

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.006

南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析

刘瑞艳¹, 张建华², 刘 凌¹, 赵梓屹¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了解南水北调东线工程调水期间洪泽湖水质变化, 基于 2013—2020 年洪泽湖调水期水质监测数据, 采用 Daniel 趋势检验分析水质年变化趋势, 通过空间插值得出各湖区水质分布规律, 并进一步用主成分分析法分析水质主要污染类型。结果表明: 2013—2020 年洪泽湖调水期水质在合格至轻度污染之间, TP 和 TN 为主要超标因子; 时间上水质有变好趋势, 空间上过水区水质最差, 但有转好趋势, 而成子湖区和溧河洼区有所恶化; 污染类型以富营养化污染为主, 氮磷营养盐影响较大; 水质污染以入湖河流输入和建设用地增加人类活动的污染为主要来源, 还伴有偶发污染事故; 时间上洪泽湖对东线输水的综合水质有改善趋势, 建议进一步加强相关污染防治工作, 保护洪泽湖水环境, 保障南水北调东线工程输水水质安全。

关键词: 洪泽湖; 南水北调东线工程; 水质评价; 空间插值; 主成分分析; Daniel 趋势分析

中图分类号: TV213.4; X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0042-08

Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project

LIU Ruiyan¹, ZHANG Jianhua², LIU Ling¹, ZHAO Ziyi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to understand the water quality variation of Hongze Lake during the transfer period of the South-to-North Water Diversion Project, the water quality monitoring data from 2013 to 2020 of Hongze Lake during the water transfer period was evaluated, and the evaluation results were analyzed by the Daniel trend test for the annual change trend of water quality. The spatial interpolation was done to obtain the distribution pattern of water quality in each lake area, and the main pollution types of water quality were further analyzed by the principal component analysis. The results showed that the water quality of Hongze Lake from 2013 to 2020 during the transfer period was mainly qualified and lightly polluted, with TP and TN as the main exceedance factors. The water quality tended to improve over time and spatially, the water quality in the overwater area was the worst, but there was a trend of turning better, while the Chengzihu area and the Lihewa area became deteriorated. The pollution type was mainly eutrophication pollution, and the nitrogen and phosphorus nutrients had a greater impact. The main sources affecting water quality were the discharge of pollutants from river inputs into the lake and the increase of construction land that is caused by human activities, but also accompanied by occasional pollution accidents. At the same time, in time Hongze Lake showed an improvement trend to the East Line water transmission of the comprehensive water quality, it is recommended to further strengthen the relevant pollution prevention work to protect the water environment of Hongze Lake and to protect the safety of the water quality of the east line of the South-to-North Water Diversion Project water transmission.

Key words: Hongze Lake; the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project; water quality evaluation; spatial interpolation; principal component analysis; Daniel trend analysis

洪泽湖是南水北调东线工程重要的调蓄湖泊, 在防洪抗旱、饮水灌溉、航运养殖等方面发挥重要作用^[1], 其水质影响周边居民和北调受水区人民饮水安全。但近年来随洪泽湖周边地区经济快速发展, 围网

基金项目: 国家自然科学基金(52170160, 51879085)

作者简介: 刘瑞艳(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水环境研究。E-mail: 3476556310@qq.com

通信作者: 刘凌(1964—), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水文与水环境保护研究。E-mail: lingliu@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

LIU Ruiyan, ZHANG Jianhua, LIU Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 42-49.

养殖规模扩大,生产生活污水大量排放。尤其丰水期淮河下泄带来污水污染了洪泽湖^[2],总氮、总磷浓度长期超 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[3]Ⅲ类标准,甚至有些月份低至劣Ⅴ类^[4],2014—2017 年,整体水质为Ⅳ类,东南和西南湖区污染更严重,已经归为劣Ⅴ类水体^[5]。

南水北调东线工程承担了向沿线城市补充供水的任务^[6],调水直接关系调蓄湖泊生态健康和供水安全^[7-8]。张婷婷等^[9]研究了南水北调东线一期工程输水干线水质,发现近年来其优良比例整体升高;韦翠珍等^[10]发现调水后,洪泽湖总磷含量有所降低,但不显著。朱天顺等^[11]研究表明,调水期间有面源性氮、磷污染物排入湖中,造成调蓄湖泊水质比非调水期水质差,面临富营养化风险。

以往针对洪泽湖水环境状况研究,主要集中在水质评价、营养盐状况和人类活动干扰等^[12-13],对于其在南水北调东线工程调水期间水质时空变化特征和影响因子研究较少。为探索洪泽湖在南水北调东线工程中的影响效应,本文运用水质综合评价法评价调水期洪泽湖水质,采用 Daniel 趋势检验分析调水期洪泽湖水质时空变化规律,利用主成分分析法研究洪泽湖水质主要影响因子,并提出了改善洪泽湖调水期水质的建议,以为洪泽湖水环境保护及南水北调东线工程建设提供参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区域概况

