季光照和温度有所减弱,更适合藻类生长。其中,个别月份由于降雨和水位调控引起的营养盐快速变化可能造成叶绿素 a 的突然变化。南漪湖流域夏季多雨,雨水加速了湖水流动,使得夏季南漪湖有较高的透明度。进入秋季后,南漪湖气温有所下降,水体中的植物也开始腐烂,降雨量减少,湖区水体交换频率急剧下降,水体透明度明显下降^[15]。

湖泊透明度受悬浮物、微生物、有机物等多种因素影响,会出现明显的季节变化,从表 2 可以看出,溶解氧的变异系数在 20.00% 左右,而透明度的差异相对较大,每年的透明度变异系数都大于 25.00%,2018 年达到了 114.79%。叶绿素 a 存在差异性,有着较高的变异系数,基本上均大于 50.00%,叶绿素 a 关乎着浮游植物的生存与生长,而浮游植物的分布主要受水文和风向的影响,一般富集在当前集水区或风向下流的岸边。

2.3 水质污染因子识别

基于 2013—2021 年南漪湖湖区的月际水质数据,得到聚类结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,南漪湖水质数据大体可以分为两组。南漪湖流域汛期集中在 6—8 月,第 1 组为在每年的 6—8 月,这个时期南漪湖的水位较高,气温也相对较高,能较好的代表汛期水质状况;第 2 组为每年的 1—5 月和 9—12 月,这个时期南漪湖的降雨减少,气温也相对较低,符合非汛期的水质状况。根

据分组情况,对两组原始数据进行主成分分析,2013—2021 年南漪湖水质指标的因子载荷矩阵结果见表 3 所列。将所有数据进行标准化后,开展因子分析^[16],确定汛期和非汛期的主要污染因子,以水质指标的因子载荷正负进行解释和讨论^[17]。

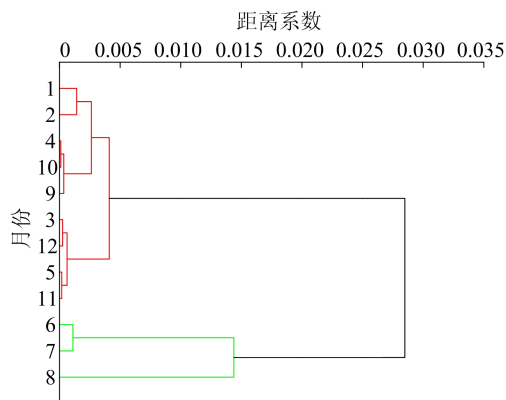


图 3 2013—2021 年南漪湖湖区月际水质聚类结果

从表 3 可以看出,在汛期提取 3 个成分(记为 PC1、PC2、PC3),非汛期提取 4 个成分(记为 PC1'、PC2'、PC3'、PC4')。汛期的第一主成分方差贡献率为 75.85%,表明较为集中地反映了影响因素 75.85% 的信息量。其中,相关性比较高的是 TN 和溶解氧。氨氮、 BOD_5 和营养状态指数对第一主成分也有一定的影响,与第一主成分呈正相关性,表明湖泊中的污染物可能来源于农田径流、外湖水产养殖、生活污水等面源污染^[18]。第二主成分贡献率 24.15%,叶绿素 a、氨氮和营养状况指数是主要相关因素,相关系数均大于 0.5,主要反映湖区营养状态。TP、溶解氧和透明度是一般相关因子,可以归类为含磷物质的影响。而透明度可以衡量水体清澈与否,常与悬浮物、有机物和微生物相关^[19],可以发现汛期透明度与外湖农田径流和生活污水输入的氮磷有机物有关。由于第三主成分贡献率为 0,因此汛期主要成分应是第一、第二主成分。

非汛期第一主成分和第二主成分方差贡献率相差 10%,累计贡献率接近 75%。第一主成分的主要影响因子是氨氮,因子载荷值接近 0.5。当然, TN 也是影响第一主成分的重要因子,其相关性强于汛期。第一主成分可归类为含氮污染物。与汛期相比,非汛期南漪湖的雨污排放量减少,从氨氮和 TN 的时空分布来看,含氮污染物可能与农田排水和生活污水等相关。第二主成分的主要

影响因子是 COD_{Mn} 、叶绿素 a,反映湖区营养状态。第三主成分中主要影响因子为 TP,相关系数大于 0.75,透明度对第三主成分也有一定的影响,总体可归为含磷污染物。这些含磷污染物可能主要来源于大气的干湿沉降和内源污染物的释放。从表 3 可以看出,非汛期 TN、TP、氨氮指标

的因子载荷高于汛期,且相关性更加显著,这可能由于汛期的大量降雨从而对氮磷污染物产生稀释作用^[20]。对比汛期和非汛期的指标因子的相关系数,发现 TN、氨氮指标的相关系数呈正相关,对南漪湖水质有较强影响。第四主成分主要受溶解氧影响,其他指标相关系数都很低。

