

近二十年汉江中下干流主要污染物通量时空变化趋势分析

彭 恋^{1,2}, 周浩然^{1,2}, 李晓慧^{1,2}

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²长江水利委员会水文局科技人才创新团队, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年12月18日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年2月27日

摘要

为了探索丹江口水利枢纽大坝加高前后汉江中下游干流主要污染物通量变化趋势, 基于2004~2023年汉江中下游干流重要控制断面主要污染物及径流量监测数据, 分析各断面水质、径流量以及污染物通量逐年变化规律, 采用Spearman相关性分析法评估污染物通量与径流量相关性特征。结果表明: 2004~2023年汉江中下游干流沿程各断面主要污染物高锰酸盐指数、氨氮浓度年际变化均呈现总体下降趋势, 而总磷浓度年际变化不明显, 但各断面总磷浓度波动范围进一步减小, 水体质量更加趋于稳定; 与汉江下游干流断面相比, 汉江中游干流断面年径流量和主要污染物年通量特征值变化趋势一致性更高; 汉江中下游干流主要污染物指标中高锰酸盐指数和总磷通量与径流量呈极显著性相关, 氨氮通量与径流量呈显著性相关, 因汉江干流水体含沙量本底较低, 而丹江口水利枢纽坝体的拦截更进一步降低下游河道泥沙含量, 因此很大程度上削弱了输沙量对汉江中下游干流总磷输移的影响。研究成果可为汉江中下游可持续发展和水资源保护提供科学支撑。

关键词

汉江中下游干流, 丹江口水利枢纽, 污染物浓度, 通量, 相关性

Analysis on the Spatio-Temporal Changes of Main Pollutant Fluxes in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River in the Past Two Decades

Lian Peng^{1,2}, Haoran Zhou^{1,2}, Xiaohui Li^{1,2}

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Technology Talent Innovation Team, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

作者简介: 彭恋, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水环境监测与修复方面研究。Email: zypengl@cjh.com.cn

Received: Dec. 18th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

In order to explore the trend of pollutant flux changes in the middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after the dam elevation of the Danjiangkou Water Control Hub, based on the monitoring data of pollutants and runoff in important control sections from 2004 to 2023, the annual changes in water quality, runoff, and pollutant flux of each section were analyzed, and Spearman correlation analysis method was used to evaluate the correlation characteristics between pollutant flux and runoff. The results from 2004 to 2023, the annual variation of permanganate index and ammonia nitrogen concentration of major pollutants along the middle and lower reaches of the Hanjiang River showed an overall downward trend, while the annual variation of total phosphorus concentration was not significant. However, the fluctuation range of total phosphorus concentration in each section further decreased, and the water mass tended to be more stable. Compared with the cross-section of the lower reaches of the Hanjiang River, the annual runoff and pollutant annual flux characteristic values of the cross-section of the middle reaches of the Hanjiang River had higher consistency. The main pollutant indicators in the middle and lower reaches, including the permanganate index and total phosphorus flux, were significantly correlated with runoff, while the ammonia nitrogen flux was significantly correlated with runoff. The reason is that the cement and sand content in the Hanjiang River main stream is low, and the interception effect of the Danjiangkou Water Control Hub dam further leads to year-round water discharge, which greatly weakens the impact of sediment transport on the total phosphorus transport in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. The research results can provide scientific support for appropriate development and water resource protection in the middle and lower reaches of the Hanjiang River.

Keywords

The Middle and Lower Reaches of Hanjiang River, Danjiangkou Water Conservancy Hub, Concentration of Pollutants, Flux, Correlation

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汉江是长江最大支流，作为南水北调中线水源地及沿岸城市生活、工农业用水水源，在区域发展的整体格局中占有重要地位[1] [2]。汉江中下游流域是湖北省乃至全国的重要粮仓，是汉江生态经济带的重要组成部分，而汉江是区域内的重要水源地，同时也是最大的纳污水体[3] [4]。丹江口水利枢纽位于汉江中游干流，既是南水北调中线的水源工程，也是汉江流域开发与保护的重要工程，同时具备防洪、供水、发电与航运等综合效益[5] [6]。但随着水利枢纽的相继建成和运行，其对下游水文要素、水环境条件和水体形态势必会产生一定影响[7]-[10]。

