

◆特邀栏目◆

淮水北调工程输水干流水质的时空变化^{*}滕 姣¹, 郭志阳¹, 陈 盛², 谭 茜¹

(1. 安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司, 安徽合肥 230088; 2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽合肥 230088)

摘要: 为了解淮水北调工程水源及调水干流水质变化, 基于 2011—2019 年淮水北调工程沿线 4 个监测断面的逐月监测数据, 采用单因子污染指数法、水质综合污染指数(WQI)法、主成分分析法、Daniel 趋势检验法及 Ward 聚类分析法分析各断面水质时空变化特征。结果表明: ①蚌埠闸中监测断面连续 9 年的 5 项监测指标均能达到地表水Ⅲ类标准, 何巷闸下监测断面化学需氧量(COD_{Cr}) 在 2011 年、2012 年、2016 年及 2019 年超地表水Ⅲ类标准; 整体来看, 宿州闸上、四铺闸上监测断面近九年的 COD_{Cr}、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N) 及总磷(TP) 随时间呈下降趋势, 溶解氧(DO) 随时间呈升高趋势; 汛期 DO、NH₃-N 下降, 其余指标在汛期均升高; ②4 个监测断面的 WQI 整体平均值为 59.40, 表明水质属于“良”等级; WQI 值以 2014 年为拐点先降后增; 汛期 WQI 值变小, 水质变差; 主成分分析及 Spearman 相关性分析结果表明 COD_{Cr}、COD_{Mn}、TP 是影响水质的关键污染指标; ③Daniel 趋势检验表明, 监测断面 WQI 值均呈上升趋势, 表明 9 年来监测断面水质有变好的趋势。监测断面空间上表现为水质从南到北逐渐变差, 而水质污染以入河支流沟渠输入和人类活动带来的污染为主。因此, 应进一步加强污染防治工作, 确保淮水北调工程输水水质安全。

关键词: 淮水北调工程; 水质评价; 水质综合污染指数法; 主成分分析; Daniel 趋势检验法

中图分类号: TV62, TV882.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2025)01-0182-10

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20250521.019

随着我国经济飞速发展, 人口迅速增长, 水资源时空分配不均及人均占有量减少等问题日益严重^[1], 制约着区域经济发展。跨流域调水是指通过向缺水地区引水, 满足受水地区工农业及生产生活用水, 使水资源合理调配, 进而促进区域经济发展^[2]。截至 2018 年, 全球已建成跨流域调水工程逾 350 项^[3], 如

俄罗斯莫斯科运河、美国加利福尼亚州中央河谷工程等。中国调水工程遍及 17 个省 60 个市^[4], 其中比较有名的有南水北调工程、引江济淮工程等。调水工程在优化流域水资源分配格局、提高受水区供水能力的同时, 会对水源流域下游水资源开发利用、水质保护、生态质量及航运产生不利影响^[5], 而且调水工程距离

收稿日期: 2024-03-26

修回日期: 2024-04-25

^{*} 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017X07603-005), 引江济淮工程(安徽段)输水沿线水源保护区划分、重大突发性水污染事件预警系统和水源保护规划等课题研究项目(YJJH-ZT-ZX-20230706545)资助。

【第一作者简介】

滕 姣(1995—), 女, 助理工程师, 主要从事水环境治理和水生态修复研究, E-mail: tengjiao1021@126.com。

【引用本文】

滕姣, 郭志阳, 陈盛, 等. 淮水北调工程输水干流水质的时空变化[J]. 广西科学, 2025, 32(1): 182-191.

TENG J, GUO Z Y, CHEN S, et al. Spatial and Temporal Variations of Water Quality in the Trunk Stream of the Huaihe Water Transfer North Project [J]. Guangxi Sciences, 2025, 32(1): 182-191.

长,涉及流域范围广、人口多,其水质必然暴露在众多污染之下,威胁着支流及受水城市的供水安全。为保护调水沿线生态环境及社会经济,对调水工程干流开展科学合理的水质评价十分必要。

水质评价指通过数理方法对水环境系统进行定性、定量的分析评价^[6],是科学地开展水环境治理、水资源开发利用的基础^[7-8]。水质评价的方法有很多种,应用较为广泛的有水质综合污染指数(WQI)法^[6,9]、主成分分析法^[7,10]、神经网络法^[4]等。不同的分析评价方法都有其优缺点:WQI法能够定性定量地描述水质但其权重分配存在主观性,无法表征污染物间的非线性响应关系;主成分分析法能够合理地评价因子赋值,但存在信息损失风险;神经网络法具有强大的线性建模能力和高精度的预测能力,但需依靠大量数据训练。显然,评价方法都有其优势和不足,评价结果也会有差异。为了更全面地掌握水质状况,研究人员选择使用多种方法来综合分析评价水质^[11]。如徐若诗等^[6]采用WQI法及Mann-Kendall趋势检验法评价南水北调东线江苏段水质,认为溶解氧(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)是影响该地区水质变化的主要指标,非汛期水质优于汛期;刘瑞艳等^[12]使用主成分分析法及Daniel趋势检验法对南水北调东线洪泽湖水质进行评价,认为总磷(TP)和总氮(TN)是该区域水质的主要污染因子,水质随时间变化有改善趋势;夏凡等^[13]使用单因子评价法、WQI法、主成分分析法对丹江口水库入库河流进行水质评价,结果发现3种评价方法筛出的主要污染因子大致相同,为TN、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、BOD₅、NH₃-N和TP。然而,目前国内水质评价大多集中在长江流域^[9,14]、湖库^[7,13]以及南水北调沿线^[6,15-16]等,尚未见对淮水北调工程采用多种分析方法进行评价的报道。