洪泽湖位于淮河流域中下游,地处江苏省苏北地区淮安市、宿迁市境内,平均水位约 12.37 m,水域面积 1 576.9 km²^[5],是我国五大淡水湖泊之一,容积达 30.4 亿 m³。承担了来自淮河 15.8 万 km² 流域面积的下泄水,是淮安市、宿迁市主要的水源地,也是南水北调东线工程重要的调蓄湖泊之一。

研究区主要分为成子湖区、溧河洼区和过水区三部分。溧河洼区地势较高,水深较浅^[14];成子湖区水体流动性差,水生植被丰富^[15]。过水区属于湖心,有河流东部流入、西部流出,水动力条件较强、水草少,同时承担淮河水下泄,主要受淮河水质影响^[15]。

根据湖泊生境条件,在洪泽湖布设 16 个监测点,并在淮河、南水北调东线工程出入湖位置各设 1 个点,共 19 个点(图 1)。R、C 点分别为入湖、出湖点,H 为淮河入湖前点,均与过水区直接相通。H9~H11、H15 位于成子湖区,H1~H8 位于过水区,H12~H14、H16 位于溧河洼区。水质监测指标包括 pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、五日生化需氧量(BOD₅)、总磷(TP)、总氮(TN)共 8 项。数据采用江苏省水利厅的监测结果,调水时间见表 1,调水期间每月监测 1 次。

1.2 水质评价方法

1.2.1 单因子评价法

根据水质评价标准 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[3]采取最差因子判别法,即选取参与水质评价的所有水质因子中水质类别最差的指标的水质类别作为所属水体综合水质类别^[16]。

1.2.2 综合污染指数法

综合污染指数可以定性描述水体水质综合污染情况,本文选取影响水质的主要污染因子,包括 COD_{Mn}、COD、NH₃-N、BOD₅、TP 和 TN 计算综合污染指数,评价标准依据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类湖泊标准。计算方法如下:

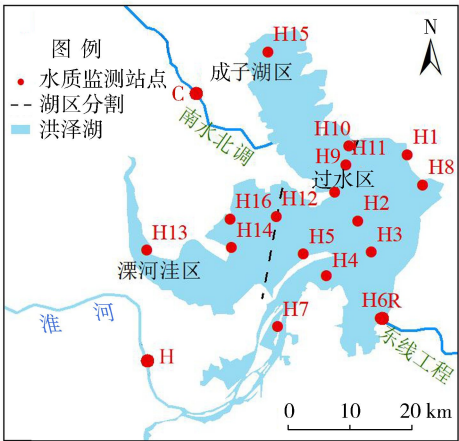


图 1 研究区监测点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring points in the study area

表 1 2013—2020 年南水北调东线工程
江苏段调水时间

Table 1 Time periods of water diversion in the Jiangsu section of the east route of the South-to-North Water Diversion Project form 2013 to 2020

年份	调水天数/d	年份	调水天数/d
2013	35(10—11 月)	2017	130(1—7 月、11—12 月)
2014	105(5—9 月)	2018	172(1—8 月、12 月)
2015	47(4—7 月)	2019	319(1—12 月)
2016	151(1—7 月、10—12 月)	2020	140(1—6 月、12 月)

$$I = \frac{1}{n} \sum_i^n P_i \tag{1}$$

其中

$$P_i = \rho_i / S_i$$

式中: I 为综合污染指数; n 为参与评价的所有指标种类; P_i 为指标*i*单项污染指数; ρ_i 为指标*i*实测质量浓度,mg/L; S_i 为指标*i*环境质量标准,mg/L。

根据综合污染指数大小,一般划分水质为合格($I \leq 0.8$)、轻度污染($0.8 < I \leq 1$)、中度污染($1 < I \leq 2$)和重污染($I > 2$)4类^[17]。

1.3 统计分析

1.3.1 空间插值

为探究指标空间分布特征,利用空间插值法推求离散点数据区域面分布图。变异系数大的水质因子对环境更敏感^[18],水体受污染后显著影响其空间变化。本文对各断面 8 项水质指标多年平均值变异系数最大的指标($\text{NH}_3\text{-N}$)进行插值,并根据 ArcGIS 地统计向导中的交叉验证方法选择插值方法:选择平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)都最小的插值方法,并优先考虑 RMSE 确定最优插值方法^[19],最终选择反距离加权法(IDW)进行插值。

1.3.2 主成分分析

为探究各湖区主要水质污染类型,对洪泽湖水质指标进行主成分分析。利用 KMO 检验和 Bartlett 球性检验分析主成分分析指标适用性,当 KMO 检验值大于 0.5、Bartlett 检验显著性小于 0.05 时,指标适合做主成分分析^[20]。选取污染因子作为分析指标计算初始特征值和主成分贡献率并作双标图。

