

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.006

2012—2023 年南水北调东线水源区水质演变趋势

衣 鹏¹, 纪 源¹, 钱睿智², 杨咏梅³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225300;
3. 江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225007)

摘要: 为全面了解南水北调东线工程通水以来水源区水质状况及其演变趋势, 基于水质指数 (WQI) 评价法, 结合 Mann-Kendall 趋势检验法和主成分分析法, 对 2012—2023 年东线工程水源区 6 个监测断面水质演变趋势及主要污染成分进行分析, 并基于逐步多元线性回归分析方法识别了影响水源区 WQI 的关键指标, 构建了最小水质指数模型, 同时采用 2023 年 WQI 数据评估了该模型的应用可行性。结果表明: WQI 年均值总体呈现增大趋势, 2012—2017 年 WQI 平均值为 38.0, 水质评价等级为较差, 2018—2023 年 WQI 平均值为 67.4, 水质明显提升并持续处于良好等级; 水源区水体污染物类型主要为有机物质和氮磷营养盐, 农业种植产生的农业面源污染、工业废水以及未经处理的生活污水的直接排放造成的点源污染是污染物的主要来源, 加强点源、面源污染防治是解决水源区水环境问题的根本途径; 最小水质指数模型具有较好的水质评价性能, 有助于节约监测成本和提升评价效率。

关键词: 水质评价; 水质指数评价法; 逐步多元线性回归; 南水北调东线工程; 水源区; 江都区

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)03-0040-10

Evolution trend of water quality in water source area along eastern route of South-to-North Water Diversion Project from 2012 to 2023

YI Peng¹, JI Yuan¹, QIAN Ruizhi², YANG Yongmei³

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

2. Taizhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China;

3. Yangzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yangzhou 225007, China)

Abstract: To comprehensively understand the water quality status and evolution trend in the water source area since the operation of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP-ER), the water quality index (WQI) assessment method, the Mann-Kendall trend test, and principal component analysis were employed to analyze the evolution trend of water quality and major pollutants in six monitoring sections of the water source area along SNWDP-ER from 2012 to 2023. Based on the stepwise multiple linear regression analysis method, the key indicators affecting the WQI values of the water source area were identified, and a minimum water quality index model was constructed. The application feasibility of this model was evaluated using the WQI data of 2023. The results indicate that the annual average value of WQI shows an overall increasing trend. From 2012 to 2017, the average value of WQI is 38.0, indicating a poor water quality assessment status. The average value of WQI from 2018 to 2023 is 67.4, and the water quality has significantly improved and remained at a good level continuously. The types of water pollutants in the water source area are mainly organic substances and nitrogen and phosphorus nutrients. Agricultural non-point source pollution generated by agricultural planting, industrial wastewater, and point source pollution caused by the direct discharge of untreated domestic sewage are the main sources of pollutants. Strengthening the prevention and control of point source and non-point source pollution is the fundamental way to improve water environment problems in water source areas. The minimum water quality index model has better performance in water quality assessment, which is helpful in saving monitoring costs and improving assessment efficiency.

Key words: water quality assessment; water quality index assessment method; stepwise multiple linear regression; eastern route of

基金项目: 江苏省“333 高层次人才培养工程”项目(2022322002); 江苏省水利科技项目(2022030)

作者简介: 衣鹏(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水环境化学研究。E-mail: 20130006@hhu.edu.cn

通信作者: 钱睿智(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: qianruizhi1987@126.com

引用本文: 衣鹏, 纪源, 钱睿智, 等. 2012—2023 年南水北调东线水源区水质演变趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 40-49.

YI Peng, JI Yuan, QIAN Ruizhi, et al. Evolution trend of water quality in water source area along eastern route of South-to-North Water Diversion Project from 2012 to 2023[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 40-49.

South-to-North Water Diversion Project; water source area; Jiangdu District

南水北调东线工程是世界上规模最大的调水工程之一^[1],自 2013 年通水以来,向沿线生态补水约 11.9 亿 m³,直接受益人口超过 6 800 万人^[2]。水质好坏是决定南水北调工程成败的关键^[3],而水源区作为南水北调工程的源头,其水质更是直接关系到南水北调沿线及受水区的生态安全和水安全^[4-5]。

针对南水北调东线工程水质问题,已有不少学者进行了研究:张婷婷等^[6]研究了南水北调东线工程通水前后干线水质变化总体趋势,发现通水后 TN 质量浓度(ρ_{TN} , ρ 为质量浓度,下同)下降约 59%、 ρ_{COD} 下降约 16%,输水干线水质得到明显改善;Qu 等^[7]采用水质指数(water quality index, WQI)评价法对南水北调东线沿线调蓄湖泊水质状况进行了时空分析,发现从上游到下游调蓄湖泊中营养物浓度、总固体悬浮物和浊度呈明显下降趋势,而电导率、总硬度和氯离子质量浓度呈上升趋势,并且调水期间湖泊存在富营养化的风险。目前相关研究多集中于南水北调东线工程输水干线及沿线调蓄湖泊^[8-12],缺乏对东线工程水源区长时间序列水质评价及水质演变趋势的研究。东线工程水源区地处江淮交汇处,水质容易受到不同形式的污染^[13],且污水随时可能进入南水北调东线输水干线^[14],因此识别水源区关键水质指标和主要污染源,定量研究水质驱动因素十分必要和迫切^[15-16]。

本文以南水北调东线工程水源区 6 个监测断面为研究对象,结合 WQI 评价法、Mann-Kendall 趋势检验法、主成分分析法对 2012—2023 年水源区水质状况进行评价,并基于逐步多元线性回归分析方法识别影响水源区 WQI 的关键指标,构建最小水质指数(WQI_{min})模型,以最合理的监测指标数量获得最全面的水环境信息,以期在南水北调东线水源区水质监测及水安全保障提供参考。

