

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

张怡雅,袁 飞,张利敏,谢子琪

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:收集 2013—2020 年汉江中下游区 11 个典型断面水环境数据,采用单因子指数法、综合污染指数法以及水污染指数法,分析了南水北调中线工程调水前后 11 个断面水质指标的变化特征及其成因。结果表明:调水后汉江中下游区 11 个典型断面的月尺度污染指数呈不同程度的增大,其中罗汉闸和新沟闸污染较为严重;各断面的水质超标次数均增加,水体污染程度加重;TN 是汉江中下游各监测断面的主要污染物;TP、COD_{Mn}和 NH₃-N 水质污染自中游至下游沿程呈加重趋势,下游新沟闸断面污染最为严重。除受调水影响之外,汉江中下游水质变化还受到水利枢纽、点源和非点源污染等因素的综合影响。

关键词:南水北调中线工程;调水;汉江中下游;水质

中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0014-06

Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project//ZHANG Yiya,YUAN Fei,ZHANG Limin,XIE Ziqi(College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract: The water quality data were collected at 11 typical sections in the middle and lower reaches of the Hanjiang River from 2013 to 2020. The single-factor index method, comprehensive pollution index method, and the water pollution index method were used to analyze the variation characteristics and causes of water quality indices at the 11 sections before and after water diversion. The results show that after water diversion, the monthly pollution indices of the 11 typical sections in the middle and lower reaches of the Hanjiang River increased in variant degrees, and the Luohanzha and Xingouzha sections were in the most severe water pollution. The frequency of water quality exceeding standards increased at all sections, with a deteriorated water pollution situation. TN was the dominant pollutant at each monitoring section in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. Water pollution related to TP, COD_{Mn} and NH₃-N tended to deteriorate from the middle to the lower reaches. Water pollution at the Xingouzha section was the most severe. In addition to the influence of water diversion, water quality variation was also affected by other factors such as the operation of water conservancy projects, point and non-point source pollution.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Diversion Project; water diversion; middle and lower reaches of the Hanjiang River; water quality; water pollution index method

南水北调中线工程的正式运行有效缓解了我国北方地区水资源短缺问题,但可能恶化汉江中下游区的水环境质量^[1]。调水后丹江口水库下泄总水量减少,水体自净能力和水环境容量降低,可能加重水质污染。汉江中下游自 1992 年第一次暴发水华至今已发生 10 多次水华现象^[2-4]。近年来国内学者针对汉江中下游区的水质开展了评价,目前水质评价方法主要包括污染指数法、模糊数学评价法、主成分分析法、人工神经网络等^[5-8]。马京久等^[9]采用

Spearman 秩相关系数分析了汉江中下游 2001—2014 年 5 个监测断面 5 项主要水质指标的变化趋势,发现汉江中下游水质总体呈好转趋势,但石臼断面水质呈变差趋势。谢平等^[10]采用单项指标法计算了调水前后汉江中下游区丰、平、枯水期的水质超标率,发现南水北调中线工程运行可能导致汉江中下游的水质明显恶化,且对枯水期的水质影响最为显著。肖婵等^[11]基于断面水质序列,推算了调水后断面水质并评价其水质类别,发现调水工程明显影响汉

江中下游水质,且对枯水期水质影响较为显著。高永年等^[12]构建了南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价指标体系,发现调水工程会对汉江中下游区生态环境产生明显的负面影响。窦明等^[13]从生态环境角度出发,重点评价了南水北调中线工程对汉江中下游水环境容量的影响,发现调水后汉江中下游水环境容量降低,水体自净能力也随之降低。张胜等^[14]采用综合污染指数法和综合营养状态指数法评价了汉江中下游丰、枯水期水质,发现汉江中下游大多数断面丰水期污染程度大于枯水期。