1.3.3 Daniel 趋势检验

为得到指标在时空上变化趋势,采用 Spearman 秩相关系数 r_s 定量分析洪泽湖各断面水质年变化动态状况,其计算公式见文献[21]。将 r_s 绝对值和临界值 W_p ^[21]比较,检验周期为 8 a,对应的显著水平(单侧检验) 0.05 置信区间 W_p 为 0.643。 $r_s > 0$,表明在统计时段内相关统计指标呈上升趋势; $r_s < 0$,表明在统计时段内相关统计指标呈下降趋势。当 r_s 绝对值大于 W_p 时,表明变化呈显著性趋势;否则,变化不显著。

2 结果与分析

2.1 调水期单项水质指标质量

调查结果表明,pH 值、溶解氧均属于地表水环境质量标准 I 类水,不是主要污染因子,不作为水质污染状况研究对象,因此采用箱线图分析其余 6 项主要污染指标单项水质指标质量(图 2)。总体上,TN 和 TP 为主要超标项目,其他污染因子基本保持在Ⅲ类水平。COD 平均质量浓度为 8.73 mg/L,标准偏差为 1.78 mg/L,平

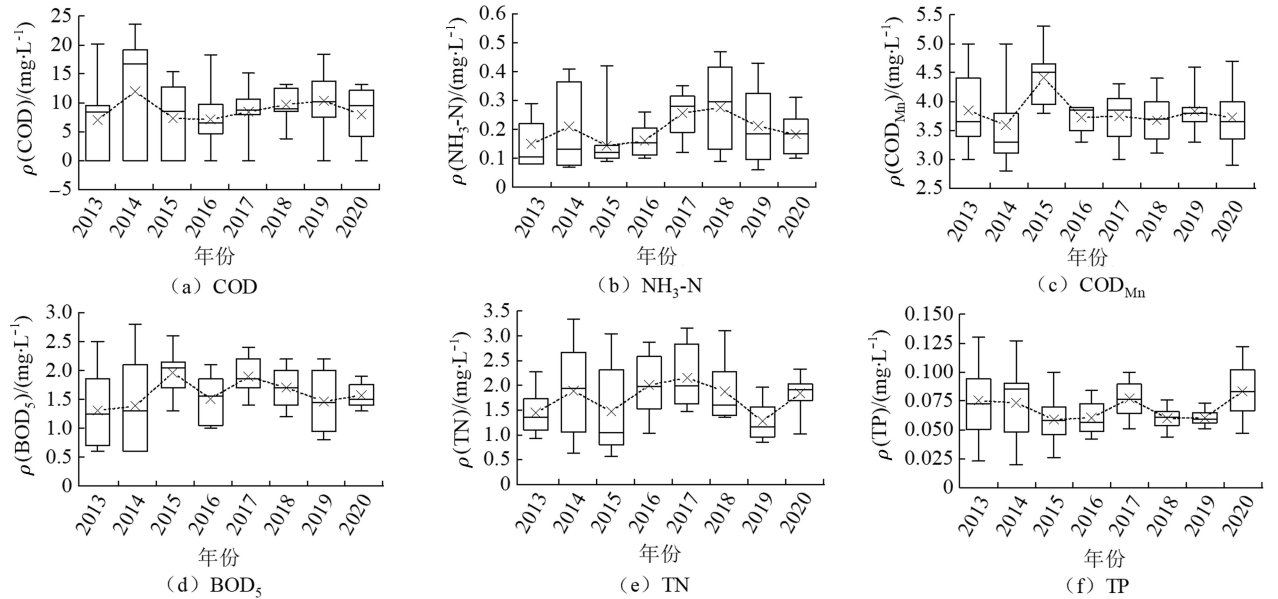


图 2 2013—2020 年调水期洪泽湖主要污染因子浓度

Fig.2 Concentrations of primary pollutants for Hongze Lake from 2013 to 2020 during the water diversion period

均达Ⅰ类,其中 2014 年中位值最大。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均质量浓度为 0.20 mg/L,平均达Ⅱ类,除 2017 年、2018 年中位值较高外,其他几年变化平稳。 COD_{Mn} 平均质量浓度为 3.81 mg/L,平均达Ⅱ类,中位值 2015 年较高。 BOD_5 平均质量浓度为 1.60 mg/L,平均达Ⅰ类,中位值在 2015 年和 2017 年达到较高水平。 TN 平均质量浓度为 1.74 mg/L,平均达Ⅴ类,中位值在 2019 年显著下降。 TP 平均质量浓度为 0.07 mg/L,平均达Ⅳ类,2018—2019 年中位值较低,2020 年较高。2013—2020 年调水期洪泽湖主要污染因子是 TN 和 TP ,其中 TN 平均污染水平最严重。