1 研究区概况

南水北调东线工程水源区——江都区(图 1),位于江苏省中部(32° 17′ 51″ N ~ 32° 48′ 00″ N、119° 27′ 03″ E ~ 119° 54′ 23″ E)。江都区地处长江下游,既是南水北调东线取水口的饮用水水资源保护地,又是南水北调工程的第一户^[17]。江都区属于亚热带湿润气候,季风显著,四季分明,雨水充沛,年平均气温 14.9℃,年均日照 2 132.5 h,年均降水量 975.5 mm,降水集中在 6—9 月,汛期平均降水量约 634 mm,占全年的 65%。本文选取江都区内具有代表性的 6 个监测断面为研究对象:六闸断面位于南水北调东线工程的输水干线,区域水环境管控措施严格,受人类活动影响较小;江都(通)和宜陵断面位于江都主城区,土地利用类型以城市用地为主,且工业区多集中于此;丁伙、郭村和大桥断面附近村民依水而居,土地利用类型以农业用地为主,农业活动频繁。

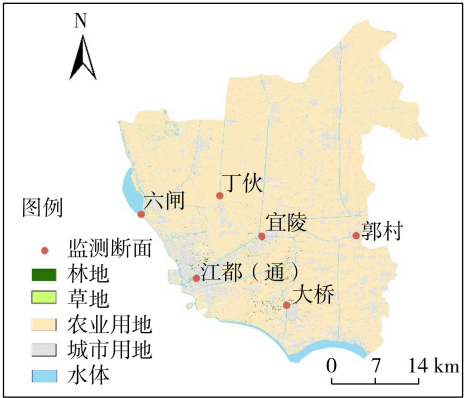


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源

6 个监测断面 2012—2023 年逐月监测水质数据来自江苏省水文水资源勘测局,选取水温(T)、pH、 ρ_{DO} 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 ρ_{BOD_5} 、 ρ_{COD} 、 ρ_{TN} 、 ρ_{TP} 、 $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Hg})$ 、 $\rho(\text{Zn})$ 和 $\rho(\text{F}^-)$ 等项水质指标进行分析。研究期内, $\rho(\text{Hg})$ 、 $\rho(\text{Zn})$ 均低于标准 HJ 597—2011《水质 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法》和 GB 7475—1987《水质铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法》中规定的原子吸收分光光度法的最低检测限(分别为 0.000 01、0.05 mg/L),因此水体中 Hg、Zn 表现为未检出状态。

2.2 研究方法

2.2.1 评价法

WQI 评价法为全球范围内评估地表水和地下水水质的常用方法^[18-21]。与传统水质评价法相比,WQI 评价法可以有效地将多个水质参数整合为一个能够反映整体水质状况的归一化无量纲数,能够准确反映流域水质的时间和空间变化特征^[22],更适用于对流域整体范围进行长期水质评价^[23]。本文采用 Pesce 等^[24]改

进的 WQI 计算公式:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n C_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{1}$$

其中
$$C_i = \begin{cases} 100 - \left[\frac{20m(T_i - S_{i,k})}{S_{i,k+m} - S_{i,k}} + c \right] & S_{i,k} \leq T_i < S_{i,k+m} \\ 100 - \frac{20mT_i}{S_{i,k+m}} & 0 \leq T_i < S_{i,k} \end{cases}$$

式中: I 为 WQI; n 为水质指标总数; C_i 为指标 i 的归一化值; w_i 为指标 i 的权重,参考水质指标对水生生物的重要性, w_i 取值范围设为 1~4,其中 1、4 分别表示对水质影响最小、最大^[1,22-24]; T_i 为指标 i 的测量质量浓度; $S_{i,k}$ 、 $S_{i,k+m}$ 分别为指标 i 在 k 级和 $k+m$ 级的标准质量浓度; m 为相同标准值的个数,如果不存在相同标准值则 $m=1$; c 为系数,水质分级为 I、II、III、IV、V 时分别取 20、40、60、80、100。

根据 WQI 将水质状况分为优秀(>80~100)、良好(>60~80)、尚好(>40~60)、较差(>20~40)、差(0~20)和极差(<0)6 个等级。基于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,计算 WQI 的水质指标权重、水质分级标准见表 1。

表 1 水质指标权重及水质分级标准
Table 1 Weights of water quality indicators and water quality classification standards

水质指标	单位	w_i	水质分级标准				
			I	II	III	IV	V
$\rho(\text{As})$	μg/L	2	≤50	≤50	≤50	50<·≤100	50<·≤100
ρ_{DO}	mg/L	4	≥7.5	6≤·<7.5	5≤·<6	3≤·<5	2≤·<3
$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	mg/L	3	≤2	2<·≤4	4<·≤6	6<·≤10	10<·≤15
ρ_{BOD_5}	mg/L	3	≤3	≤3	3<·≤4	4<·≤6	6<·≤10
ρ_{COD}	mg/L	3	≤15	≤15	15<·≤20	20<·≤30	30<·≤40
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	mg/L	3	≤0.15	0.15<·≤0.5	0.5<·≤1	1<·≤1.5	1.5<·≤2
ρ_{TP}	mg/L	4	≤0.02	0.02<·≤0.1	0.1<·≤0.2	0.2<·≤0.3	0.3<·≤0.4
$\rho(\text{F}^-)$	mg/L	2	≤1	≤1	≤1	1<·≤1.5	1<·≤1.5

注:人为造成的环境水温变化需满足周平均最大温升小于等于 1℃,周平均最大温降小于等于 2℃。

2.2.2 统计方法

采用 Mann-Kendall 趋势检验法分析水质指标和 WQI 的时间变化趋势^[25-26],统计变量 $Z>0$ 代表呈上升趋势, $Z=0$ 代表无明显变化趋势, $Z<0$ 代表呈下降趋势;当 $|Z| \geq 1.96$ 时,代表在 95%置信区间内显著。主成分分析法广泛应用于地表水水质时空变化的研究中^[27-28],其将原始数据通过线性变换投影到一个新的特征空间,使得投影后的数据具有最大的方差。通过该方式能够保留原始数据的重要信息,同时简化了数据的复杂性。逐步多元线性回归分析方法通过逐步添加或移除变量找到最佳的回归模型^[29],在降低模型复杂性的同时,找寻最显著的预测变量。

使用 Excel 对原始数据进行整理,使用 SPSS Statistics 25 进行 Mann-Kendall 趋势检验、主成分分析和逐步多元线性回归分析,使用 Origin 2023b 绘制数据图。