目前多数相关研究主要基于南水北调东线工程调水前的水质数据,采用数值模拟与统计学相结合的方法预测调水后汉江中下游区的水质情势,较少通过对比调水前后的实测水质数据来评价南水北调东线工程调水前后汉江中下游区的水环境变化特征,且目前关于调水后汉江中下游区水质的研究较少。本文收集了南水北调中线工程调水前后(2013—2020年)汉江中下游11个监测断面长时间序列水质数据,采用单因子指数法、综合污染指数法以及水污染指数法,综合分析调水前后汉江中下游区水质变化特征及其成因,为汉江水资源合理开发利用和水资源保护提供参考。

1 研究区域概况

汉江发源于陕西秦岭南麓,全长1 570 km,干流流经陕西、湖北,为长江最大的支流,流域面积15.9万 km²,年径流量为577亿 m³。本文选取汉江中下游干流河道为研究区。随着汉江流域经济社会的发展,汉江中下游水体有机污染不断加重,水环境水生态压力加大,枯季暴发了多次水华事件^[15-16]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

研究数据主要来源于:①中国环境监测总站提供的汉江中下游干流11个水质监测断面2013年1月至2019年1月的COD_{Mn}和NH₃-N月序列数据。11个监测断面为沈湾、白家湾、余家湖、转斗、皇庄、罗汉闸、岳口、石剅、小河、宗关(图1),均属于国控断面,具有一定的代表性;②中国环境监测总站提供的汉江中下游干流9个水质监测断面(石剅和宗关断面缺测)2019年1月1日0时至2020年7月26日7时COD_{Mn}、NH₃-N、TP和TN数据,该数据观测间隔时间为4 h;③汉江中下游区黄家港、皇庄、仙桃水文站1987—2019年的日流量数据以及2011—2019年《湖北省水资源公报》中汉江中下游沿线各地市的入河排污量数据。

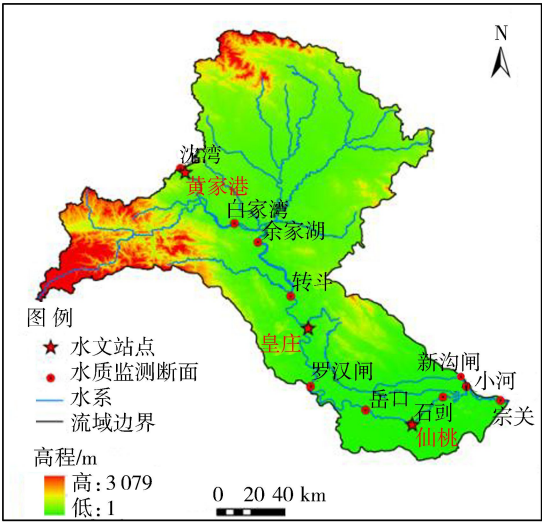


图1 汉江中下游干流河道水质监测断面和水文站点

2.2 研究方法

采用单因子指数法、综合污染指数法以及水污染指数法分析调水前(2013年1月至2014年12月)和调水后(2015年1月至2019年1月)汉江中下游典型断面水质指标的变化特征。其中单因子指数法^[16]针对特定水质评价因子进行评价,识别其水质类别,但侧重评价单一指标的影响;综合污染指数法^[17]综合考虑了多种水质评价因子的影响,并划分出不同的水质等级;水污染指数法^[18]在以上2种方法的基础上,进一步识别水体主要污染指标,剖析调水前后水质指标的变化特征。3种方法定性和定量评价相结合,综合评价南水北调中线工程对汉江中下游区水质的影响。

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法是一种简单的环境质量指数计算方法。该方法根据水体各评价因子的监测结果对照该项目的分类标准,确定其水质类别,对各水质因子进行单独评价。单因子指数法对影响水环境质量的监测指标实行“一票否决”,其计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{C_{oi}} \tag{1}$$