2.2 湖泊水质年变化分析

2013—2020 年洪泽湖调水期综合污染指数分别为 0.750、0.851、0.850、0.735、0.912、0.787、0.703 和 0.811,水质等级为合格或轻度污染。2013—2020 年洪泽湖调水期年均值单因子评价结果如图 3 所示:总体上,2013—2017 年调水期优于Ⅴ类水的水质占比逐渐减小,2017—2020 年占比增大;其中 2014 年、2017 年和 2020 年优于Ⅴ类水的水质占比小幅度下降,2017 年最小,2019 年最大。2014 年、2017 年和 2020 年调水期Ⅰ分别小幅度上升,2017 年最大,2019 年最小。2 种评价方法得到的水质年变化趋势一致;21 世纪以来洪泽湖建设用地和围圩养殖增加^[22],2013—2017 年洪泽湖面积不断削减,水体总量减少,农业、生活外源污染物输入增加,水质不断变差;到 2017 年湖面积最小^[23],水质最差;此后不断拆除围网,水质有所好转。其中 2014 年与 2013 年、2015 年和 2016 年相比,在汛期的调水天数远大于其他 3 a,大量极端降水和入湖河流来水带来的污染物使水质比其他 3 a 稍差;2020 年年初调水期洪泽湖西北部入湖河道因工程建设和工程排污发生突发性水质恶化^[24],导致西北部水质较差,湖泊整体较前两年水质稍差。2019 年调水时水质最好,Ⅳ类水占比最大, I 为 0.703,与 2019 年全年干旱,洪泽湖湖水主要用于外调,外源输入很少有关。

2.3 湖区污染时空变化特征

采用 Daniel 趋势检验法,计算洪泽湖单因子指数及综合污染指数的变化趋势特征,结果见表 2。调水期洪泽湖 6 种水质污染因子总体呈下降特征, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 的秩相关系数(r_s)分别为-0.143、-0.714、-0.405、-0.405、-0.119、-0.405,其中 $\rho(\text{COD})$ 显著下降,其他 5 个指标微弱下降。综合污染指数的秩相关系数 r_s 为-0.095,轻微下降,说明调水期洪泽湖污染总体呈减轻趋势特征,主要因为过水区水质明显转好。

表 2 2013—2020 年调水期水质污染秩相关系数

采样位置	r_s						I
	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TN})$	
过水区	0.524	0.857	0.107	0.036	-0.893	-0.607	-0.714
成子湖区	-0.810	-0.357	-0.321	0.107	0.750	0.607	0.571
溧河洼区	-0.810	-0.536	-0.607	0.143	0.464	0.250	0.214
湖泊平均	-0.143	-0.714	-0.405	-0.405	-0.119	-0.405	-0.095
入湖点	0.500	0.929	0.452	0.167	-0.762	0.357	0.071
出湖点	-0.714	-0.810	0.095	-0.024	-0.310	0.048	-0.810
淮河	0.143	-0.684	-0.542	-0.167	-0.667	-0.731	-0.926

由表 2 已知过水区 I 的 r_s 为-0.714,显著下降,污染减弱, $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 减小,其中 $\rho(\text{TP})$ 显著减小(r_s = -0.893),其他污染因子有增加趋势,说明过水区污染下降主要受 TN 、 TP 减少影响。调水以来入湖点 $\rho(\text{COD})$ 有显著升高趋势, $\rho(\text{TP})$ 显著减小,过水区 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 受其影响有相同趋势,而 $\rho(\text{TN})$ 、 I 趋势与之相反,说明过水区 $\rho(\text{TN})$ 、 I 污染年变化受调水线输入影响较小。而淮河 $\rho(\text{TN})$ 、 I 有显著减小趋势,过水区 $\rho(\text{TN})$ 、 I 趋势与之相同,受淮河影响较大。 $\rho(\text{TP})$ 主要受东线输水和淮河中 $\rho(\text{TP})$ 减小(r_s = -0.762、 r_s = -0.667)影响, $\rho(\text{TN})$ 下降主要与淮河中 $\rho(\text{TN})$ 显著减小(r_s = -0.731)有关,总体水质好转与淮河水质变

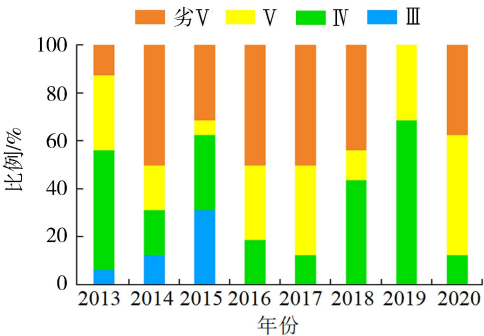


图 3 2013—2020 调水期洪泽湖水质评价结果
Fig.3 Water quality evaluation results of Hongze Lake from 2013 to 2020 during the water diversion period

好($r_s=-0.926$)有关。溧河洼区和成子湖区 I 总体呈上升趋势特征, $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 呈增加趋势,其他污染因子浓度减少;说明溧河洼区和成子湖区污染加重,且加重原因主要在氮磷营养盐增加上,与湖泊西南和西北部建设用地不断扩大、面源污染加重有关^[25]。