3 结果与分析

3.1 水质时间变化特征

3.1.1 年际变化特征

由图 2 可知(图(a)虚线部分代表数据缺失),2012—2015 年 ρ_{BOD_5} 年均值基本维持在 IV 类水标准,2015 年以后 ρ_{BOD_5} 显著减小,达到 I 类水标准,最大年均值由 2012 年的 5.7 mg/L 减小到 2019 年的 1.5 mg/L,减小了 73.7%。 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 年均值在 2014 年短暂达到 III 类水标准后,2015—2017 年又维持在 IV 类水,2017—2019 年间明显下降,达 II 类水标准并保持稳定。 ρ_{TP} 年均值年际变化波动较大,除 2012 年和 2013 年外,均保持在 IV 类或 III 类标准,但 2019—2023 年的均值要显著小于 2012—2018 年。 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 年际变化特征与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 相似,2017—2019 年间显著减小,于 2022—2023 年达到 II 类水标准。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的单因子评价方法,现阶段研究区超标水质指标主要为 ρ_{TP} 。

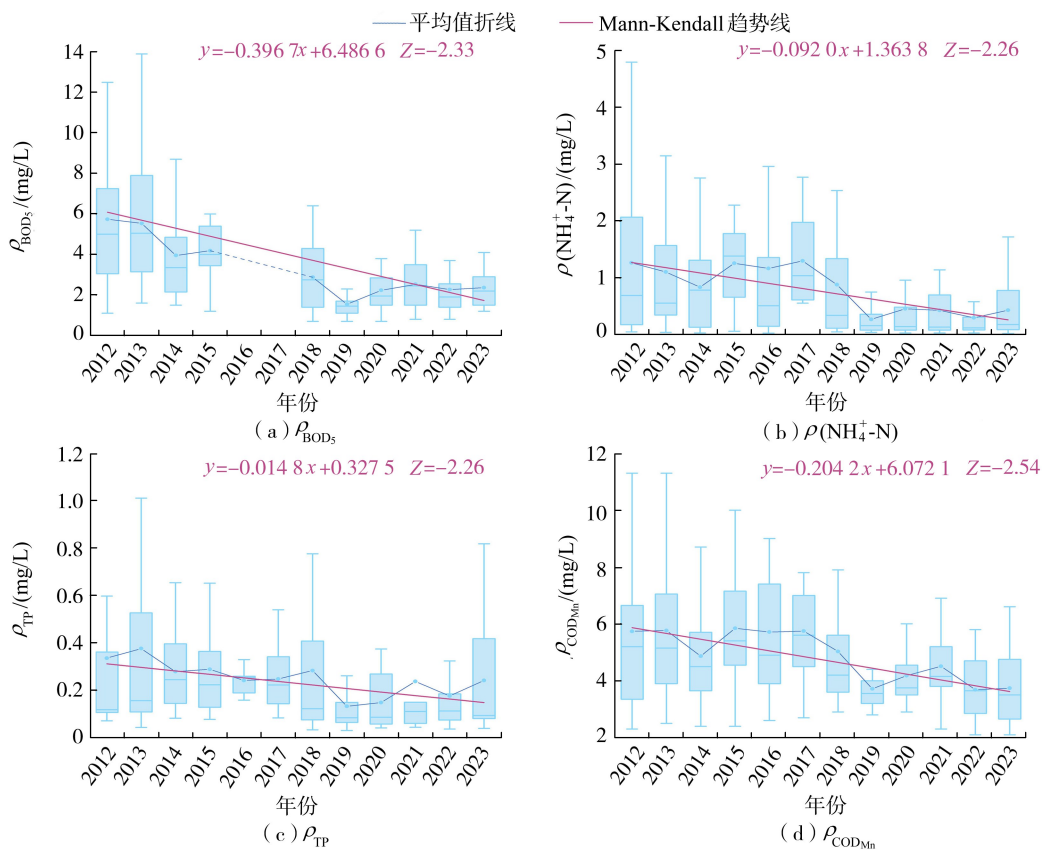


图 2 水质指标年均值变化及 Mann-Kendall 趋势检验结果

Fig. 2 Annual average value changes in water quality indicators and Mann-Kendall trend test results

结合前人研究成果^[1,22-24]和研究区水环境现状,选取 ρ_{DO} 、 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 ρ_{BOD_5} 、 ρ_{COD} 、 $\rho(\text{F}^-)$ 、 $\rho(\text{As})$ 、 ρ_{TP} 和 T 这 9 项水质指标,采用 WQI 评价法对 2012—2023 年整体水质状况进行评价。选取的 9 项指标可以全面反映研究区水体污染类型,同时兼顾无机有毒污染物,并考虑了水温的影响。同时,9 项指标在 2012—2023 年间监测记录相对完整,数据质量高,避免了因数据缺失引起的评价偏差。由图 3 可知,2012—2023 年各断面 WQI 年均值范围为 -28.3~87.4。WQI 年均值总体呈现上升趋势,由 2012 年的 32.9(最小值)增大到 2019 年的 73.9(最大值),增大了 124.6%,水质提升明显。2017 年为水质改善的关键时间节点:2012—2017 年水质评价存在极差等级,极差、差和较差的水质状况所占比超半数,WQI 平均值为 38.0,属于较差等级;2018—2023 年水质评价结果主要表现为优秀和良好,WQI 平均值为 67.4,属于良好等级。

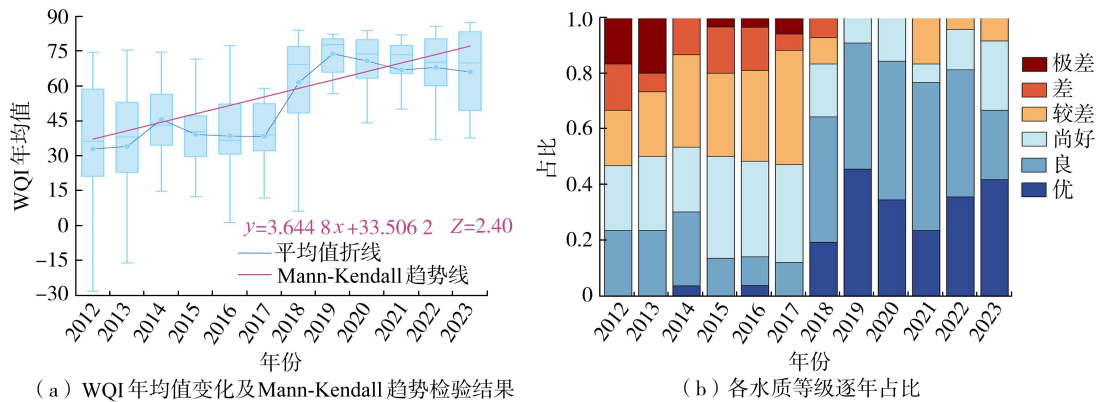


图 3 年际水质评价结果

Fig. 3 Results of interannual water quality assessment

由 Mann-Kendall 趋势线(图 2、图 3(a))可知,显著性水平为 0.05 时,2012—2023 年 WQI 呈现显著增大趋势($Z>0$,且 $|Z|\geq 1.96$), ρ_{BOD_5} 、 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 ρ_{TP} 和 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 呈显著减小趋势($Z<0$,且 $|Z|\geq 1.96$),表明 2012—