式中: P_i 为第*i*项水质指标的单因子污染指数; C_i 为第*i*项水质指标的实测值; C_{oi} 为第*i*项水质指标的标准值。

2.2.2 综合污染指数法

综合污染指数法是在单因子污染指数的基础上对水质状况进行分级评价,综合考虑了多种水质评价因子的影响,克服了单因子指数法的局限性,使评价结果更为全面。本文采用均值综合污染指数:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{2}$$

式中: P 为综合污染指数; P_i 为第*i*项水质指标的单

因子污染指数; n 为水质指标总数。表 1 为均值综合污染指数水质分级标准^[19]。

表 1 均值综合污染指数水质分级标准			
综合污染指数	水质分级	综合污染指数	水质分级
$P \leq 0.20$	水质好	$0.70 < P \leq 1.00$	中度污染
$0.20 < P \leq 0.40$	水质较好	$1.00 < P \leq 2.00$	重度污染
$0.40 < P \leq 0.70$	轻度污染	$P > 2.00$	严重污染

2.2.3 水污染指数法

水污染指数法基于各项水质指标分别计算水污染指数 I ,并选取各断面水质指标水污染指数的最大值作为该断面的 I 值。

对于 I ~ V 类水质, I 采用下式计算:

$$I_i = I_{iL} + \frac{I_{iU} - I_{iL}}{C_{iU} - C_{iL}}(C_i - C_{iL}) \tag{3}$$

式中: I_i 为第 i 项水质指标的水污染指数; C_i 、 C_{iL} 、 C_{iU} 分别为第 i 项水质指标的监测浓度值、水质项目所在类别标准下限浓度值和上限浓度值; I_{iL} 、 I_{iU} 分别为第 i 项水质指标所在水质类别标准的下限浓度值和上限浓度值对应的 I 值。

超过 V 类水质时, I 采用下式计算:

$$I_i = 100 + \frac{40(C_i - C_{i5})}{C_{i5}} \tag{4}$$

式中 C_{i5} 为第 i 项水质指标中 V 类标准浓度上限值。

将各断面水污染指数计算结果与 GB3838—2002《地表水环境质量标准》(I、II、III、IV、V 和劣 V 类水质对应的 I 值分别为: ≤ 20 、 $(20,40]$ 、 $(40,60]$ 、 $(60,80]$ 、 $(80,100]$ 和 >100) 对比,判别该断面的水质类别,并依据水污染指数计算结果对水体主要污染指标进行识别。针对水质为 I ~ III 类的断面,不筛选主要污染指标;针对劣于 III 类的断面,取水污染指数最大值对应的指标作为该断面的主要污染指标。

采用超标率 η ^[20] 分析汉江中下游关键断面水质的变化情势:

$$\eta = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{5}$$

式中: m 为断面水质劣于目标水质的样本数; M 为研究时段水质数据的样本数。根据湖北省地表水水质月报选用的水质达标的评价标准,选取地表水环境质量 III 类标准为目标水质。

3 结果与分析

3.1 基于月尺度的污染物指数评价

3.1.1 单因子指数法评价结果

采用单因子法评价了 2013 年 1 月至 2019 年 1 月期间调水前后汉江中下游 11 个监测断面的 COD_{Mn} 和 NH_3-N 污染情况(图 2)。调水后除宗关以