调水以来输水线入湖前 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 要低于出湖后(表3),说明洪泽湖增加了东线输水的这几个指标质量浓度; $\rho(\text{TN})$ 则出湖后小于入湖前,洪泽湖可以减小东线输水中 $\rho(\text{TN})$ 。而在调水前期洪泽湖对输水的 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 和 I 有增大影响,后期则有减小趋势,出湖点 I 的 r_s 为-0.810,年变化下降显著,说明随着调水时间增加,洪泽湖对东线输水水质有改善趋势。

表3 2013—2020 南水北调东线输水时出入湖水水质状况

Table 3 Water quality in and out of the lake during the South-to-North Water Diversion East Line transmission from 2013 to 2020														
年份	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		I	
	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖
2013	3.500	5.100	0.000	15.800	0.800	1.600	0.105	0.235	0.080	0.097	1.520	1.230	0.468	0.665
2014	3.300	5.400	0.000	15.200	0.700	1.900	0.080	0.360	0.070	0.073	2.030	1.200	0.531	0.677
2016	4.400	4.700	0.000	27.700	1.600	2.000	0.095	0.537	0.065	0.103	2.270	1.530	0.637	0.875
2017	3.600	3.200	3.400	13.100	0.800	1.800	0.186	0.140	0.076	0.047	2.530	1.590	0.678	0.601
2018	4.100	4.000	5.200	14.500	1.900	2.300	0.172	0.224	0.043	0.076	2.780	1.380	0.764	0.658
2019	4.000	3.500	8.100	9.400	1.300	1.600	0.098	0.228	0.049	0.049	2.520	1.300	0.710	0.538
2020	4.100	3.900	6.200	14.200	1.000	1.900	0.090	0.440	0.052	0.062	1.860	0.910	0.576	0.583

采用反距离加权法(IDW)进行空间插值,得到2013—2020年调水期洪泽湖水水质综合污染指数空间分布(图4)。成子湖区和溧河洼区在调水前期综合污染状况为合格,调水中期污染增加到轻度污染,后期污染减少为合格,2020年为轻度污染;过水区在调水前期综合污染状况为合格,在调水中期污染增加为轻度污染及部分区域的中度污染,调水后期大部分区域污染减少到合格。2019年洪泽湖调水期污染最轻,只有在过水区南部有轻度污染现象。总体而言,2013—2020年调水期间洪泽湖成子湖区和溧河洼区污染相对较少,中南部污染较严重,尤其是过水区湖心和南部。南水北调东线工程输水通过过水区入湖,由表4可知调水时入湖点与湖泊过水区各水质指标显著相关($P<0.05$),说明洪泽湖过水区水质受南水北调东线工程调水影响。将淮河入湖点与过水区的 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 做 Pearson 相关分析,发现洪泽湖过水区与淮河的 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 相关系数分别为0.750和0.874,相关性较高($P=0.032$ 、 $P=0.005$),说明过水区的氮磷污染与淮河水下泄密切相关。过水区的水质污染与淮河水下泄和东线调水输入密切相关,氮磷污染物由过水区南部直接排入湖中,过水区流速较快、底泥的释放产生大量悬浮物^[26];而溧河洼区和成子湖区流速较

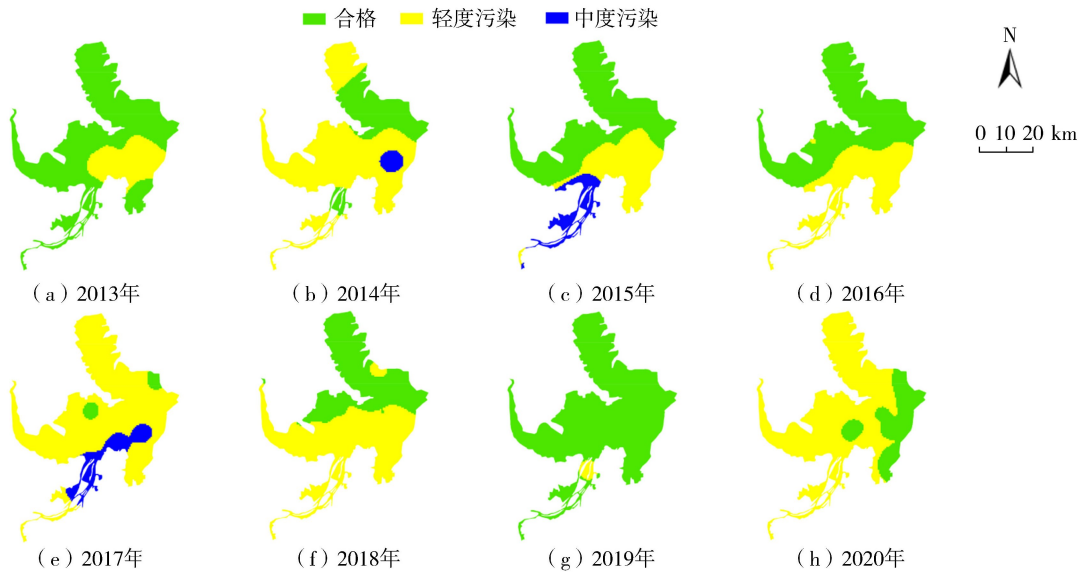


图4 2013—2020 调水期洪泽湖综合污染指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of comprehensive pollution index in Hongze Lake during the water diversion period of 2013—2020