2023 年间水质得到明显改善。

3.1.2 年内变化特征

选择 6—9 月为汛期,其余月为非汛期,2018—2023 年 ρ_{DO} 、 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 、 ρ_{TP} 、 $\rho_{\text{COD}_{Mn}}$ 、 ρ_{BOD_5} 、 ρ_{COD} 、WQI 汛期和非汛期变化特征如图 4 所示。采用 Kruskal-Wallis 检验法对各水质指标差异性进行检验,发现汛期和非汛期的 WQI、 ρ_{DO} 、 $\rho_{\text{COD}_{Mn}}$ 、 ρ_{COD} 和 ρ_{BOD_5} 存在显著差异。Mann-Kendall 趋势检验结果表明,2018—2023 年汛期 WQI 年均值呈上升趋势($Z=0.38$),非汛期 WQI 年均值呈小幅度波动,但总体保持稳定,变化不大($Z=0$)。汛期 WQI 均值为 64.6,低于非汛期均值 68.6,非汛期水质略优于汛期。

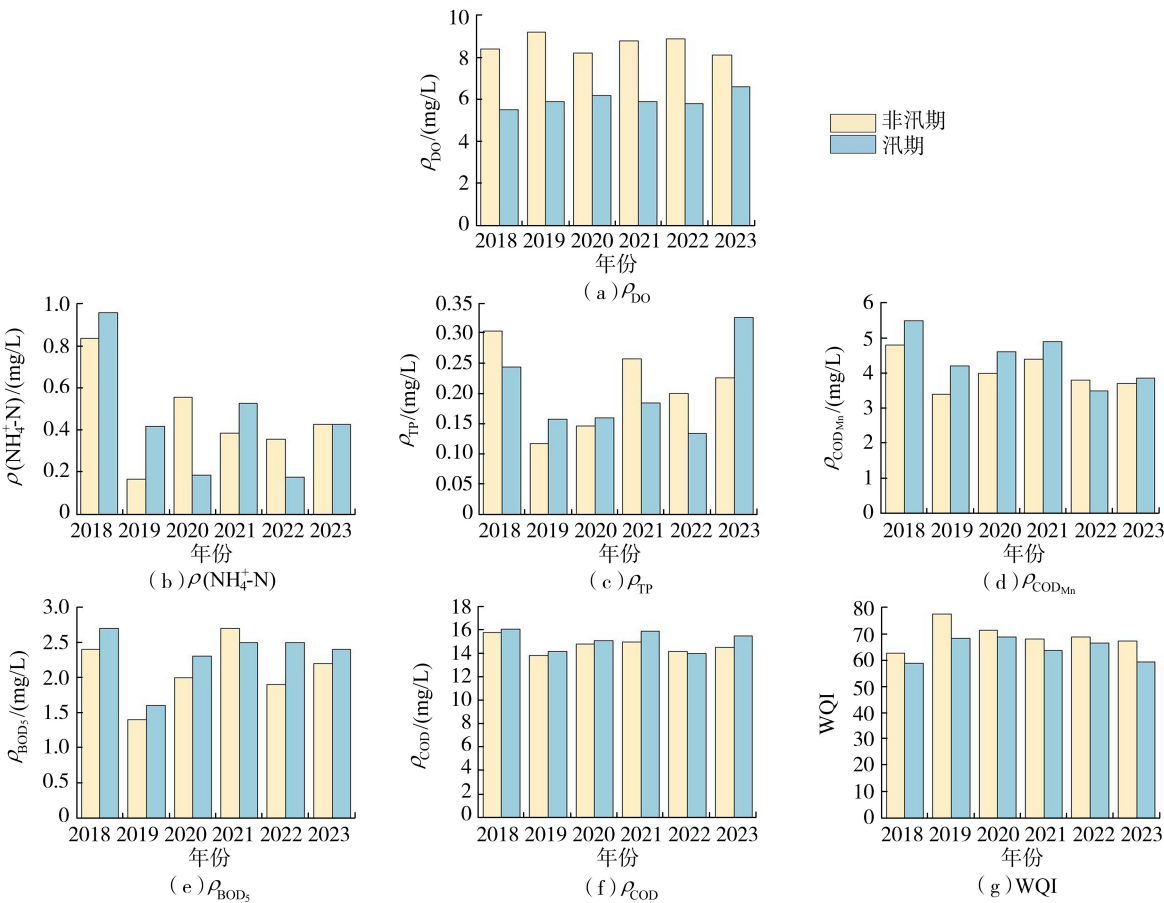


图 4 2018—2023 年各水质指标、WQI 年内变化

Fig. 4 Annual changes of water quality indicators and WQI values from 2018 to 2023

温度对水体中 ρ_{DO} 影响很大,汛期气温较高,水体中的氧气容易达到饱和,且汛期水体中好氧微生物活动剧烈,导致水体中氧气浓度进一步减少,因此汛期 ρ_{DO} 低于非汛期。汛期降水量大,冲刷农田施用的农药化肥、生活垃圾等随地表径流汇入河道^[30],导致水体有机污染指标 $\rho_{\text{COD}_{Mn}}$ 、 ρ_{COD} 和 ρ_{BOD_5} 等较高。总体而言,汛期的大量降水虽然增加了区域水体流动性,但其携带的大量营养物质增加了流域污染负荷,因此建议在河道两岸建设生态缓冲带,用于改善汛期水质,降低汛期水质恶化的风险。