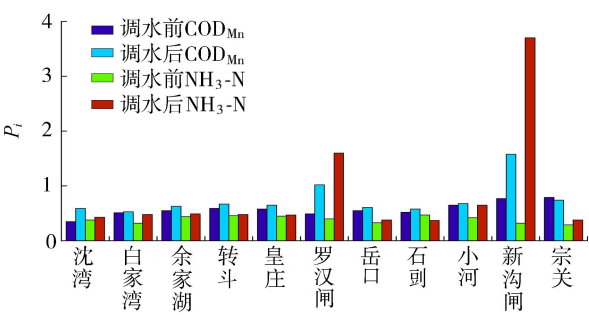


图 2 调水前后汉江中下游各断面单因子污染指数

外 10 个断面的 COD_{Mn} 单因子污染指数和除石剅以外 10 个断面的 NH_3-N 单因子污染指数均较调水前呈不同程度的增大,其中罗汉闸、新沟闸的 COD_{Mn} 和 NH_3-N 的单因子污染指数均大于 1,水质污染最为严重。罗汉闸位于竹皮河下游,为荆州市主要纳污河流,目前已丧失水资源利用价值,水质劣于 V 类;新沟闸紧邻东荆河^[21],调水后河流水量减少,气温持续升高,加之沿江城镇排放的工业、生活废水富含氮、磷等营养物,使水质富营养化,导致小环藻暴发,水质受到了污染。

3.1.2 综合污染指数法评价结果

基于调水前后汉江中下游 11 个监测断面各监测指标的单因子污染指数,计算其均值综合污染指数,对比分析调水后综合污染指数的变化情势,对水质状况进行分级评价。如图 3 所示,汉江中下游 11 个断面的综合污染指数在调水前为 0.37 ~ 0.55,调水后为 0.50 ~ 2.64,其中轻度污染断面占 81.8%,重度污染和严重污染断面各占 9.1%,整体上各断面(除石剅)综合污染指数高于调水前,其中新沟闸综合污染指数为 2.64,较调水前增大 2.09,属于严重污染断面;罗汉闸综合污染指数为 1.31,较调水前增大 0.86,属于重度污染断面。由此可见,调水后汉江中下游水质污染加重。

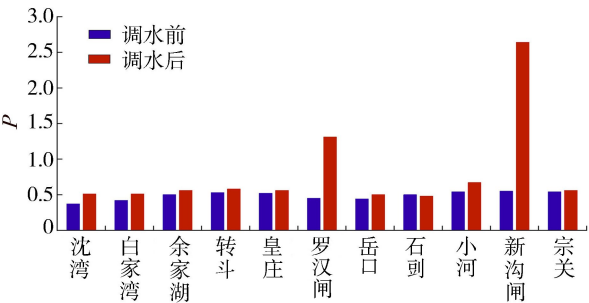


图 3 调水前后汉江中下游各断面综合污染指数

3.1.3 水污染指数法评价结果

图 4 为调水前后汉江中下游 11 个监测断面水污染指数的变化情况。由图 4 可知:调水前除新沟闸和宗关断面水质为 III 类以外,其他断面水污染指数均维持在 20 ~ 40,水质为 II 类;调水后,沈湾、白

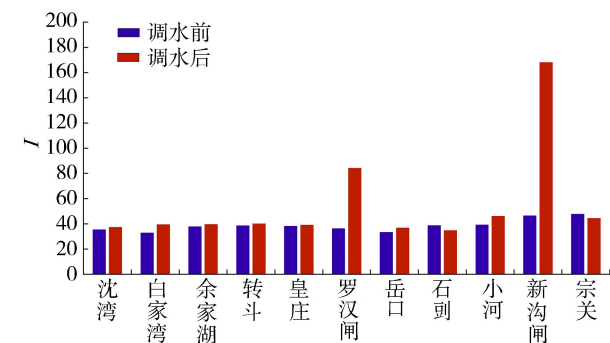


图4 调水前后汉江中下游各断面水污染指数

家湾、余家湖、转斗、皇庄、岳口和石剑断面水污染指数维持在20~40,水质为Ⅱ类;小河和宗关断面水污染指数值维持在40~60,水质为Ⅲ类;罗汉闸和新沟闸属于污染严重断面,其水污染指数值分别为84和168,水质类别分别为Ⅳ类和劣Ⅴ类。根据水污染指数计算结果识别水体主要污染指标,发现罗汉闸和新沟闸的主要污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$,其主要来源于农产区的化肥等面源污染物以及城市生活污水任意排放^[21]。