淮水北调工程是国家南水北调东线配水工程和引江济淮工程的延伸,是集工业用水、灌溉补水和减少地下水开采、生态环境保护功效于一体的战略性工程^[17]。淮水北调工程以淮北市、宿州市为主要供水对象,其调水线路从淮河到萧县岱山口闸,全长268.0 km^[18],其水质必然暴露在众多污染风险中^[19]。输水线路的水质对保障城市用水安全至关重要,因此本研究基于2011—2019年淮水北调水源淮河及输水干线监测断面的水质数据,采用单因子污染指数法、WQI法、主成分分析法对淮水北调水源淮河

及输水干线水质进行评价,并结合Daniel趋势检验法及Ward聚类分析法探究各监测断面水污染的主要影响因子,从而掌握各监测断面的水质状况及时空变化情况,探究水质变化的原因,为科学合理地制定调水规划、确保调水工程水质安全提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

淮水北调工程涉及蚌埠市、宿州市和淮北市,位于安徽淮北地区的东部,东毗江苏,北靠河南,地处黄淮海平原南端。区域地势较为平坦,地面坡降1/5000—1/10000,高程一般为15—40 m,总体上西北高、东南低。工程地处亚热带和暖温带过渡地带,属暖温带季风气候区。多年平均降雨量为770—950 mm,自南向北递减,降雨年际差达3—4倍;降雨年内分配极不均衡,6—9月的降雨量平均占全年的60%—70%^[20]。多年平均水面蒸发量为1300—1500 mm,多年平均气温为14—15℃,多年平均无霜期为206 d。工程位于淮河干流北岸,境内河流均属淮河流域,地表水系较为发育。淮水北调工程输水线路总长268.0 km,其中从淮河至淮北市黄桥闸上输水干线长度为227.0 km,包括淮河至香涧湖引淮线路长106.0 km、蚌埠至宿州市输水线路长75.4 km、宿州至淮北市输水线路长45.6 km;从黄桥闸上至萧县岱山口闸输水支线长41 km^[17-18,20]。

1.2 数据来源

监测数据由淮水北调工程沿线水质监测站提供,使用淮河蚌埠闸中水质监测站(S1)、怀洪新河何巷闸下水质监测站(S2)、新汴河宿州闸上水质监测站(S3)、沱河四铺闸上水质监测站(S4)的水质监测数据(监测断面位置如图1所示),监测时间为2011年1月至2019年12月,频率为每月1次,每月月初在水下0.5 m处采集水样。数据涵盖了常规的地表水水质评价指标:化学需氧量(COD_{Cr})、DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TP等5项。水质指标分析参考以下标准:《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)、《水质 溶解氧的测定 电化学探头法》(HJ 506—2009)、《水质 高锰酸盐指数的测定》(GB 11892—89)、《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)、《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)。

问题选择指标与数据;②标准化指标,从而消除不同指标间的量纲影响;③确定主成分个数;④根据主成分提取原则提取主成分^[13]。

1.3.5 Ward 聚类分析

Ward 聚类分析法又称为离差平方和法,适用于多指标分类识别。该方法以欧氏距离为标准,将 n 个样本归为一类。类别合并时,选择使离差平方和 S 增大最小的两类合并,直至所有样品归为一类为止^[23]。

1.3.6 Daniel 趋势检验法

Daniel 趋势检验法是环境污染变化趋势分析最常用的方法。该方法使用 Spearman 秩相关系数,用于单因素小样本的检验,其计算公式^[24]为

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}, \quad (3)$$

$$d_i = x_i - y_i, \quad (4)$$

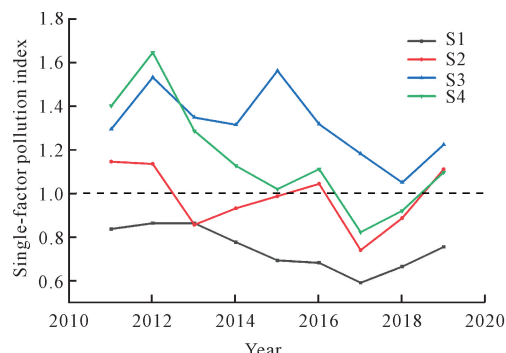
式中, r_s 为秩相关系数, d_i 为变量 x_i 和 y_i 的差值, x_i 为污染物按浓度值从小到大排列的序号, y_i 为污染物按时间排列的序号, n 代表数据连续年份。将秩相关系数 r_s 的绝对值同 Spearman 秩相关系数统计表中的临界值 W_p 进行比较,若 $|r_s| \geq W_p$, 表明污染物浓度的变化趋势有显著意义;若 $r_s > 0$, 则表明污染物浓度的变化呈上升趋势,反之为下降趋势^[24]。本研究采用 9 年的污染物年均浓度监测值,因此 $n =$