表 3 2013—2021 年南漪湖水质指标的因子载荷矩阵

指标	汛期(6—8月)			非汛期(1—5月、9—12月)			
	PC1	PC2	PC3	PC1'	PC2'	PC3'	PC4'
TN	0.382 71	-0.008 80	0.119 58	0.445 50	-0.092 35	-0.252 64	-0.213 99
TP	-0.330 70	0.341 48	0.116 61	0.211 38	-0.083 86	0.766 70	-0.424 91
氨氮	0.249 20	0.514 82	-0.066 33	0.477 39	-0.190 39	-0.048 04	0.013 26
COD_{Mn}	-0.378 27	-0.103 40	0.503 28	-0.196 11	0.521 65	0.101 71	0.293 01
叶绿素 a	-0.210 20	0.566 85	-0.038 93	0.010 45	0.508 96	-0.354 32	-0.356 44
BOD_5	0.374 31	-0.141 60	-0.221 90	0.394 98	0.341 62	-0.019 90	0.135 80
溶解氧	0.381 12	0.062 30	0.811 11	0.372 79	-0.086 73	0.084 09	0.706 81
透明度	-0.379 83	0.083 45	0.066 96	0.079 36	0.483 33	0.428 24	0.076 91
贡献率%	75.85	24.15	0	43.81	29.19	11.90	8.39
累计贡献率%	75.85	100.00	100.00	43.81	73.00	84.91	93.29

2.4 南漪湖湖区空间聚类分析

南漪湖采样点空间聚类分析结果如图 4 所示,该结果将采样点划分为 3 组。聚类分析的结果与主要出入湖河流分布特征基本一致。其中:第 1 组主要分布在西湖西北部,包括西湖中 7 个点位,对应的入湖河流主要为双桥河和唯一出湖河流北山河;第 2 组主要分布在湖区中部,基本处于西湖湖区、东湖湖区的交接区域,共分布有 8 个点位(包括西湖心国控点),无主要出入湖河流;第 3 组分布在湖区的东湖东南部,共分布有 8 个点位(包括东湖心国控点),入湖河流分布较多,主要有老郎川河、新郎川河、飞鲤河、长溪河和沙河,无出湖河流。

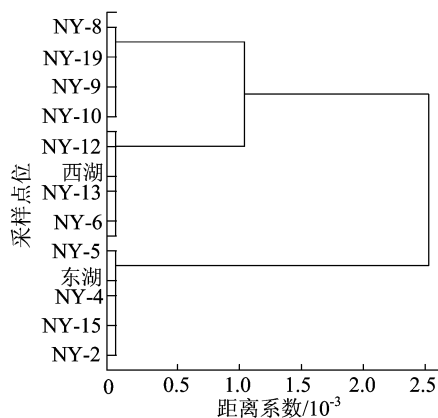


图 4 南漪湖采样点空间聚类分析结果

河流是湖泊重要的供水渠道,汛期面源污染随河流不断进入湖泊。结合南漪湖水质时空分布特征,时空差异主要体现在汛期,这个时期各入湖河流入湖区的氮磷等污染物的量较多,但湖区连通性较好,使得总的质量浓度没有非汛期高,总体分布与聚类分析结果一致。

3 污染源解析

南漪湖主要受氮磷污染,可能与农田径流、外湖水产养殖、生活污水、底泥释放等有着密切关系。南漪湖周边以水产养殖和圩区面源为主,目前南漪湖沿湖湖边、湖汊及滩涂养殖水面面积共约 10 000 公顷,污染物直接入湖入河,造成局部污染明显,影响湖区整体水质。南漪湖水系发达,有 5 条相对较大的入湖河流,其中 4 条分布在东湖区域。入湖河流对南漪湖的水质变化有着很大的影响,根据对入湖河流水质分析,南漪湖入湖河流 TN、TP 处于较高水平。

从主成分分析结果可以发现汛期主要受第一主成分的影响,主要为面源污染,如外湖水产养殖、雨污水溢流等。而 6—8 月是水产养殖和雨水的旺季,湖区 TN 和氨氮污染最严重的地区是东湖区域,是南漪湖养殖大量分布的区域,环湖养殖及不合理的低坝高栏养殖使得代谢物、残饵等进入湖泊,造成湖区水体污染,而稻田施肥后产生的

氮磷流失对湖区水体水质影响较大^[21]。

非汛期主要受到第一、第二、第三主成分的共同影响,主要影响因子是氨氮、TN、COD_{Mn}、叶绿素 a 和 TP,主要受到氮磷污染和有机污染。此时,生活污水排放、内源污染物释放对南漪湖水质有着更为明显的影响,湖区容易出现水体富营养化区域^[22]。2 个水期都表明氮素(氨氮、TN)是主要影响因子,因此控制氮素输入是南漪湖湖区水质改善的重要途径。