依据水污染指数计算各水质类别断面的占比如图5所示。由图5可知:调水前各断面以Ⅰ类和Ⅱ类水质为主,新沟闸和宗关为Ⅲ类水质,表明调水前汉江中下游水环境质量总体较优;调水后,Ⅲ类水质新增了罗汉闸和小河断面,新沟闸出现Ⅳ、Ⅴ和劣Ⅴ类水质,表明南水北调中线工程对汉江中下游水质产生了一定影响。除了受调水工程影响外,水质恶化还可能受沿岸城镇、工厂等污水排放的影响^[22]。

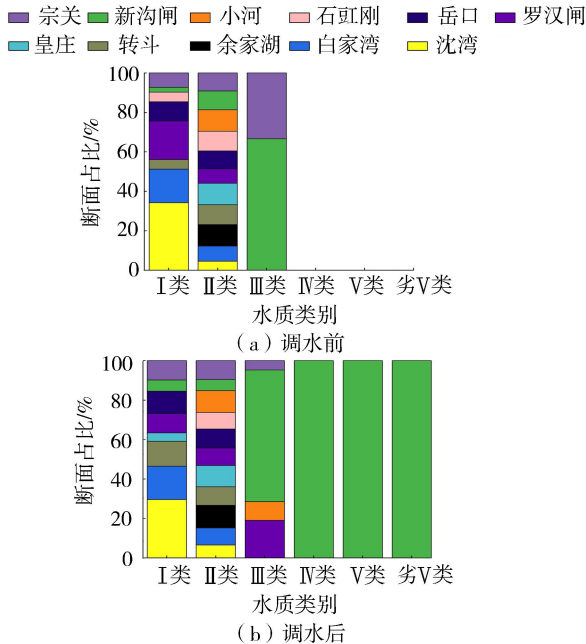


图5 调水前后汉江中下游各水质类别断面占比

3.2 关键断面2019—2020年水质状况分析

由于中国环境监测总站仅发布了2019年以来汉江中下游典型断面短时间尺度(4 h)的水质数据,

为剖析汉江中下游2019—2020年短时间尺度的水质情势,本文统计了2019年1月1日0时至2020年7月26日7时汉江中下游9个监测断面 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP等水质指标的超标次数及超标率(表2),发现:TN是汉江中下游各监测断面的主要污染物,超标率在65.5%~99.95%之间,自中游至下游水质污染未呈现明显的增大或减小趋势,其中余家湖和岳口断面污染最为严重,超标率均在99%以上; COD_{Mn} 污染严重程度次之,TP的超标率最低;TP、 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 自中游到下游沿途水质污染呈上升趋势,下游新沟闸断面污染最为严重。据此建议汉江中下游区应实施严格的TN排放控制。

表2 汉江中下游区各断面水质超标率及超标次数

断面	超标次数				超标率/%			
	TN	TP	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$
沈湾	1802	0	13	0	92.8	0	0.7	0
白家湾	1698	0	15	0	78.4	0	0.7	0
余家湖	1993	0	4	0	99.4	0	0.2	0
转斗	1679	8	92	11	86.9	0.4	4.8	0.6
皇庄	1997	6	1	1	86.8	0.3	0.1	0.1
罗汉闸	1485	0	7	0	78.2	0	0.4	0
岳口	1950	0	3	27	100	0	0.2	1.4
小河	1619	1	0	0	89.7	0.1	0	0
新沟闸	522	32	100	160	65.5	4.0	12.7	23.5

图6为2019年1月至2020年6月间 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP在各月的超标率。由图6可知:TN为汉江中下游区各时间段的主要污染物,其中2019年11月至2020年4月污染情况最为严重,平均超标率均在95%以上; COD_{Mn} 的污染程度次之,其污染时段较为分散; $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染较为严重时段主要集中在2019年1月、3月和4月,平均超标率在60%以上;TP污染程度较低,除2019年3月外其余月份超标率均在5%以下。