丹江口水利枢纽分初期工程和大坝加高工程两期建设。初期工程于1958年9月动工建设，1973年底竣工，坝顶高程162 m (吴淞高程)，水库正常蓄水位157 m (吴淞高程)。大坝加高工程于2005年9月开工建设，2013年10月工程试验性蓄水，2014年12月正式向北方供水[11]-[13]。大坝加高后坝顶高程176.60 m (吴淞高程)，设计洪水位172.20 m (吴淞高程)，正常蓄水位170 m (吴淞高程)。2021年10月10日，丹江口水库首次蓄至正常蓄水位170 m。

水利枢纽坝体对下泄水体中泥沙及营养盐存在拦截效应[14]-[16], 本研究以汉江中下游干流为研究对象, 根据其重要控制断面2004~2023年近20年的水文与水质长序列同步监测数据, 全面分析丹江口水利枢纽大坝加高前后各断面水质、水量、输沙量和通量等方面时空变化特征以及主要污染物通量与径流量相关关系, 以期为汉江流域水环境保护决策提供科学依据, 为预防和治理水体富营养化提供参考。

2. 数据来源与分析方法

2.1. 研究范围

研究对象为汉江中下游干流丹江口坝下至武汉龙王庙河段, 全长652 km, 流域面积63,800 km², 研究时段为2004~2023年。综合考虑水文特征, 选择丹江口坝下、余家湖、皇庄、仙桃和汉口(集)共5个具有水质连续监测数据重要控制断面(见图1)开展高锰酸盐指数、氨氮以及总磷等主要污染物总体水平分析。其中, 丹江口坝下、余家湖、皇庄3个断面布设于汉江中游河段; 仙桃、汉口(集)2个断面布设于汉江下游河段。

选取丹江口坝下、余家湖、皇庄、仙桃共4个汉江中下游水量水质同步监测断面开展主要污染物通量时空变化分析, 其中, 丹江口坝下断面污染物通量代表了来自丹江口水库下泄的污染物量, 为上游控制断面; 皇庄断面位于崔家营水利枢纽和兴隆水利枢纽之间, 是汉江干流中游与下游的分界断面, 为中游控制断面; 仙桃断面为汉江下游重要的城市控制断面, 汉口(集)断面为汉江汇入长江的最后一个把口断面。