3.2 水质空间变化特征

3.2.1 水质指标空间特征

由表 2 可知, ρ_{DO} 多年平均值范围为 5.61~8.73 mg/L,除江都(通)和丁伙断面外,均达到 I 类水标准,水体自净能力整体较好。 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 范围为 0.10~1.10 mg/L,其中 86.4% 水体达到 III 类水标准及以上。 ρ_{TP} 范围为 0.07~0.41 mg/L,78.8% 达到 IV 类水标准及以上,大桥断面磷污染最严重,为 V 类水。 $\rho_{\text{COD}_{Mn}}$ 范围为 3.56~5.51 mg/L,6 个监测断面均达到 III 类水标准。 ρ_{BOD_5} 范围为 1.62~3.19 mg/L,除大桥断面外,均达到 I 类水标准。 ρ_{COD} 范围为 13.2~16.8 mg/L,各监测断面均达到 III 类水标准。WQI 范围为 55.5~79.8,从大到小排序为六闸(79.8)、郭村(69.0)、宜陵(68.4)、江都(65.6)、大桥(61.2)、丁伙(55.5)。水质评价状况

除丁伙断面外均达到良好等级。

表 2 各监测断面水质指标和 WQI 的多年平均值

监测断面	$\rho_{\text{DO}}/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{TP}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{BOD}_5}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{COD}}/(\text{mg/L})$	WQI
江都(通)	7.14	1.10	0.17	3.98	2.29	15.3	65.6
六闸	8.73	0.10	0.07	3.56	1.62	13.2	79.8
丁伙	5.61	0.64	0.35	4.46	2.51	15.0	55.5
宜陵	7.51	0.73	0.20	5.51	2.81	16.8	68.4
郭村	8.03	0.39	0.15	4.04	2.34	15.4	69.0
大桥	8.11	0.74	0.41	4.77	3.19	15.8	61.2

表 2 数据与实际情况较为一致,六闸断面位于邵伯湖饮用水源保护区内^[31],水质保护与管理措施较为严格,且邵伯湖作为淮河入江的咽喉之地,上游来水丰富,水系连通性好,水动力强,周围居民区、工业区分布少,污染排放量少,使得六闸断面各监测指标明显优于其他断面,水质最好。研究区境内工业排污口主要集中在宜陵镇工业区内,化工厂等排放的工业废水中含有大量的还原性物质,使得宜陵断面的 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 ρ_{COD} 高于其他断面。江都(通)断面位于江都主城区,人口密度高,城镇生活污水排放量大,导致水体 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 较高。大桥和丁伙断面沿岸农业发达,化肥施用强度较高,农业种植污染影响较大,致使其 ρ_{TP} 明显高于其他断面。丁伙断面水体污染较为严重, ρ_{DO} 浓度较低,水体自净能力较差,应加强该区域污水处理及管网建设,整治入河排污口,以降低点源和面源污染对水体的污染。

3.2.2 基于主成分分析法的水质空间特征

主成分分析法对 6 个监测断面的水质数据分析结果表明:六闸断面前 4 个主成分对水质方差的贡献率为 71.1%,其余 5 个监测断面前 2 个主成分对水质方差的贡献率范围为 71.9%~79.4%。由图 5 可知,大桥断面第一主成分(PC1)贡献率为 49.4%, $\rho(\text{F}^-)$ 、 ρ_{DO} 与 PC1 呈正相关关系,因子载荷量分别为 0.45 和 0.40, T 与 PC1 呈负相关关系,因子载荷量为-0.41。Ma 等^[32]的研究表明,水体中 $\rho(\text{F}^-)$ 的主要来源为生活污水。

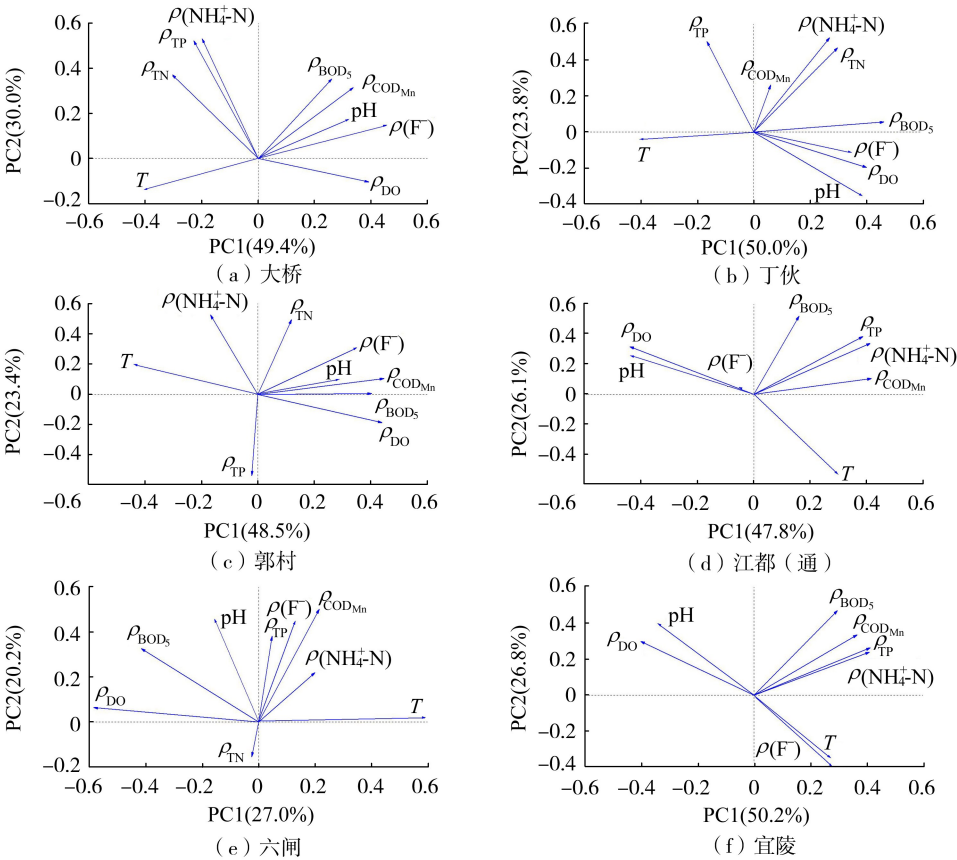


图 5 各监测断面水质指标主成分载荷

Fig. 5 Principal component loads of water quality indicators at each monitoring section