9,取置信度为 0.95, $W_p = 0.60$ 。

2 结果与分析

2.1 基于单因子污染指数法的水质时空变化情况

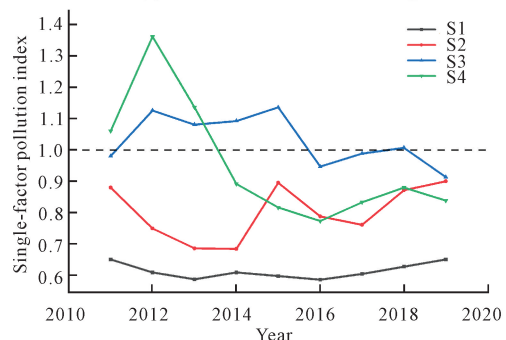
单因子污染指数法评价结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,2011—2019 年, S1 断面 COD_{Cr} 均达到地表水Ⅲ类水质标准, S3 断面 COD_{Cr} 均超标; 4 个监测断面的 COD_{Cr} 均随时间呈“W”型变化,即先下降后上升再下降再上升,但整体呈下降趋势。DO 是反映水体自净能力的指标, DO 越高水质越好。从图 2(b)可知,除 S4 断面外,其余监测断面 DO 均满足地表水Ⅲ类水质要求,且以 2014 年为拐点先下降后升高,整体随时间变化呈上升趋势。 COD_{Mn} 在 S1、S2 断面均满足地表水Ⅲ类水质要求且变化较为平稳,呈缓慢上升趋势,但 S3、S4 断面 COD_{Mn} 整体呈下降趋势[图 2(c)]。如图 2(d)所示,除 2011 年、2012 年 S3 断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 不满足地表水Ⅲ类水质标准,其余监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均达标且呈下降趋势。TP 在 S1、S2 断面均满足地表水Ⅲ类水质标准,在 S3、S4 断面随时间先升后降,整体呈下降趋势[图 2(e)]。水质指标的年内变化情况如图 2(f)所示,其中 DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在汛期(6—9 月)的值低于其他月份, COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、TP 在汛期的值高于其他月份, COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、TP 的浓度在 8 月达到最高后开始下降。 COD_{Cr} 在 5 月、汛期、10—12 月都不满足地表水Ⅲ类水质标准。



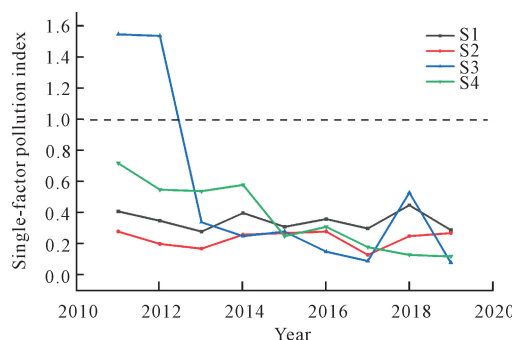
(a) Interannual variation of COD_{Cr}



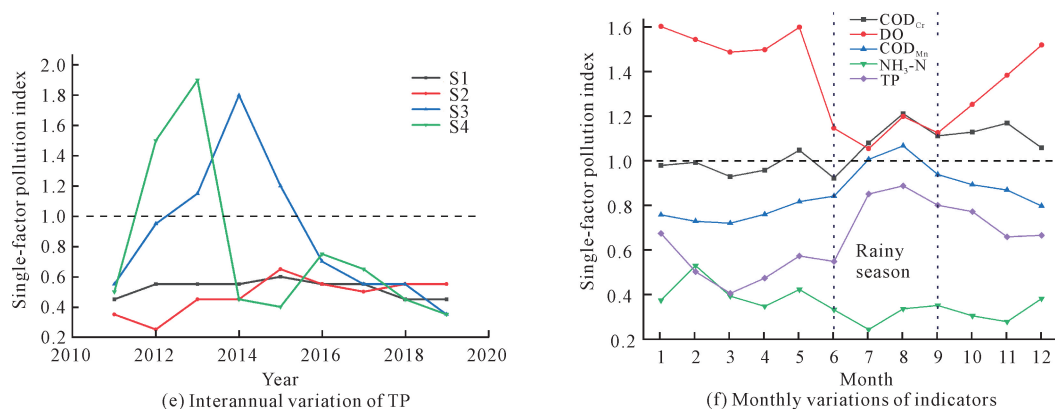
(b) Interannual variation of DO



(c) Interannual variation of COD_{Mn}



(d) Interannual variation of $\text{NH}_3\text{-N}$



The dotted line indicates that the ratio of pollutant concentration to the surface water category III standard is 1.0.

图 2 单因子污染指数法评价结果

Fig. 2 Evaluation results of single-factor pollution index

2.2 基于 WQI 值的监测断面总体水质情况

如图 3 所示, 4 个监测断面的 WQI 值为 19.29—77.14, 平均值为 59.40。根据 WQI 值对水质进行分级, 淮水北调工程干流主要水质类别等级为“优”“好”“良”“中”“差”的分别占总体的 0%、52.5%、44.5%、2.5%、0.5%, 以“好”和“良”等级为主; 整体平均值为 59.40, 属于“良”等级。2011—2014 年, WQI 年均值呈逐年下降趋势, 2014 年后呈波动上升趋势, 表明水质在 2014 年后整体变好。