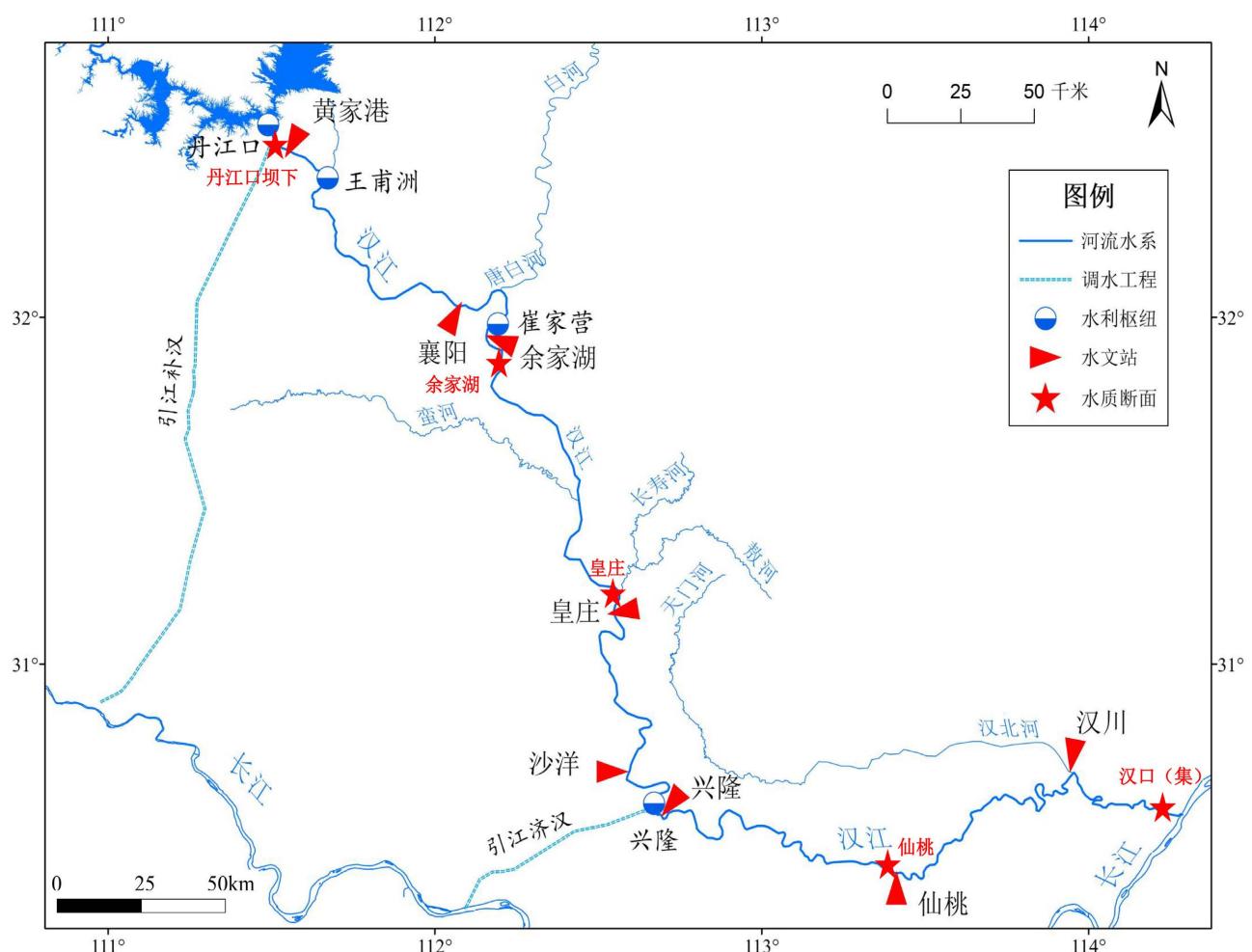


图1. 研究区域重要控制断面示意图

2.2. 数据来源

根据对汉江流域主要污染物分布及污染现状的分析, 本研究对汉江中下游干流主要污染物高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总磷(TP)进行水质和通量时空变化分析。本研究径流量及输沙量监测数据来源于2004~2023年水利部长江水利委员会编纂的《长江水文年鉴》和《长江泥沙公报》, 水质参数监测数据来源于水利部水资源质量分析评价平台, 选取与水文监测站点重合的水质监测站点。

2.3. 污染物通量计算方法

污染物通量是指在单位时间内水体中某一污染物通过特定断面的质量, 可以更加全面地表征流域水体的污染负荷[17][18]。当前国内外从方法和产生的误差方面等多个方面对河流污染物通量的计算开展了系统的总结和修正[19]~[21]。本研究所采用的通量计算公式如下:

$$F_{mi} = C_i \times Q_i \quad (1)$$

$$F_{ai} = \sum_{i=1}^{12} (C_i \times Q_i) \quad (2)$$

式中: F_{mi} 为河流断面月度通量(10^4 t), F_{ai} 为年度通量(10^4 t), C_i 为第 i 个月的污染物浓度值(mg/L); Q_i 为第 i 个月的月径流量(10^8 m^3)。

3. 汉江中下干流沿程主要污染物浓度总体变化特征

3.1. 高锰酸盐指数浓度总体变化特征

图2为2004~2023年汉江中下游干流沿程各断面高锰酸盐指数浓度年际变化。由图2可知, 汉江中下游干流各断面2004~2013年和2014~2023年2个时段高锰酸盐指数浓度总体均呈略微下降趋势。对比2004~2013年和