慢、水草丰富,污染物沉降^[27-28]。

2.4 水质主成分分析

2.4.1 主成分

对6项主要污染因子作主成分分析。监测数据的KMO统计量为0.595,Bartlett的球形检验值为0.000<0.05,变量间不相互独立,存在相关关系,适用于主成分分析。提取特征值大于1的2个主成分,其方差贡献率分别是40.409%、22.025%,累计贡献率达到62.434%(表5)。

表5 特征值及主成分贡献率

Table 5 Eigenvalue and contribution rate of principal components

成份	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%
1	2.425	40.409	40.409	2.425	40.409	40.409
2	1.321	22.025	62.434	1.321	22.025	62.434
3	0.873	14.549	76.983			
4	0.622	10.372	87.355			
5	0.498	8.296	95.651			
6	0.261	4.349	100			

表6中主成分1对总方差的贡献率为40.409%,在COD、BOD₅、NH₃-N、TP和TN上有较高载荷,分别为0.751、0.822、0.655、-0.583和-0.590。其中BOD₅表示水中微生物分解有机物的耗氧状况,氮磷可为水生植物和水中微生物提供营养,与湖泊富营养化状况密切相关,因此可将主成分1定义为富营养化污染状况指标,是洪泽湖最主要的污染指标。主成分2贡献率为22.025%,主要代表COD_{Mn},载荷系数为-0.728。COD_{Mn}表示水中有机物含量,可将主成分2作为有机污染程度指标。

2.4.2 水质主要污染类型

图5为2013—2020调水期洪泽湖主成分分析双标图,图中横轴为各样点在主成分1排序轴的得分,纵轴为各样点在主成分2排序轴的得分。由图5可见,主成分1对洪泽湖各样点总方差的贡献率为40.409%,主成分2对洪泽湖各样点总方差的贡献率为22.025%。成子湖区和溧河洼区样点主要分布在一、四象限,水质状况相似,主要影响因素为TP、NH₃-N、COD、BOD₅、COD_{Mn},表明成子湖区和溧河洼区主要的污染类型是富营养化和有机污染混合污染,洪泽湖建设用地和养殖活动集中在这两湖区周围,人类活动影响下污染物大量输入;过水区样点分布与其他两湖区差别较大,主要分布在二、三象限,水质影响因子为TN和TP,表明过水区主要是富营养化污染,东线调水和淮河下泄水的直接输入使过水区氮磷污染较突出。综合而言,洪泽湖调水时水质主要污染类型为富营养化污染,主要限制因子为氮磷营养盐,由外源河流输入和周边养殖建设区人类活动排入大量引起富营养化的物质导致^[28]。

3 结 论

a. 洪泽湖调水期水质主要污染指标为TN和TP,平均达Ⅳ类或Ⅴ类水质,水质总体在合格至轻度污染

表4 洪泽湖与南水北调东线工程调水期
入湖水水质指标 Pearson 相关性

Table 4 Pearson correlation of water quality indicators
between Hongze Lake and the entry point of the east route of
the South-to-North Water Diversion during
the water diversion period

指标	相关系数	P	指标	相关系数	P
COD _{Mn}	0.941	0.000 **	NH ₃ -N	0.749	0.032 *
COD	0.930	0.001 **	TP	0.76	0.029 *
BOD ₅	0.868	0.005 **	TN	0.822	0.012 *

表6 主成分载荷系数

Table 6 Load coefficient of principal
component

指标	载荷系数	
	主成分1	主成分2
COD _{Mn}	0.357	-0.728
COD	0.751	0.087
BOD ₅	0.822	0.153
NH ₃ -N	0.655	0.608
TP	-0.583	0.575
TN	-0.59	-0.011

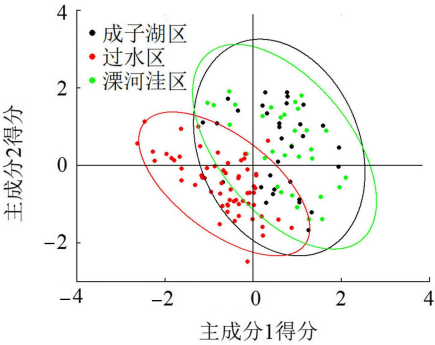


图5 2013—2020调水期洪泽湖主成分分析双标图
Fig.5 Biplot for PCA of Hongze Lake from 2013 to
2020 during the water diversion period