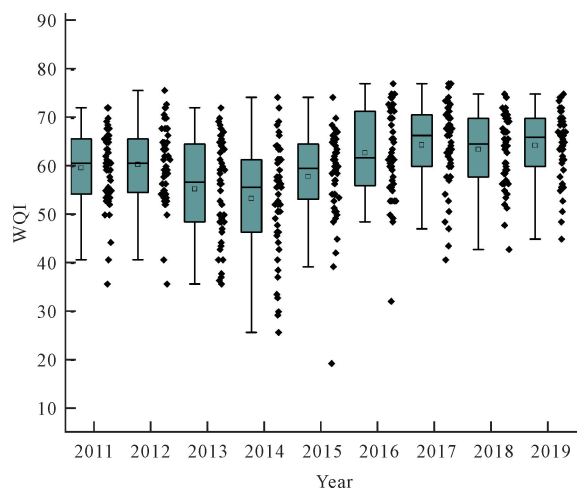


图 3 WQI 值箱图

Fig. 3 Box diagram of WQI

为直观地展示 WQI 值空间变化, 绘制 4 个监测断面的 WQI 值逐年变化热图[图 4(a)]和逐月变化热图[图 4(b)]。如图 4(a)所示, 整体来看, S1、S2 断面的 WQI 值均高于 S3 断面, S4 断面最低。从地理位置来看, S1 断面是最南部的蚌埠闸中, S4 断面是最北部的四铺闸下, 结合前述结果可知调水沿线由南到北水质逐渐变差。另外, 由图 4(b)可知 4 个监测断面的 WQI 值在汛期时较全年其他月份低, 说明汛