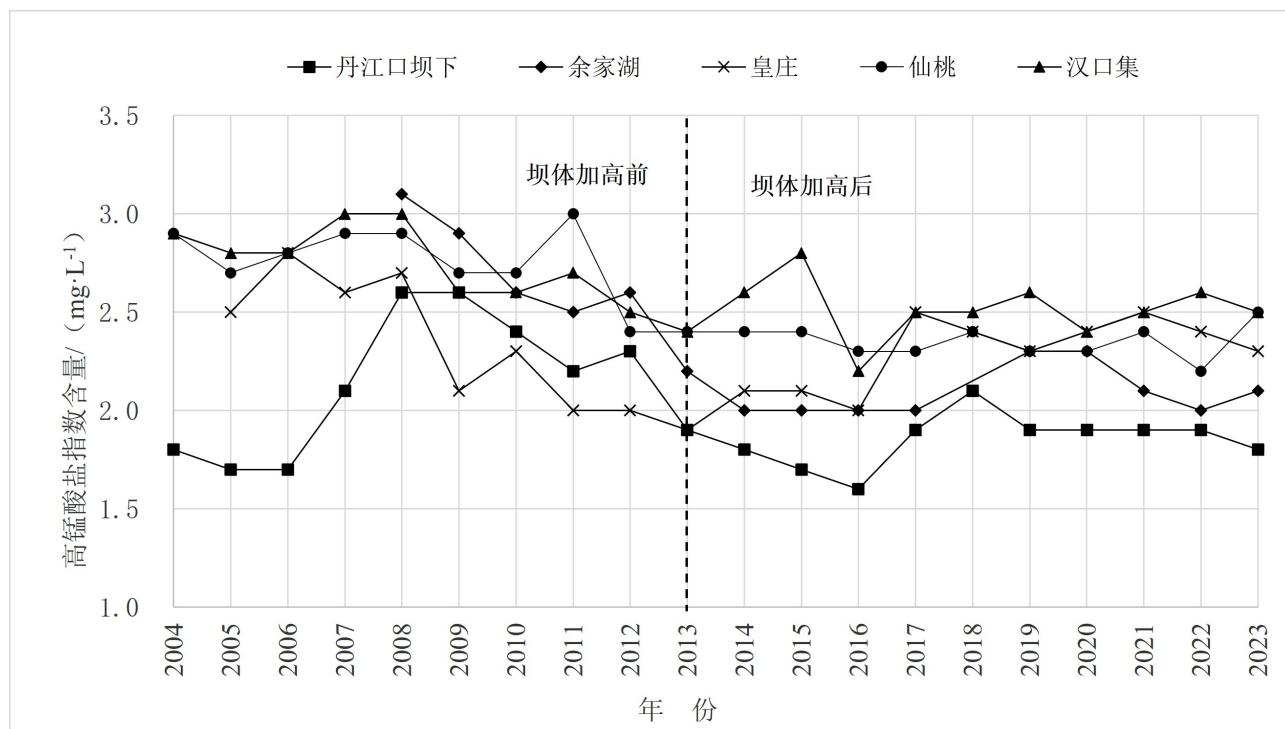


图2. 坝体加高前后汉江中下游干流高锰酸盐指数年际变化趋势

2014~2023年丹江口水利枢纽大坝加高工程前后监测成果可知：汉江干流中游代表断面丹江口坝下、余家湖、皇庄高锰酸盐指数浓度由1.7~3.1 mg/L降至1.6~2.6 mg/L，下降幅度为0.83%~21.13%；汉江干流下游代表断面仙桃和汉口(集)高锰酸盐指数浓度由2.4~3.0 mg/L降至2.2~2.8 mg/L，下降幅度为7.69%~14.23%。

3.2. 氨氮浓度总体变化特征

图3为2004~2023年汉江中下游干流各断面氨氮浓度年际变化。由图3可知，经过“十一五”和“十二五”期间水污染有效治理，汉江中下游干流各断面2004~2013、2014~2023年2个时段氨氮浓度总体均呈明显下降趋势，“十三五”以来普遍趋于稳定[20]。对比2004~2013年和2014~2023年丹江口水利枢纽大坝加高工程前后监测成果可知：汉江干流中游代表断面丹江口坝下、余家湖、皇庄氨氮浓度由0.121~0.310 mg/L降至0.024~0.274 mg/L，下降幅度为26.55%~53.57%；汉江干流下游代表断面仙桃和汉口(集)高锰酸盐指数浓度由0.087~0.112 mg/L降至0.061~0.089 mg/L，下降幅度为20.18%~30.22%。