之间。过水区水质劣于其他湖区。调水期以来各水质污染指标全湖均值均呈现下降趋势,湖水综合质量微弱上升。其中过水区污染年际上显著减轻,成子湖区和溧河洼区污染呈增加趋势。

b. 洪泽湖调水期间水质污染来源以入湖河流输入污染和建设区人类活动污染为主,伴有偶发的污染事故。污染类型以富营养化污染为主,伴随氮磷营养盐限制。成子湖区和溧河洼区污染模式相似,为富营养化和有机污染混合污染,主要来自集中在两湖区周围的养殖用地和建设用地排放的面源污染;过水区污染模式差异较大,主要限制因素是东线输水和淮河排入的 TP、TN。

c. 随调水时间增加,洪泽湖对东线输水水质有改善趋势。基于洪泽湖调水时主要污染来源,应继续加强对淮河污染治理,减少入湖河流氮磷输入;继续加大对围网养殖限制力度,同时着重注意成子湖区和溧河洼区建设用地造成的污染输入。

参考文献:

[1] WU Y,DAI R,XU Y,et al. Statistical assessment of water quality issues in Hongze Lake,China,related to the operation of a water diversion project[J]. Sustainability,2018,10 (6) :1885.

[2] 葛绪广,王国祥. 洪泽湖面临的生态环境问题及其成因[J]. 人民长江,2008(1) :28-30. (GE Xuguang,WANG Guoxiang. Ecological and environmental problems faced by Hongze Lake and their causes [J]. Yangtze River,2008(1) :28-30. (in Chinese))

[3] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB3838—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[4] 崔嘉宇,郭蓉,宋兴伟,等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019 年)[J]. 湖泊科学,2021,33(6) :1727-1741. (CUI Jiayu,GUO Rong,SONG Xingwei,et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze,2010—2019[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(6) :1727-1741. (in Chinese))

[5] 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 and Development,2019,31(9) :11-13. (in Chinese))

[6] 滕海波,刘志芳,冯凯. 南水北调东线一期工程供水目标实现存在的问题与对策研究[J]. 项目管理技术,2021,19(9) :142-146. (TENG Haiibo,LIU Zhifang,FENG Kai. Research on problems and countermeasures of water supply target realization of the first phase of the eastern route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Project Management Technology,2021,19(9) :142-146. (in Chinese))

[7] 赵世新,张晨,高学平,等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学,2012,24(6) :923-931. (ZHAO Shixin,ZHANG Chen,GAO Xueping,et al. The impact of the operation of eastern route project of the South-to-North Water Diversion Project on water quality in Lake Nansi[J]. Journal of Lake Sciences,2012,24(6) :923-931. (in Chinese))

[8] 田家怡,陆兆华,闫永利,等. 南水北调东线工程山东段生态安全评价[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(6) :39-44. (TIAN Jiayi,LU Zhaoehua,YAN Yongli,et al. Evaluation of ecological security on Shandong Province in the eastern route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology,2007,5(6) :39-44. (in Chinese))

[9] 张婷婷,杨刚,张建国,等. 南水北调东线一期工程输水干线水质变化趋势分析[J]. 水生态学杂志,2022,43(1) :8-15. (ZHANG Tingting,YANG Gang,ZHANG Jianguo,et al. Changes in the quality of water flowing through the first phase of the eastern route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydroecology,2022,43(1) :8-15. (in Chinese))

[10] 韦翠珍,付小峰,李洪亮. 南水北调东线调水前后洪泽湖总磷含量时空变化探讨[J]. 治淮,2020(11) :27-29. (WEI Cuizhen,FU Xiaofeng,LI Hongliang. Spatial-temporal variation of total phosphorus content in Lake Hongze before and after water transfer from the eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Huaihe River administration,2020(11) :27-29. (in Chinese))

[11] 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[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12) :2992-3002. (ZHU Tianshun,LIU Mei,SHEN Henglun,et al. The distribution of TN and TP in water and evaluation of eutrophic of lakes in the east route of South-to-North Water Transfer[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12) :2992-3002. (in Chinese))

[12] 李吉平,徐勇峰,陈子鹏,等. 洪泽湖地区麦稻两熟农田和杨树林地氮磷径流流失特征研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(1) :98-104. (LI Jiping,XU Yongfeng,CHEN Zipeng,et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff of wheat-rice double cropping field and poplar forest land in intersection area of Hongze Lake[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2019,43(1) :98-104. (in Chinese))

[13] 刘超,王智源,张建华,等. 景观类型与景观格局演变对洪泽湖水质的影响[J]. 环境科学学报,2021,41(8):3302-3311. (LIU Chao,WANG Zhiyuan,ZHANG Jianhua,et al. Effects of landscape types and landscape pattern evolution on water quality of Hongze Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(8):3302-3311. (in Chinese))