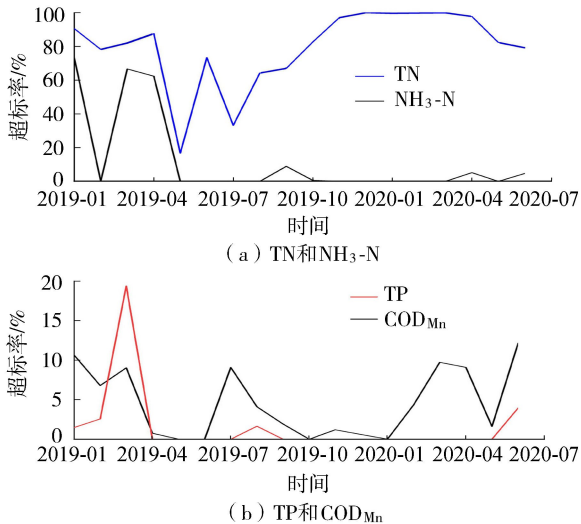


图6 汉江中下游 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP超标率

3.3 水质变化原因分析

a. 水利枢纽的影响。南水北调中线工程调水后,丹江口水库下泄总水量减少,汉江中下游水体输送污染物的能力降低,水资源承载力减弱,水环境质量趋于恶化。根据 2011—2019 年黄家港、皇庄和仙桃站流量资料,绘制年平均流量过程线(图 7),发现黄家港、皇庄、仙桃站年均流量年际变化波动较大,调水后总体呈下降趋势,其均值由调水前的 1178.1 m³/s、971.6 m³/s 和 982.4 m³/s 分别降为 1 058.9 m³/s、770.6 m³/s 和 957.6 m³/s。此外,流域内已建成王甫洲、崔家营和兴隆梯级水利枢纽^[15]。受水库群调蓄作用影响,汉江中下游多年平均下泄流量减少,污染物的扩散和分解能力降低,再加上水流速度的减小,导致水环境容量减小,污染物浓度增大。

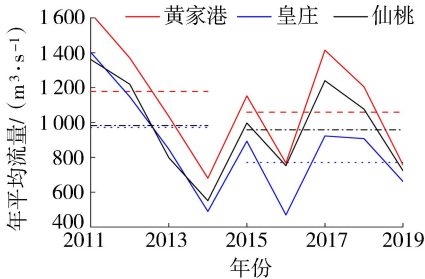


图 7 汉江中下游区典型水文站年平均流量过程线

b. 汉江中下游干流入河排污量的影响。汉江中下游干流流经襄阳、十堰等 7 个主要城市,其中襄阳、荆门和孝感市污染源分布密集。表 3 为 2011—2019 年湖北省汉江中下游涉及行政区的入河排污量,可以看出:调水后,汉江中下游流经的多数城市入河排污量均高于调水前,其均值由调水前的 115 903 万 t/a 增加到 129 588 万 t/a,且主要集中在襄阳、荆门和孝感市,其中襄阳市入河排污量最多,且 2013—2018 年逐年增加,天门市入河排污量较少。

表 3 2011—2019 年湖北省有关城市入河排污量

年份	单位:万 t/a							
	襄阳市	十堰市	荆门市	仙桃市	天门市	潜江市	孝感市	总和
2011	32 445	16 001	21 384	9 551	6 945	8 474	22 178	116 978
2012	31 257	15 811	21 622	9 419	7 303	8 691	23 006	117 109
2013	30 026	15 748	19 692	8 524	6 826	8 047	22 100	110 963
2014	31 881	17 854	20 760	9 076	7 204	8 509	23 277	118 561
2015	34 906	20 299	22 756	10 774	8 504	9 004	26 111	132 354
2016	34 952	20 908	23 393	10 989	9 601	8 311	24 649	132 803
2017	35 333	20 369	22 460	10 327	7 746	8 969	23 640	128 844
2018	35 678	20 438	21 650	9 776	7 780	8 970	23 473	127 765
2019	35 162	19 843	21 562	9 891	7 748	8 546	23 423	126 175