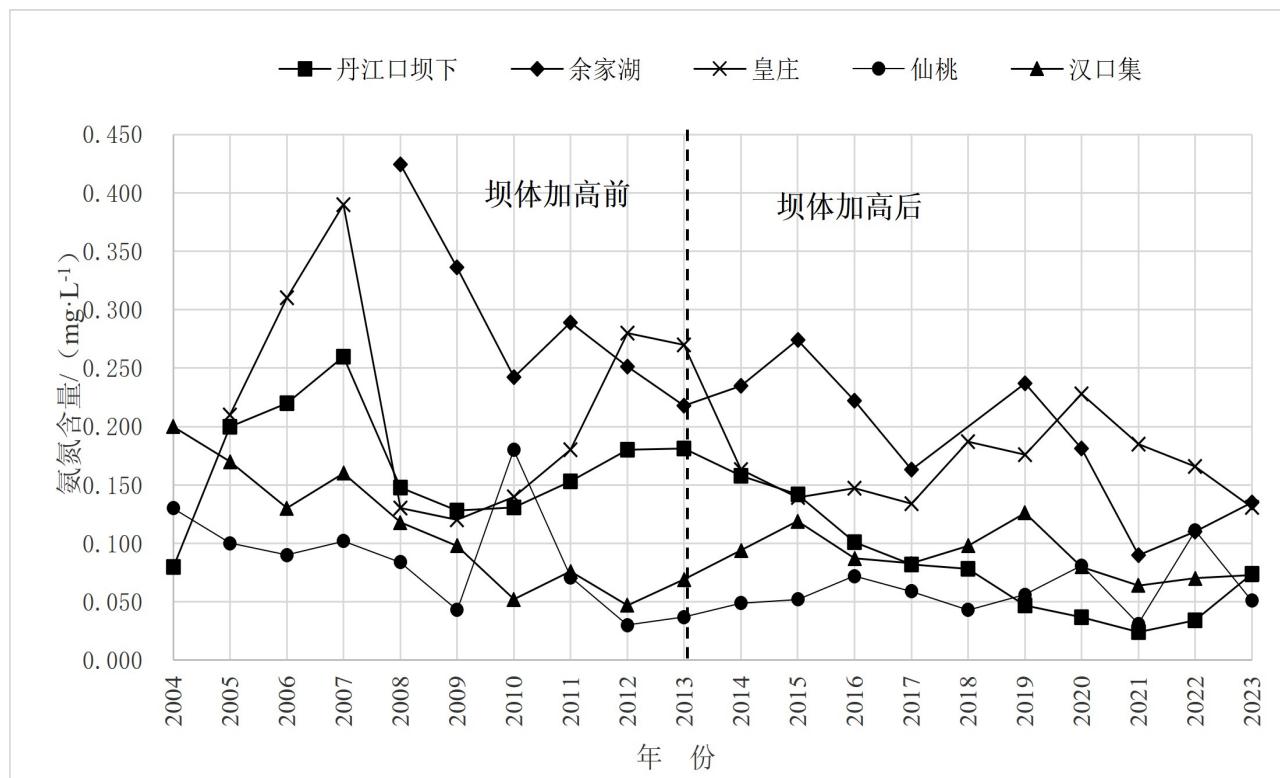


图3. 坝体加高前后汉江中下游干流氨氮年际变化趋势

3.3. 总磷浓度总体变化趋势

图4为2000~2023年汉江中下游干流各断面总磷浓度年际变化。由图4可知，汉江中下游干流各断面2004~2013、2014~2023年2个时段总磷浓度在一定范围内波动，总体无明显变化趋势，这可能是由于汉江中下游干流水体中总磷浓度整体水平都较低，只有极个别断面总磷浓度出现高于0.1 mg/L的情况。对比2004~2013年和2014~2023年丹江口水利枢纽大坝加高工程前后监测成果可知：汉江干流中游代表断面丹江口坝下、余家湖、皇庄总磷浓度由0.01~0.11 mg/L变化为0.02~0.08 mg/L；汉江干流下游代表断面仙桃和汉口(集)总磷浓度指浓度由0.05~0.11 mg/L变化为0.05~0.10 mg/L，汉江中下游干流各断面总磷浓度波动范围进一步减小，水体质量更加趋于稳定。