T 和 ρ_{DO} 呈现显著的负相关关系, T 是影响水体中 pH 和 ρ_{DO} 的主要环境因素, T 变化会直接影响水中好氧生物的生长繁殖和代谢速率, 同时也会对大气复氧产生影响, 因此 T 变化是影响断面水质的重要因素。 ρ_{BOD_5} 在丁伙断面 PC1 上的因子载荷量最大, 为 0.46, $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 在郭村断面 PC1 上的因子载荷量最大, 为 0.45。 大桥、丁伙和郭村的第二主成分(PC2) 贡献率分别为 30.0%、23.8% 和 23.4%, ρ_{TP} 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 ρ_{TN} 对 PC2 有着较大的因子载荷。 同时, ρ_{TP} 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 对宜陵断面 PC1 的因子载荷量均为 0.40。 江都和六闸断面的 PC1 上 ρ_{DO} 、pH 和 T 因子载荷量较大。 江都断面 PC2 上 ρ_{BOD_5} 因子载荷量达 0.52, 六闸断面 PC2 上 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 因子载荷量达 0.50。 ρ_{BOD_5} 和 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 通常表示水体中有机物的相对含量, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 ρ_{TP} 和 ρ_{TN} 是水体氮磷营养盐的重要指标^[33]。 因此, 研究区水体污染物类型可大致分为两大类: 有机物质和氮磷营养盐。 同时, T 变化导致水体 ρ_{DO} 变化也是影响研究区水质的因素之一。

根据扬州市江都区人民政府印发的《江都区省级水功能区达标整治方案》, 研究区污染源特征以农业面源污染为主, 点源为次, 内源影响较小。 农业面源污染中, 污染物主要来自农业种植, 其次是畜禽养殖和农村生活。 农业种植产生的 COD、 NH_4^+-N 、TP 分别占排放总量的 56.0%、47.4%、66.8%。 研究区河道沿岸多以农田和村落为主, 农业生产活动频繁, 生产过程中施用的农药化肥等淋溶进入水体, 农田退水过程中携带大量流失的氮、磷等营养物质进入河道, 成为水体氮磷的重要来源。 农村居民沿河聚集居住, 生活污水和垃圾直接排入河道, 沿途有些禽畜养殖场缺乏污水治理设施, 畜禽污水及废弃物任意排放, 使研究区水体有机污染加重。 点源污染包括工业废水以及未经处理的生活污水的直接排放, 其排放的 COD、 NH_4^+-N 、TP 分别占排放总量的 31.0%、32.9%、22.4%。 水质的年际变化与当地政府的水环境整治力度密切相关, 随着 2017 年印发的《江都区省级水功能区达标整治方案》的有效落实, 全区积极开展点源污染治理, 严格控制废污水入河量。 废水排放量年均值由整治前的 $5.0 \times 10^7 \text{ t}$ 下降至整治后的 $2.0 \times 10^7 \text{ t}$ 。 同时, 开展农药化肥使用量零增长行动, 2017 年化肥施用量比去年减少了 7745 t, 同比下降 3.87%, 最大程度减少了农业面源污染。 最终使得各污染指标在 2017 年后质量浓度明显降低, WQI 显著提升, 水质改善成效显著。 把好污染源头, 加强点源、面源污染防治是解决研究区水环境问题的根本保障。

3.3 构建最小水质指数模型

为了确定影响 WQI 的关键水质指标, 需要建立 WQI_{min} 模型。 首先通过逐步多元线性回归分析方法分析 2018—2022 年的水质数据, 筛选出影响 WQI 的基础指标和补充指标, 然后基于筛选的水质指标构建 WQI_{min} 模型^[34]。 采用决定系数(R^2) 评价建立的 WQI_{min} 模型的拟合程度, 采用均方根误差(RMSE) 和百分比误差(PE) 评价 WQI_{min} 模型的预测精度^[35], 确定最优的 WQI_{min} 模型, 采用 2023 年 WQI 数据(数据个数为 48) 对最优模型进行验证, 以评估该模型在研究区应用的可行性。

根据逐步多元线性回归分析结果(表 3), ρ_{TP} 对 WQI 的影响最大($R^2=0.861$), 将 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 ρ_{DO} 依次与 WQI 进行多元回归分析, 模型的 R^2 增大, 分别为 0.916 和 0.959。 选择 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 ρ_{BOD_5} 作为第 4 个、第 5 个参数, 进一步提升了模型的精度(R^2 分别为 0.970 和 0.976)。 引入 $\rho(\text{F}^-)$ 使模型的 R^2 达到 0.981。 因此选择 ρ_{TP} 、 $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 ρ_{DO} 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 作为基础参数建立 WQI_{min} , 考虑到 ρ_{BOD_5} 和 $\rho(\text{F}^-)$ 对 WQI_{min} 模型性能的影响, 建立 4 个 WQI_{min} 模型($\text{WQI}_{\text{min-1}} \sim \text{WQI}_{\text{min-4}}$) 分别对研究区水质进行评价。 由表 4 可知, $\text{WQI}_{\text{min-2}}$ 模型表现最好, 其 RMSE 和 PE 最小, 分别为 6.47 和 1.57%, 同样有 5 个参数的 $\text{WQI}_{\text{min-3}}$ 与 $\text{WQI}_{\text{min-2}}$ 相比, 表现相对较差, $\text{WQI}_{\text{min-4}}$ 的 R^2 略大于 $\text{WQI}_{\text{min-2}}$, 但其 RMSE 和 PE 也较大, 说明该模型的精度和预测能力比 $\text{WQI}_{\text{min-2}}$ 弱。