4 结 语

2014 年南水北调中线工程调水后,汉江中下游区 11 个典型断面的月尺度污染指数均有不同程度的增大,水体污染程度加重;TN 是汉江中下游各监

测断面的主要污染物,超标率在 65.5% ~ 99.95%,且 2019 年 11 月至 2020 年 4 月水质污染情况最为严重,平均超标率均在 95% 以上;TP、COD_{Mn} 和 NH₃-N 自中游到下游沿途水质污染呈上升趋势,下游新沟闸断面污染最为严重。

汉江中下游区水环境数据获取难度较大,可能存在统计样本代表性欠缺的问题。今后将持续收集水环境数据,延长资料序列长度,以提高样本的代表性。此外水质的变化还受到营养盐、点源和非点源污染等因素的影响,今后需综合考虑这些因素对汉江中下游区水质的影响作用。

汉江中下游干流河道水质除了受调水工程和水库群调度影响外,还受沿岸城镇、工厂等污水排放以及支流汇入的影响。为提升汉江中下游干流河道水环境质量,建议加强汉江中下游沿岸的减排控制措施,如优化汉江中下游排污口^[23],减少污染物排放量,以降低水质污染浓度。

参考文献:

[1] 吴瑕. 南水北调中线工程对汉江中下游水环境影响研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.

[2] 李建,尹炜,贾海燕,等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. 水生态学杂志,2020,41(5):136-144. (LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Research progress on diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River: review and advances [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5):136-144. (in Chinese))

[3] 李雨,王雪,周波,等. 中线调水前汉江中下游水量和水质本底特性及变化趋势分析[J]. 水文,2015,35(5):82-90. (LI Yu, WANG Xue, ZHOU Bo, et al. Characteristics and change trend of water quantity and quality in middle and lower reaches of Hanjiang River before South-to-North Water Diversion running [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(5):82-90. (in Chinese))

[4] 肖婵,谢平,唐涛,等. 南水北调中线工程对汉江中下游水质的影响[J]. 安全与环境学报,2009,9(1):82-84. (XIAO Chan, XIE Ping, TANG Tao, et al. Influence of the Mid-Route of South-to-North Water Transfer Project on the water quality of the mid-lower reach of Hanjiang River [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(1):82-84. (in Chinese))

[5] 杨旭,曾祥亮. 基于单因子评价法和污染指数法的郑州大学眉湖水水质评价[J]. 江苏科技信息,2014(5):51-53. (YANG Xu, ZENG Xiangliang. Meihu water quality assessment of Zhengzhou University based on single factor assessment and pollution index method [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2014(5):51-53. (in Chinese))

[6] ADRIANO A B, RITA T, WILLIAM J W. A water quality index applied to an international shared river basin: The