期水质下降。

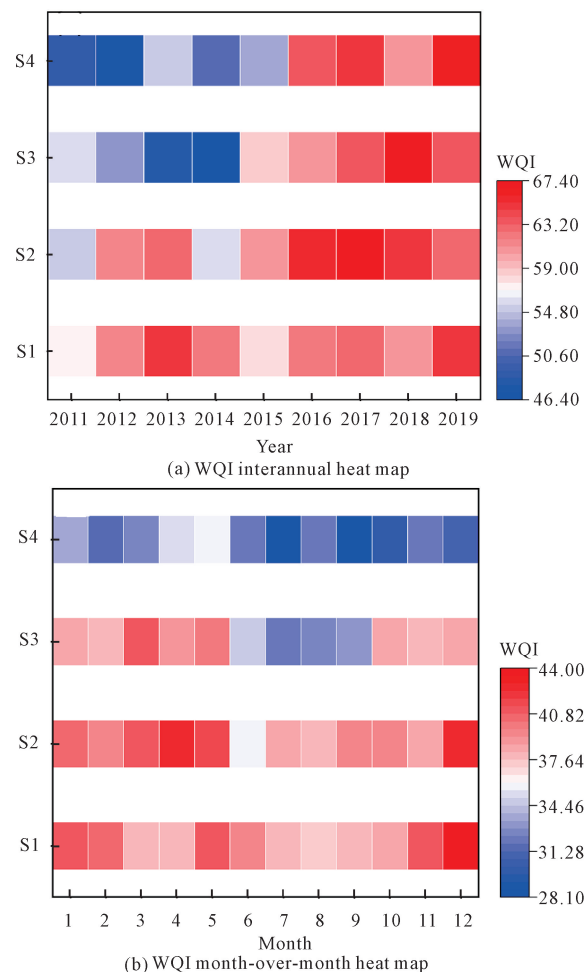


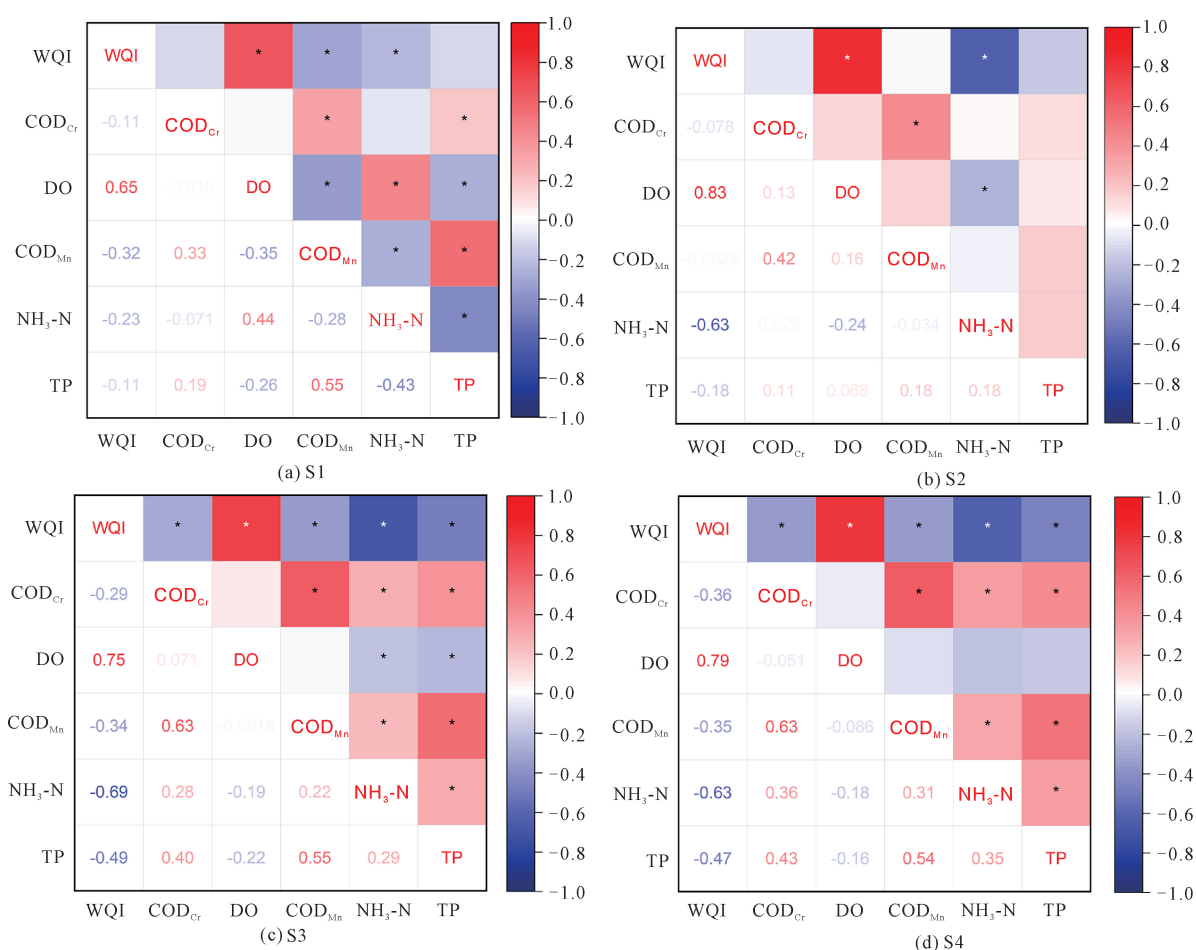
图 4 监测断面 WQI 值时间变化热图

Fig. 4 Heat map of the temporal variations of WQI in four monitoring sections

分别对监测断面 WQI 值与水质指标进行 Spearman 相关性分析, 结果如图 5 所示。4 个监测断面的 WQI 值均与 DO 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

S1 断面的 WQI 值与 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著负相关 [$P < 0.05$, 图 5(a)], S2 断面的 WQI 值与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著负相关 [$P < 0.05$, 图 5(b)], S3 断面及 S4 断面的 WQI 值均与 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 呈显著

负相关 [$P < 0.05$, 图 5(c)、(d)]。此外, S1、S3、S4 断面的 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 与 TP 有显著正相关关系 ($P < 0.05$)。



Red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation, and the darker the color, the stronger the correlation; $* P < 0.05$.

图5 水质指标及 WQI 的 Spearman 相关性分析

Fig. 5 Spearman correlation analysis of water indicators and WQI

2.3 污染物主成分分析及 Ward 聚类分析

淮水北调工程 4 个监测断面水质的主成分分析结果如图 6 所示。根据特征值大于 1.0 的原则,提取出 3 个主成分,其累计方差贡献率为 78.5%,能够充分反映原数据信息。第一主成分 PC1 的方差贡献率为 40.1%,与之关联的指标有 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、TP;第三主成分 PC3 贡献率为 18.3%,与之关联的指标为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。 COD_{Cr} 和 COD_{Mn} 是水体有机物耗氧指标,能表征水体有机物污染程度;TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 能够反

映水体富营养化程度^[6],因此,PC1、PC3 是以污水为主的有机耗氧型污染和以农业面源为主的磷污染,这些污染物的来源和迁移模式相似。第二主成分 PC2 的方差贡献率为 20.1%,与之关联的指标是 DO。

淮水北调监测断面 Ward 聚类分析结果如图 7 所示,水质在时间尺度上可分为三大类:第一类包括 1、2、3、4、5 月,第二类包括 6、10、11、12 月,第三类包括 7、8、9 月,时间聚类结果与汛期整体吻合,进一步表明汛期会影响水质。