[14] 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[J]. 湖泊科学,2019,31(2):440-448. (WU Tianhao,LIU Jinsong,DENG Jianming,et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake,Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences,2019,31(2):440-448. (in Chinese))

[15] 卞宇峥,薛滨,张风菊. 近三百年来洪泽湖演变过程及其原因分析[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1-14. (BIAN Yuzheng,XUE Bin,ZHANG Fengju. The changes of Lake Hongze and its driving forces over the past three hundred years[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(6):1-14. (in Chinese))

[16] 周淼,李维刚,易灵,等. 四种水质评价方法的特点分析与比较研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(12):173-177. (ZHOU Miao,LI Weigang,YI Ling,et al. Characteristics and comparison of four water quality evaluation methods[J]. Environmental Science and Management,2016,41(12):173-177. (in Chinese))

[17] 冉晓频. 综合污染指数法在酉阳县小坝水库水质评价中的应用[J]. 绿色科技,2017(12):71-72. (RAN Xiaopin. Application of comprehensive pollution index method in water quality evaluation of Xiaoba Reservoir of Youyang County[J]. Journal of Green Science and Technology,2017(12):71-72. (in Chinese))

[18] 李晶晶,李俊,黄晓荣,等. 地下水水质评价中空间插值方法比较[C]//中国水利学会. 中国水利学会2016学术年会论文集(下册). 南京:河海大学出版社,2016:555-560.

[19] 熊梅君,李秋华,陈倩,等. 基于GIS应用P-IBI评价贵州高原百花水库水生态系统健康[J]. 生态学杂志,2019,38(10):3093-3101. (XIONG Meijun,LI Qiu Hua,CHEN Qian,et al. Evaluation of water ecosystem health of Baihua Reservoir in Guizhou based on GIS and P-IBI[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(10):3093-3101. (in Chinese))

[20] 王红梅,黄晓. 基于主成分分析的滇池外海综合评价及变化趋势研究[J]. 四川环境,2021,40(4):72-79. (WANG Hongmei,HUANG Xiao. Comprehensive evaluation and change trend of the Waihai of Dianchi Lake based on principal component analysis[J]. Sichuan Environment,2021,40(4):72-79. (in Chinese))

[21] 郭学士. 2010—2016年彰武南海水库水质变化趋势分析[J]. 海河水利,2017(4):17-19. (GUO Xueshi. Trend analysis of water quality in Changwu Nanhai Reservoir from 2010 to 2016[J]. Haihe Water Resources,2017(4):17-19. (in Chinese))

[22] 何振芳,郭庆春,邓焕广,等. 南水北调调蓄湖泊水质参数遥感反演及其影响因素[J]. 水资源保护,2021,37(3):87-95. (HE Zhenfang,GUO Qingchun,DENG Huanguang,et al. Remote sensing inversion of water quality parameters and its influencing factors in a storage lake of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):87-95. (in Chinese))

[23] 李杨,解琨,梁子亮. 基于遥感的2009—2019年江苏省重点湖泊变化监测[J]. 测绘地理信息,2022,47(增刊1):172-176. (LI Yang,XIE Kun,LIANG Ziliang. Changes monitoring of key lakes in Jiangsu Province from 2009 to 2019 based on remote sensing[J]. Journal of Geomatics,2022,47(Sup1):172-176. (in Chinese))

[24] 徐亚东,毛晓文. 洪泽湖北部主要入湖河道阵发性水质污染原因分析及预防措施[J]. 江苏水利,2020(11):4-8. (XU Yadong,MAO Xiaowen. Causes analysis and preventive measures of paroxysmal water pollution in the main channels entering lake in northern Hongze Lake[J]. Jiangsu Water Resources,2020(11):4-8. (in Chinese))

[25] 闵敏,林晨,熊俊峰,等. 不同土地利用模式下洪泽湖流域非点源颗粒态磷负荷时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(4):606-614. (MIN Min,LIN Chen,XIONG Junfeng,et al. Reserach on spatio-temporal pattern evolution of NPS particulate phosphorus load in Hongze Lake Basin under different landuse patterns[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2017,26(4):606-614. (in Chinese))

[26] 李颖,张祯,程建华,等. 2012—2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析[J]. 湖泊科学,2021,33(3):715-726. (LI Ying,ZHANG Zhen,CHENG Jianhua,et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(3):715-726. (in Chinese))

[27] 姚敏,毛晓文,孙瑞瑞. 洪泽湖水质2010—2020年时空变化特征[J]. 水资源保护,2022,38(3):174-180. (YAO Min,MAO Xiaowen,SUN Ruirui. Study on the spatial and temporal variations of water quality in Hongze Lake from 2010 to 2020[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):174-180. (in Chinese))

[28] 王俊,刘超,王智源,等. 洪泽湖流域污染负荷削减对生境质量的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):190-199. (WANG Jun,LIU Chao,WANG Zhiyuan,et al. Effects of pollution load reduction on habitat quality in Hongze Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):190-199. (in Chinese))