表 3 逐步多元线性回归结果

Table 3 Results of stepwise multiple linear regression

模型	线性模型	R^2	p
1	$I=84.19-55.79\rho_{\text{TP}}$	0.861	<0.01
2	$I=97.66-51.38\rho_{\text{TP}}-3.85\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	0.916	<0.01
3	$I=88.09-47.95\rho_{\text{TP}}-3.65\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+0.99\rho_{\text{DO}}$	0.959	<0.01
4	$I=86.41-37.46\rho_{\text{TP}}-3.35\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1.05\rho_{\text{DO}}-6.54\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	0.970	<0.01
5	$I=83.99-36.37\rho_{\text{TP}}-2.64\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1.27\rho_{\text{DO}}-5.92\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})-1.21\rho_{\text{BOD}_5}$	0.976	<0.01
6	$I=85.16-39.66\rho_{\text{TP}}-1.99\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1.35\rho_{\text{DO}}-5.40\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})-1.49\rho_{\text{BOD}_5}-5.85\rho(\text{F}^-)$	0.981	<0.01

表 4 WQI_{min} 模型评价结果
Table 4 Assessment results of WQI_{min} model

模型	选择的水质指标	R^2	RMSE	PE/%	p
WQI_{min-1}	ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$	0.971	12.37	2.73	<0.01
WQI_{min-2}	ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$ ρ_{BOD_5}	0.992	6.47	1.57	<0.01
WQI_{min-3}	ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$ $\rho(F^-)$	0.976	10.18	5.32	<0.01
WQI_{min-4}	ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$ ρ_{BOD_5} $\rho(F^-)$	0.997	8.04	3.88	<0.01

注:基于式(1)和表 1 的水质指标权重计算 WQI_{min} 。

为了更好地验证模型的准确性,选取 2023 年的 WQI 对模型 WQI_{min-2} 进行验证。由图 6 可知, WQI_{min-2} 与 2023 年 WQI 具有较强的一致性($R^2=0.979$),表明 WQI_{min-2} 能很好地反映 WQI 真实值。因此, WQI_{min-2} 是最适合本研究的 WQI_{min} 模型,模型参数 ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$ ρ_{BOD_5} 为影响研究区水质的关键水质指标。

ρ_{TP} 作为回归模型选取的第一个参数,对 WQI 变化的解释贡献最大($R^2=0.861$), $\rho(NH_4^+-N)$ 同样作为水体中的营养物质,对 WQI 的变化具有第 4 高的解释能力,表明研究区水体氮磷污染较为严重。有机污染的指标 $\rho_{COD_{Mn}}$ 和 ρ_{BOD_5} 分别对 WQI 的变化具有第 2 高、第 5 高的解释力,其原因归结于当地有机物污染较为严重。 WQI_{min} 模型所选择的参数能够全面解释水质的整体变化特征,并有利于以相对较低的测量成本高效地评价当地水质。

4 结 论

- a. 水源区 WQI 年均值总体呈上升趋势,2017 年《江都区省级水功能区达标整治方案》的有效落实为水质改善的关键时间节点。2012—2017 年 WQI 平均值为 38.0,水质评价等级为较差;2018—2023 年 WQI 平均值为 67.4,水质明显提升并持续处于良好等级。受温度以及降水等因素的影响,非汛期水质优于汛期。
- b. 空间上,六闸断面水质明显优于其他断面,丁伙断面水体污染较为严重。水源区水体污染物类型主要为有机物质和氮磷营养盐,农业种植产生的农业面源污染、工业废水以及未经处理的生活污水的直接排放造成的点源污染是污染物的主要来源。加强点源、面源污染防治是解决水源区水环境问题的根本途径。
- c. 基于水质数据建立的 WQI_{min} 模型由 ρ_{TP} $\rho_{COD_{Mn}}$ ρ_{DO} $\rho(NH_4^+-N)$ ρ_{BOD_5} 5 个关键指标组成,该模型与 WQI 存在高度相关性,表现出较好地水质评价性能,对于节约监测成本和提升评价效率具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] NONG Xizhi,SHAO Dongguo,ZHONG Hua,et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. Water Research,2020,178:115781.

[2] YAN Hanlu,LIN Yuqing,CHEN Qiuwen,et al. A review of the eco-environmental impacts of the South-to-North Water Diversion: implications for interbasin water transfers[J]. Engineering,2023,30:161-169.

[3] 李原园. 严格水质保障 确保清水北送:《南水北调工程供用水管理条例》解读之四[J]. 水利发展研究,2014,14(3):5-6. (LI Yuanyuan. Strict water quality assurance to ensure the delivery of clean water to the north-interpretation of the “regulations on the management of water supply for the South-to-North Water Diversion Project”(4) [J]. Water Resources Development Research,2014,14(3):5-6. (in Chinese))

[4] 方国华,赵文萃,李鑫,等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护,2023,39(4):1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui,LI Xin,et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu section of eastern route project of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):1-8. (in Chinese))

[5] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):14-19. (ZHANG Yiya,YUAN Fei,ZHANG Limin,et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower

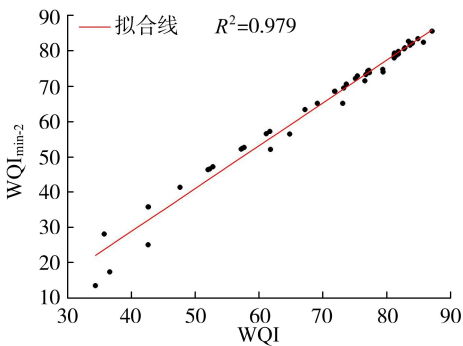


图 6 WQI_{min-2} 验证结果
Fig. 6 Verification results of WQI_{min-2}

reaches of the Hanjiang River before and after middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2022,42(3):14-19. (in Chinese))

[6] 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))

[7] QU Xiao, CHEN Yushun, LIU Han, et al. A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North Water Diversion Project[J]. *Water Research*,2020,185:116275.

[8] GUO Chuanbo,CHEN Yushun,XIA Wentong,et al. Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's South-to-North Water Diversion Project[J]. *Science of the Total Environment*,2020,711:134543.

[9] 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))

[10] ZHOU Yongqiang,CHEN Lili,ZHOU Lei,et al. Key factors driving dissolved organic matter composition and bioavailability in lakes situated along the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project, China[J]. *Water Research*,2023,233:119782.

[11] QI Jiahui,YANG Liyuan,LIU Enfeng. A holistic framework of water quality evaluation using water quality index (WQI) in the Yihe River (China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2022,29(53):80937-80951.