4 结 论

1) 南漪湖水质有着明显的月际变化,汛期水体大致为Ⅲ类,但 TN、TP 分别为劣 V 类和Ⅳ类,因此影响汛期水质的主要是氮磷污染物,主要来自农田径流、外湖水产养殖和生活污水等。非汛期综合水质劣于汛期,水质趋于Ⅳ类水体,而影响非汛期水质的主要是氮磷污染物和有机污染物,非汛期 TP 主要来于底泥释放的磷。

2) 从南漪湖 2013—2021 年水质时空分布特征和 23 个采样点位空间聚类分析结果来看,南漪湖水质的时空差异性较显著,且东湖较西湖水质较好,这与南漪湖主要入湖河流分布基本一致。

3) 由于在汛期和非汛期影响南漪湖水质污染源存在差异,导致影响水质的主成分也不相同,影响汛期主要因子是 TN、氨氮和 BOD₅,与农业面源污染有很大关系;非汛期主要影响因子是氨氮、TN、COD_{Mn}、叶绿素 a 和 TP,这与有机污染物有关,是生活污水排放、内源污染物释放等多种污染形式共同影响的结果。

【参 考 文 献】

[1] 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[J]. 科技导报,2017,35(9):13-22.

[2] AZADEH Y, MARCO T. Critical factors for the use of machine learning to predict lake surface water temperature[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127418.

[3] 曹正旭. 干旱区浅水富营养化湖泊氮、磷营养盐时空分布及迁移通量研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2021.

[4] AYELE H S, ATLABACHEW M. Review of characterization, factors, impacts, and solutions of lake eutrophication; lesson for lake Tana, Ethiopia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(12): 14233-14252.

[5] 张博,高建文,范绍锦,等. 南湖水系溶解性有机质来源及时空分布特征[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):912-919.

[6] RIXON S, LEVISON J, BINNS A, et al. Spatiotemporal variations of nitrogen and phosphorus in a clay plain hydrological system in the Great Lakes Basin[J]. Science of the

Total Environment, 2020, 714: 136328.

[7] AHMEDT, ZOUNEMAT-KERMANI M, SCHOLZ M. Climate change, water quality and water-related challenges: a review with focus on Pakistan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(22): 8518.

[8] LIU J, SHEN Z, CHEN W, et al. Dipolar mode of precipitation changes between North China and the Yangtze River valley existed over the entire Holocene; evidence from the sediment record of Nanyi Lake[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(3): 1667-1681.

[9] 王小雷,薛滨,姚书春,等. 1985—2016 年南漪湖湖泊面积变化对沉积速率及泥沙输移通量的影响[J]. 环境工程技术学报,2021,11(6):1121-1130.

[10] 李海斌,谢发之,李国莲,等. 南漪湖上覆水溶解性有机质的光谱特征[J]. 中国环境科学,2022,42(7):3306-3315.

[11] DABGERWAL D K, TRIPATHI S K. Assessment of surface water quality using hierarchical cluster analysis[J]. International Journal of Environment, 2016, 5(1): 32-44.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002:2-3.

[13] 王荣欣. 白洋淀典型水生植物腐解水质变化特征与元素释放、归趋分析[D]. 郑州:华北水利水电大学,2022.

[14] 高静思,朱佳,董文艺. 光照对我国常见藻类的影响机制及其应用[J]. 环境工程,2019,37(5):111-116.

[15] MSUSA A D, JIANG D, MATSUSHITA B. A semi-analytical algorithm for estimating water transparency in different optical water types from MERIS data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 868.

[16] 刘照德,詹秋泉,田国梁. 因子分析综合评价研究综述[J]. 统计与决策,2019(19):68-73.

[17] TRIPATHI M, SINGAL S K. Allocation of weights using factor analysis for development of a novel water quality index[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 183: 109510.

[18] 李如忠,许大强,阙凤翔. 源头溪流氮磷耦合吸收效应及动力学模拟[J]. 中国环境科学,2019,39(2):648-656.

[19] 殷子瑶,江涛,杨广普,等. 1986—2017 年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. 海洋科学,2020,44(4): 21-32.

[20] NOBRE R L G, CALIMAN A, CABRAL C R, et al. Precipitation, landscape properties and land use interactively affect water quality of tropical freshwaters[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 137044.

[21] 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[J]. 湖泊科学,2021,33(5): 1400-1414.

[22] 戴婉晴,叶春,李春华,等. 大通湖湖区水质时空分布特征及其影响因子解析[J]. 环境工程,2022,40(2):34-41.

(责任编辑 吴 亮)