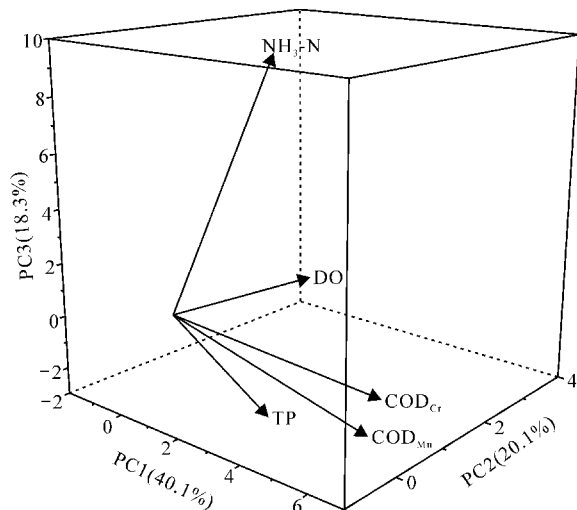


图 6 主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis

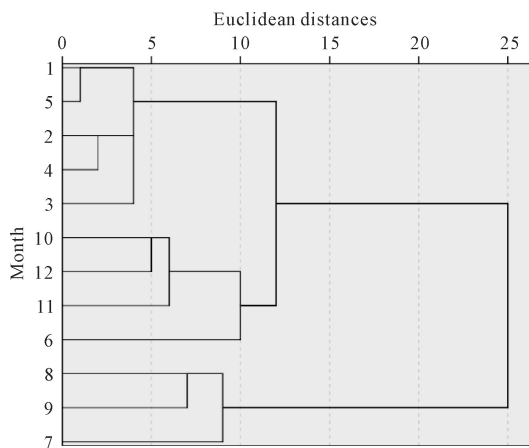


图 7 时间聚类分析

Fig. 7 Time cluster analysis

2.4 基于 Daniel 趋势检验法的水质指标变化情况

由表 2 可得, 淮水北调 4 个断面 WQI 值均呈上升趋势, 表明 4 个监测断面水质均有好转, 与图 3 的结果一致。5 项监测指标变化趋势不尽相同: S1 断面 COD_{Mn} 呈上升趋势, 但变化不显著, COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著下降趋势, DO 、 TP 呈下降趋势, 但变化不显著; S2 断面 DO 、 TP 呈显著上升趋势, COD_{Mn} 呈上升趋势, COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈下降趋势, 但后三者变化不显著; S3 断面 5 项指标均呈下降趋势, 但只有 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 具有显著性变化; S4 断面 COD_{Cr} 、 DO 呈显著上升趋势, $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈显著下降趋势, COD_{Mn} 、 TP 呈下降趋势但变化并不显著。

表 2 4 个监测断面指标变化趋势

Table 2 Trends of indicators of the four monitoring sections

监测断面 Monitoring section	指标 Indicator	秩相关系数 r_s	趋势 Trend	显著性 Significance
S1	COD_{Cr}	-0.77	↓	S
	DO	-0.07	↓	N
	COD_{Mn}	0.12	↑	N
	$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.62	↓	S
	TP	-0.25	↓	N
	WQI	0.43	↑	N
S2	COD_{Cr}	-0.38	↓	N
	DO	0.87	↑	S
	COD_{Mn}	0.42	↑	N
	$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.17	↓	N
	TP	0.78	↑	S
	WQI	0.62	↑	S
S3	COD_{Cr}	-0.83	↓	S
	DO	-0.07	↓	N
	COD_{Mn}	-0.65	↓	S
	$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.93	↓	S
	TP	-0.50	↓	N
	WQI	0.82	↑	S
S4	COD_{Cr}	0.73	↑	S
	DO	0.73	↑	S
	COD_{Mn}	-0.43	↓	N
	$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.73	↓	S
	TP	-0.50	↓	N
	WQI	0.88	↑	S

Note: $n=9$, $W_p=0.60$; “↑” represents an upward trend and “↓” represents a downward trend; “S” represents significant correlation and “N” represents no significant correlation.

3 讨论

3.1 监测断面水质时间变化

COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 是表征水体有机物污染程度的指标^[19]。从年际变化看, 单因子污染指数评价法中, S3、S4 断面的 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 均整体呈下降趋势。S1 断面的 COD_{Cr} 及 COD_{Mn} 在 2011—2019 年均达到地表水Ⅲ类标准, 其余监测断面不同年份存在超标情况: S2 断面 COD_{Cr} 在监测时段内有 4 年超标, COD_{Mn} 达标; S3 断面 COD_{Cr} 在监测时段的 9 年内均超标, COD_{Mn} 有 5 年超标; S4 断面 COD_{Cr} 在监测时段内只有 2017 年、2018 年达标, 而 COD_{Mn} 从 2014

年开始达标。上述结果表明,蚌埠闸中所在的淮河有机物污染程度较轻,宿州闸上的新汴河有机物污染较重。

$\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 是反映水质及水生生物营养物质的重要指标。2011—2019 年, S1、S2、S4 断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均达到地表水Ⅲ类水质标准, S3 断面在 2013 年后达标; 2011—2019 年, S1 及 S2 断面的 TP 均达标, S3 断面在 2016 年后达标, S4 断面在 2014 年后达标。DO 是表征水体自净能力的参数, DO 越高, 水质越好。本研究中, DO 年际变化均呈现先降后升的趋势; S2、S3、S4 断面均在 2014 年达到最低, 而 S1 断面在 2011 年最低。以上结果表明 2014 年后, 水体自净能力逐渐增强。这与水质的 WQI 值变化趋势相符: 4 个监测断面的 WQI 值的 Daniel 趋势均上升, 表明水质逐年变好。

总体来看, 淮水北调监测断面水质由劣变好的转折点在 2014 年, 这与王友华等^[25]研究渤海湾 2006—2020 年水质变化趋势相符, 而李增斌^[26]对洋河水库水质分析的结果则不太一致: 2016 年之前洋河水质达标率总体下降, 2016 年后洋河水质达标率整体上升。近年来, 河湖水质均呈现由劣变好的趋势, 可能因为一是近年来有关部门采取有力措施^[27], 加强污染企业的环境监督检查, 大力减少工厂、养殖场的废水排放, 重点城市开展了大规模的污水厂关闭处理工程, 江河水的质量有所提高^[28-29], 据统计, 我国污水排放量在 1997—2011 年持续高速上升, 在 2012 年之后逐年稳定下降^[30]; 二是近年来社会整体环境意识提高, 违法排污的行为大为减少; 三是政府颁布了水环境治理相关政策法规, 如 2015 年国务院印发《水污染防治行动计划》^[31], 2016 年中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于全面推行河长制的意见》^[32], 随着政策法规的实行, 各地水质总体呈好转趋势^[6]。