- case of the Douro River[J]. Environmental Management, 2006,38(6):910-920.
- [7] LI R R,ZOU Z H,AN Y. Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method[J]. Journal of Environmental Sciences,2016,50(12):87-92.
- [8] TAO X F,HUANG T,LI X F,et al. Application of a PCA based water quality classification method in water quality assessment in the Tongjiyan Irrigation Area,China[C] // 2016 5th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016). Shenzhen: ICEEP,2016.
- [9] 马京久,喻婷,陈燕飞,等. 基于综合水质标识指数法的汉江中下游水质评价[J]. 人民珠江,2020,41(9):63-69. (MA Jingjiu, YU Ting, CHEN Yanfei, et al. Water quality evaluation of the middle and lower reaches of Hanjiang River based on comprehensive water quality identification index[J]. Pearl River,2020,41(9):63-69. (in Chinese))
- [10] 谢平,肖婵,许斌. 南水北调中线工程对汉江中下游水环境的影响[C] // 湖北省水利学会. 实行最严格水资源管理制度高层论坛优秀论文集. 武汉:湖北省水利学会,2010:5.
- [11] 肖婵,谢平,唐涛,等. 南水北调中线工程对汉江中下游的水文情势影响分析[J]. 水文,2009,29(1):26-29. (XIAO Chan, XIE Ping, TANG Tao, et al. Influence of middle route of South-to-North Water Diversion Project on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. Journal of China Hydrology,2009,29(1):26-29. (in Chinese))
- [12] 高永年,高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J]. 地理科学进展,2010,29(1):59-64. (GAO Yongnian, GAO Junfeng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the middle-lower Hanjiang River Basin[J]. Progress in Geography,2010,29(1):59-64. (in Chinese))
- [13] 窦明,左其亭,胡彩虹. 南水北调工程的生态环境影响评价研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2005,26(2):63-66. (DOU Ming,ZUO Qqting,HU Caihong. Assessment of influence of Water Transfer Project from South to North on ecological environment [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2005, 26(2):63-66. (in Chinese))
- [14] 张胜,林莉,王珍,等. 汉江中下游丰枯水期水质时空变化特征[J]. 长江科学院报. 2021,38(8):47-53. (ZHANG Shen, LIN Lin, WANG Zhen, et al. Spatio-temporal variation of water quality in the middle-lower Hanjiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 2021,38(8):47-53. (in Chinese))
- [15] 曹圣洁,夏瑞,张远,等. 南水北调中线工程调水前后汉江下游水生态环境特征与响应规律识别[J]. 环境科学研究,2020,33(6):1431-1439. (CAO Shengjie, XIA Rui,ZHANG Yuan,et al. Characteristic and response of ecological environment in downstream of Hanjiang River before and after running of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(6):1431-1439(in Chinese))
- [16] 罗芳,伍国荣,王冲,等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. 环境与可持续发展,2016,41(5):87-89. (LUO Fang, WU Guorong, WANG Chong, et al. Application of Nemerow pollution index method and single factor evaluation method in water quality evaluation [J]. Environment and Sustainable Development,2016,41(5):87-89. (in Chinese))
- [17] 孙甲,韩品磊,王超,等. 南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(6):102-112. (SUN Jia,HAN Pinlei,WANG Chao,et al. Study on the comprehensive evaluation of water quality status of the middle route main channel of the South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(6):102-112. (in Chinese))
- [18] 刘玟,郑丙辉,付青,等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J]. 中国环境监测,2013,29(3):49-55. (LIU Yan,ZHEN Binghui,FU Qing,et al. Application of water pollution index in water quality assessment of rivers [J]. Environmental Monitoring in China,2013,29(3):49-55. (in Chinese))
- [19] 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(增刊2):32-36. (LI Huiming, HOU Linli, XU Peng. Application of various water quality index methods in water quality evaluation of Xiajiang Reservoir[J]. Yangtze River,2020,51(Sup2):32-36. (in Chinese))
- [20] 景朝霞,夏军,张翔,等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究,2019,32(1):104-115. (JING Chaoxia,XIA Jun,ZHANG Xiang,et al. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River[J]. Research of Environmental Sciences,2019,32(1):104-115. (in Chinese))
- [21] 白德新,肖文芳,陈立杰,等. 浅析南水北调工程对东荆河流域的影响[J]. 科技与企业,2014(5):127. (BAI Dexin,XIAO Wenfang, CHEN Lijie, et al. Influence of South to North Water Diversion Project on Dongjing River Basin[J]. Technology and enterprise,2014(5):127. (in Chinese))
- [22] 尧桂龙,周孝德. 汉江中下游水污染控制规划模型研究[J]. 水利水电科技进展,2003,23(4):18-19. (RAO Guilong,ZHOU Xiaode. Water pollution control planning model in the middle and lower Hanjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(4):18-19. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-18 编辑:郑孝宇)