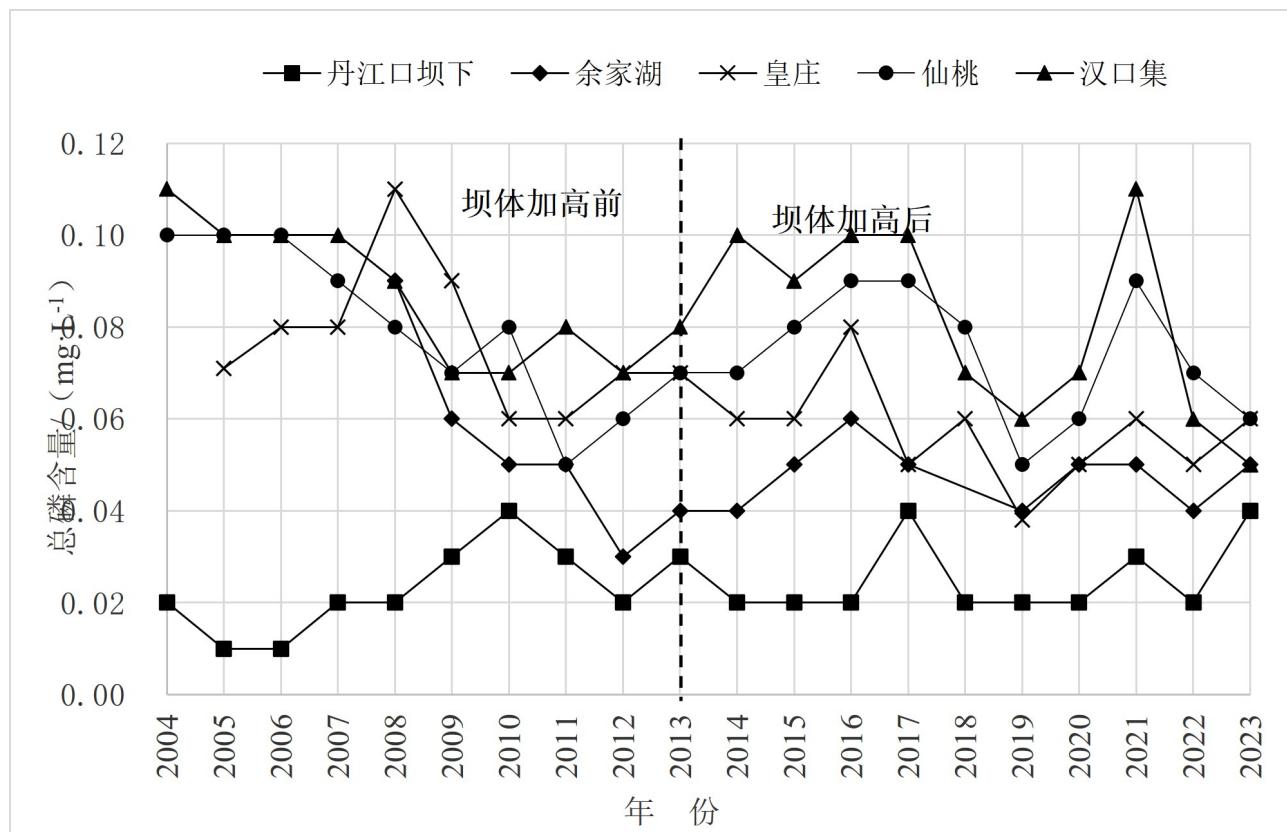


图 4. 坝体加高前后汉江中下游干流总磷年际变化趋势

4. 汉江中下游水沙与主要污染物通量时空变化特征

4.1. 水沙通量时空变化特征

根据图 5 汉江中下游干流黄家港(对应水质断面为丹江口坝下)、余家湖(2010 年建站)、皇庄、仙桃断面年径流量空间分布特征及历年变化趋势可知, 2004~2023 年汉江中下游干流各重要控制断面年径流量并无明显变化趋势, 均只在一定幅度内波动。各断面水量丰、枯年的出现保持高度一致, 丰水年为 2005 年、2010 年和 2021 年, 枯水年为 2014 年、2016 年、2019 年和 2022 年。2004~2013 年, 黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年平均径流量分别为 348.51、458.20、456.18、380.79 亿 m^3 ; 丹江口水利枢纽大坝加高工程后 2014~2023 年, 黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年平均径流量分别为 273.04、354.84、374.38、326.91 亿 m^3 , 相比较于 2004~2013 年大坝加高前, 各断面年均流量降幅达到 14.15%~22.56%。