[12] 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. (in Chinese))

[13] 钱睿智,陈静,王永东. 基于氮同位素的通扬运河污染负荷解析[J]. *水资源保护*,2021,37(4):121-126. (QIAN Ruizhi, CHEN Jing,WANG Yongdong. Analysis of pollution load of Tongyang Canal based on nitrogen isotope[J]. *Water Resources Protection*,2021,37(4):121-126. (in Chinese))

[14] 邢子康,余钟波,衣鹏,等. 基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源[J]. *环境科学*,2021,42(12):5796-5803. (XING Zikang,YU Zhongbo,YI Peng,et al. Analysis of nitrate pollution sources under different rainfall conditions based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values[J]. *Environmental Science*,2021,42(12):5796-5803. (in Chinese))

[15] PAN Ye,YUAN Yuan,SUN Ting,et al. Are the water quality improvement measures of China's South-to-North Water Diversion Project effective? a case study of Xuzhou section in the east route[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2020,17(17):6388.

[16] 姜明岑,王业耀,姚志鹏,等. 地表水环境质量综合评价方法研究与应用进展[J]. *中国环境监测*,2016,32(4):1-6. (JIANG Mingcen,WANG Yeyao,YAO Zhipeng,et al. Research and application advances in methods of surface water quality assessment[J]. *Environmental Monitoring in China*,2016,32(4):1-6. (in Chinese))

[17] 钱小娟. 长江下游南水北调东线源头区排污与长久水安全研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[18] 刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,等. 国外地表水水质指数评价法综述[J]. *水资源保护*,2016,32(1):86-90. (LIU Linghua,WU Leixiang,WU Jiapeng,et al. Review on surface water quality index assessment method in foreign countries[J]. *Water Resources Protection*,2016,32(1):86-90. (in Chinese))

[19] 刘彦龙,郑易安. 黄河干流水质评价与时空变化分析[J]. *环境科学*,2022,43(3):1332-1345. (LIU Yanlong,ZHENG Yian. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River basin[J]. *Environmental Science*,2022,43(3):1332-1345. (in Chinese))

[20] SANG Chong, TAN Lu, CAI Qinghua, et al. Long-term (2003-2021) evolution trend of water quality in the Three Gorges Reservoir:an evaluation based on an enhanced water quality index[J]. *Science of the Total Environment*,2024,915:169819.

[21] 李永春,张越,丁伟,等. 石嘴山典型入黄排水沟水质时空变化特征及驱动因素[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(6):79-85. (LI Yongchun, ZHANG Yue, DING Wei, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of water quality in Shizuishan section of typical drainage ditches flowing into the Yellow River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2024,44(6):79-85. (in Chinese))

[22] 唐琦,刘兵,王璞,等. 改进 WQI 在川中丘陵地区典型流域水质评价中的应用:以琼江流域上游段为例[J]. *环境工程技术*

学报,2022,12(2):615-623. (TANG Qi,LIU Bing,WANG Pu,et al. Application of improved WQI model in water quality assessment of typical watershed in the hilly area of central Sichuan province:a case study in the upper reaches of Qiongzhang River basin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(2):615-623. (in Chinese))

[23] WU Zhaoshi,WANG Xiaolong,CHEN Yuwei,et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China[J]. Science of the Total Environment,2018,612:914-922.

[24] PESCE S F,WUNDERLIN D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (Argentina) on Suquia River [J]. Water Research,2000,34(11):2915-2926.

[25] 刘佳玥,姜翠玲,耿慧. 2010—2020 年太湖无锡水域水质时空变化及原因分析[J]. 水电能源科学,2023,41(7):49-53. (LIU Jiayue,JIANG Cuiling,GENG Hui. Water quality spatiotemporal variation and cause analysis of Wuxi water area of Taihu Lake from 2010 to 2020[J]. Water Resources and Power,2023,41(7):49-53. (in Chinese))

[26] 陶佳辉,卞锦宇,敖天其,等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J]. 水资源保护,2023,39(1):133-141. (TAO Jiahui,BIAN Jinyu,AO Tianqi,et al. Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of east route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):133-141. (in Chinese))

[27] 郝永飞,金光球,唐洪武,等. 淮河干流典型污染物时空分布特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):291-299. (HAO Yongfei,JIN Guangqiu,TANG Hongwu,et al. Spatial and temporal distribution analysis of typical contaminants in mainstream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(4):291-299. (in Chinese))

[28] 林涛,尹静,张博,等. 改进综合水质标识指数法在珠江口水系水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2022,38(4):166-173. (LIN Tao,YIN Jing,ZHANG Bo,et al. Application of improved comprehensive water quality identification index method in water quality evaluation of the Pearl River estuary[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):166-173. (in Chinese))

[29] 张赛亚,张珂,晁丽君,等. 考虑地形与理化性质的土壤关键水力特性多种模型构建与比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):42-50. (ZHANG Saiya,ZHANG Ke,CHAO Lijun,et al. Development and comparison of multiple models for estimating key soil hydraulic properties considering terrain and soil physiochemical properties[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):42-50. (in Chinese))

[30] 王鹏,董国庆,阴祖荣,等. 面向复杂情景的 SWMM 水质参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):31-37. (WANG Peng,DONG Guoqing,YIN Zurong,et al. Sensitivity analysis of water quality parameters in SWMM for complex scenarios[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):31-37. (in Chinese))

[31] 饶贵康,王玲玲,徐津,等. 调水期风场对淮入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):31-37. (RAO Guikang,WANG Lingling,XU Jin,et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):31-37. (in Chinese))

[32] MA Ruowei,SHIH K. Perfluorochemicals in wastewater treatment plants and sediments in Hong Kong [J]. Environmental Pollution,2010,158(5):1354-1362.

[33] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):42-49. (ZHANG Ting,GAO Ya,LI Jianzhu,et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):42-49. (in Chinese))

[34] 储小东. 环鄱阳湖城市群区域地下水环境演化与分区防控研究[D]. 南昌:南昌大学,2022.

[35] 嵇晓燕,杨凯,陈亚男,等. 基于 ARIMA 和 Prophet 的水质预测集成学习模型[J]. 水资源保护,2022,38(6):111-115. (JI Xiaoyan,YANG Kai,CHEN Ya'nan,et al. An ensemble learning model for water quality forecast based on ARIMA and Prophet [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):111-115. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-12 编辑:刘晓艳)