从年内变化看, COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 在全年变化表现为 1—5 月缓慢上升, 6—9 月快速上升且均在 8 月达到最大, 9 月开始下降。上述结果与 WQI 值的年内变化趋势一致: 4 个监测断面 WQI 值均在汛期达到最低。TP 在汛期升高, 表明汛期营养盐污染较全年其他时期重, 水质比全年其他时期差, Ward 聚类分析也表明这一点。这可能与淮水北调工程处于亚热带和暖温带过渡带, 属于暖温带季风气候区, 地区降水量年内变化很大有关^[33]。汛期(6—9 月)降水占全年降水的 60%—70%, 地表径流带着大量生活面源污染物、泥沙颗粒及农业面源污染物汇入河流^[34], 导

致水中氧气消耗, 在降低 DO 的同时增加了 TP。此外, 汛期温度较高, 高温促使微生物及浮游植物大量繁殖、蒸发量变大^[35], 造成水体富营养化, 水质 WQI 值下降。

3.2 水质空间变化

在空间上, S1 断面水质较好, 由南向北输水线路监测断面水质逐渐变差, 此结果与丁瑞勇^[36]及孙树林^[37]的研究结果一致。这可能是因为监测断面所处地区年平均降水量自南向北递减, 较北的断面汇水面积小导致河流水量少^[38], 水资源缺乏导致水体流动性整体较小、自净能力差, 不利于污染物的迁移及降解^[6]。Spearman 相关性分析表明不同监测断面水质 WQI 值受到不同监测指标的影响: S1 断面水质主要受 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 影响; S2 断面水质主要受 $\text{NH}_3\text{-N}$ 影响; S3、S4 断面受 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 等指标影响。S4 断面水质最差, 这可能是输水干线渠道流经人口密集的宿州市, 受农业面源污染、农村生活面源污染和附近的工厂、养殖场废水随降雨进入河流的影响^[2]。

4 结论

本研究中针对淮水北调工程水源及主干渠的 3 个监测断面 2011—2019 年逐月的水质监测数据, 采用单因子污染指数法、WQI 法、主成分分析法、Ward 聚类分析及 Daniel 趋势检验法分析水质污染指标、水质的时空变化情况, 得出以下结论:

①研究区域 2011—2019 年水质整体得以改善。以 2014 年为拐点, 水质呈现先变差后向好的趋势; 监测指标年内变化表现为非汛期水质优于汛期水质。

②研究区域水质 WQI 值评价等级以“好”和“良”为主, 整体平均值为 59.40, 水质状况为良; 主成分分析及 Spearman 相关性分析结果表明, 影响水质的主要监测指标为 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 和 TP。

③监测断面空间上表现为水质从南到北逐渐变差, 蚌埠闸中水质 9 年来优于其他断面, 四铺闸上水质劣于其他断面, 需加强入河污染治理。

参考文献

- [1] 桂耀, 肖昌虎, 侯丽娜. 跨流域引调水工程规划方案优选研究: 以滇中引水工程为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 63-66.
- [2] 武仪辰, 徐征和, 马吉刚, 等. 引黄济青调水工程水质评价[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(1): 7-16.
- [3] 王光谦, 欧阳琪, 张远东, 等. 世界调水工程[M]. 北京:

- 科学出版社, 2009.
- [4] YU M, WANG C R, LIU Y, et al. Sustainability of mega water diversion projects: experience and lessons from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 721-731.
- [5] 许凤冉, 阮本清, 张春玲, 等. 跨流域调水生态补偿研究进展与关键技术[J]. *水利经济*, 2022, 40(4): 34-40, 92-93.
- [6] 徐若诗, 逢勇, 罗缙, 等. 基于 WQI 的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J]. *环境科学*, 2024, 45(9): 5227-5234.
- [7] 陈艺菁, 张代青, 程乖梅, 等. 4 种综合法在云南九大高原湖泊水质评价中的应用与比较[J]. *水力发电*, 2022, 48(10): 13-18.
- [8] 时文博, 曹春燕, 宋颖, 等. 基于多元统计分析的黄河山东段水质评价研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(2): 48-53.
- [9] 王飞宇, 李肖杨, 贾军伟, 等. 基于不同综合水质评价方法的长江流域水质时空差异性对比分析[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(10): 74-84.
- [10] 周铭浩, 李彤, 林学明, 等. 北江干流及主要支流水质及其时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 111-120, 127.
- [11] 孙彦, 杨侃, 刘建林, 等. 基于 TOPSIS 和变权模糊的再生水水质评价模型[J]. *人民黄河*, 2018, 40(8): 57-61.
- [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.
- [13] 夏凡, 胡圣, 龚治娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究: 以丹江口水库入库河流为例[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 11-15, 24.
- [14] 习文祥, 祝贤彬, 潘红忠, 等. 三峡水库水质时空变化特征及影响机制研究[J]. *人民长江*, 2024, 55(2): 41-50.
- [15] 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.
- [16] 徐斌, 杨蓉, 孙春媛, 等. 南水北调中线北京段水量水质特征及对受水城市河湖的影响分析[J]. *水文*, 2023, 43(5): 101-107.
- [17] 管佳佳. 模糊综合评价法在淮水北调工程水环境评价中的应用[J]. *江淮水利科技*, 2014(3): 16-17, 28.
- [18] 程琨. 安徽省淮水北调工程淮北市蓄调水工程研究[J]. *江淮水利科技*, 2015(4): 19-20, 22.
- [19] 祁峰, 王琳, 孙艺珂. 关键控制因子识别法筛查引黄济青干渠水质安全风险[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 347-352.
- [20] 安徽省淮水北调工程水土保持监测总结报告[Z/OL]. [2024-03-07]. <https://max.book118.com/html/2018/1226/8122003076001141.shtm>.
- [21] 周添红, 苏思霖, 马凯, 等. 典型区域土地利用/景观格局对黄河上游水体 TN 的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 5768-5776.
- [22] 赵爽, 倪兆奎, 黄冬凌, 等. 基于 WQI 法的鄱阳湖水质演变趋势及驱动因素研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 179-187.
- [23] 熊勇峰, 周刚, 徐宪根, 等. 常州市河流水质评价及污染特征分析[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(3): 123-128.
- [24] 牛姗姗. 2005—2010 年渭河主要支流水质变化趋势[J]. *人民黄河*, 2014, 36(10): 89-91.
- [25] 王友华, 秦华伟, 王秋莲, 等. 2006—2020 年渤海湾水质变化趋势分析和富营养化状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(5): 693-703.
- [26] 李增斌. 洋河水库水质变化趋势分析[J]. *水科学与工程*, 2023(2): 34-36.
- [27] 胡龙刚, 郭嘉伟, 吴宇鑫, 等. 陕西省城镇污水处理厂尾水时空排放特性分析[J]. *人民黄河*, 2023, 45(S1): 78-79.
- [28] 李慧明, 候林丽, 徐鹏. 不同水质指数法在峡江水库水质评价中的应用[J]. *人民长江*, 2020, 51(S2): 32-36, 87.
- [29] 秦海东, 纪宁, 李凤银. 基于组合模型的水资源利用效率聚类分析[J]. *水资源开发与管理*, 2023, 9(7): 12-15, 19.
- [30] 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 等. 近年全国地表水水质变化特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4419-4429.
- [31] 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[EB/OL]. (2015-04-16)[2024-03-20]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676575.shtm.
- [32] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于全面推行河长制的意见》[EB/OL]. (2016-12-11)[2024-03-20]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/201912/t20191225_751541.shtml.
- [33] 吴琛. 基于 CMIP6 模式的淮河中上游流域极端气候变化评估及成因分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [34] 饶永才, 袁媛, 孙挺, 等. 京杭运河(徐州段)水质评价及污染源分析[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2021, 60(5): 596-606.
- [35] 陈金月, 陈水森, 付尧, 等. 广东省水质现状及驱动因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(19): 7921-7931.
- [36] 丁瑞勇. 安徽省淮水北调工程水质保护初探[J]. *江淮水利科技*, 2016(1): 24-25.
- [37] 孙树林. 基于绿色发展视域的淮水北调工程研究[J]. *治淮*, 2021(7): 70-71.
- [38] 李宏明. 淮河蚌埠段水质现状评价及水环境容量的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.

Spatial and Temporal Variations of Water Quality in the Trunk Stream of the Huaihe Water Transfer North Project

TENG Jiao¹, GUO Zhiyang¹, CHEN Sheng², TAN Qian¹

(1. Anhui Survey and Design Institute of Water Resource and Hydropower Co., LTD., Hefei, Anhui, 230088, China; 2. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-huaihe Water Diversion, Hefei, Anhui, 230088, China)

Abstract: The aim of this study is to understand the water sources of the Huaihe Water Transfer North Project and the water quality changes in the trunk stream of the water diversion. Based on monthly monitoring data from 2011 to 2019 for the four monitoring sections of the Huaihe Water Transfer North Project, spatial and temporal variation characteristics of water quality at each section were analyzed based on the single-factor pollution index, Water Quality Index (WQI), principal component analysis, Daniel's trend test and Ward cluster analysis. The results were yielded as follows: ① The five monitoring indicators in the monitoring section of Bengbu sluice in the nine consecutive years reached the surface water class III standard, and the Chemical Oxygen Demand (COD_{Cr}) in the monitoring section of Hexiang sluice exceeded the surface water class III standard in 2011, 2012, 2016, and 2019. On the whole, the monitoring sections of Suzhou sluice and Sipu sluice in the nine years showed a decreasing trend in COD_{Cr} , potassium permanganate index (COD_{Mn}), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and Total Phosphorus (TP), and an increasing trend in Dissolved Oxygen (DO) over time. DO and $\text{NH}_3\text{-N}$ decreased during the flood season, and the rest indicators increased during the flood season. ② The overall average value of WQI of the four monitoring sections was 59.40, indicating that the water quality is good. The WQI value first decreased and then increased with 2014 as the inflection point. During the flood season, the WQI value became smaller and the water quality became poorer. The principal component analysis and Spearman correlation analysis showed that COD_{Cr} , COD_{Mn} , and TP were the key pollution indicators affecting the water quality. ③ Daniel's trend test showed that the WQI values of the monitoring sections showed an increasing trend, indicating that the water quality of the monitored sections improved over the nine years. Spatially, the water quality of the monitoring sections gradually deteriorated from south to north. Water quality pollution was dominated by input from tributary ditches and human activities. Pollution prevention and control work should be further strengthened to ensure the safety of water quality of the water transfer project.

Key words: Huaihe Water Transfer North Project; water quality assessment; comprehensive pollution index of water quality assessment; principal component analysis; Daniel's trend test