根据图 6 汉江中下游干流黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年输沙量空间分布特征及历年变化趋势可知, 2004~2013 年, 黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年平均输沙量分别为 22.06、257.62、656.00、1409.6 万 t ; 丹江口水利枢纽大坝加高工程后 2014~2023 年, 黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年平均输沙量分别为 7.21、125.26、395.61、546.40 万吨, 相比较于 2004~2013 年大坝加高前, 各断面年均输沙量降幅达到 39.69%~67.32%。

4.2. 主要污染物通量时空变化特征

针对汉江中下游干流主要污染物高锰酸盐指数、总磷和氨氮三项, 选取中游断面丹江口坝下、余家湖, 下游断面皇庄、仙桃共四个断面, 计算其 2004~2023 年污染物年通量, 并与年径流量变化趋势进行对比, 结果如图 7 所示。高锰酸盐指数、氨氮的年通量的变化趋势与年径流量关系密切, 其中高锰酸盐指数的变化趋势与年

径流量的变化趋势一致性更高。2004~2023 年间,汉江中游的丹江口坝下断面 15 个年份、余家湖断面 11 个年份的年径流量、高锰酸盐指数通量、总磷年通量和氨氮年通量同时出现明显的高值或低值,汉江下游的皇庄断面 13 个年份、仙桃断面 10 个年份的年径流量、高锰酸盐指数通量、总磷年通量和氨氮年通量同时出现明显的高值或低值,与下游断面相比,汉江中游断面年径流量和污染物年通量特征值变化趋势一致性更高。

4.3. 主要污染物通量与径流量相关性分析

为进一步研判研究河段主要污染物通量与年径流量的相关关系,针对 2004~2023 年汉江中下游干流丹江口坝下、余家湖、皇庄、仙桃共四个断面高锰酸盐指数、氨氮和总磷三项主要污染物的年通量与各断面年径流量,进行通量与径流量之间的 Spearman 相关性分析,以 $P < 0.05$ 计显著性相关,结果如图 8 所示。汉江中下游干流

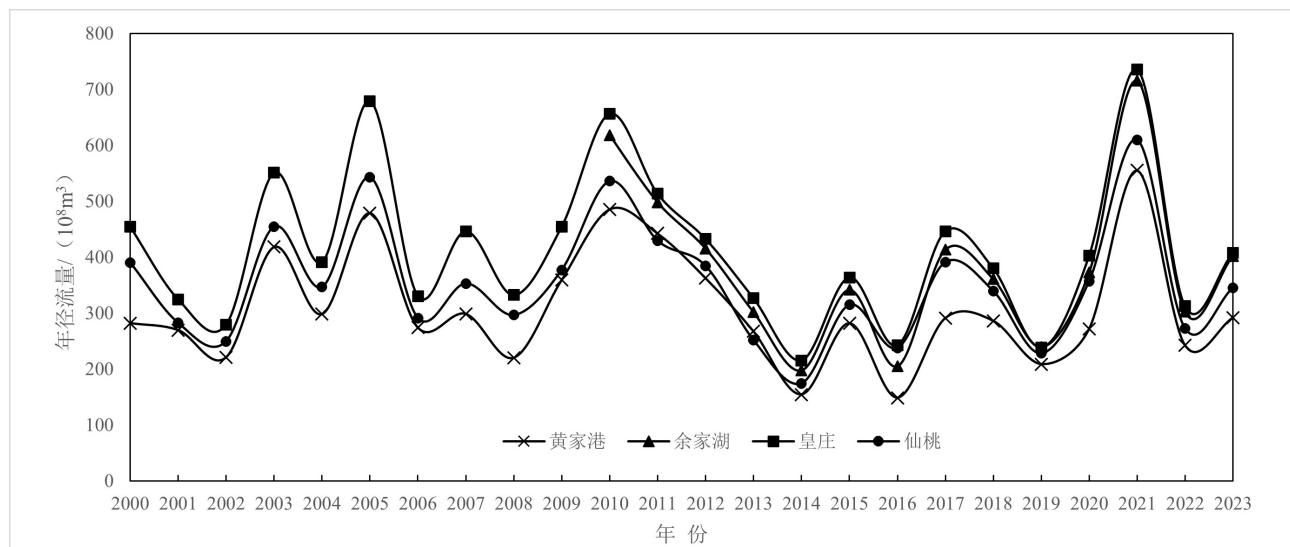


图 5. 2004~2023 年汉江中下游黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年径流量时空变化特征

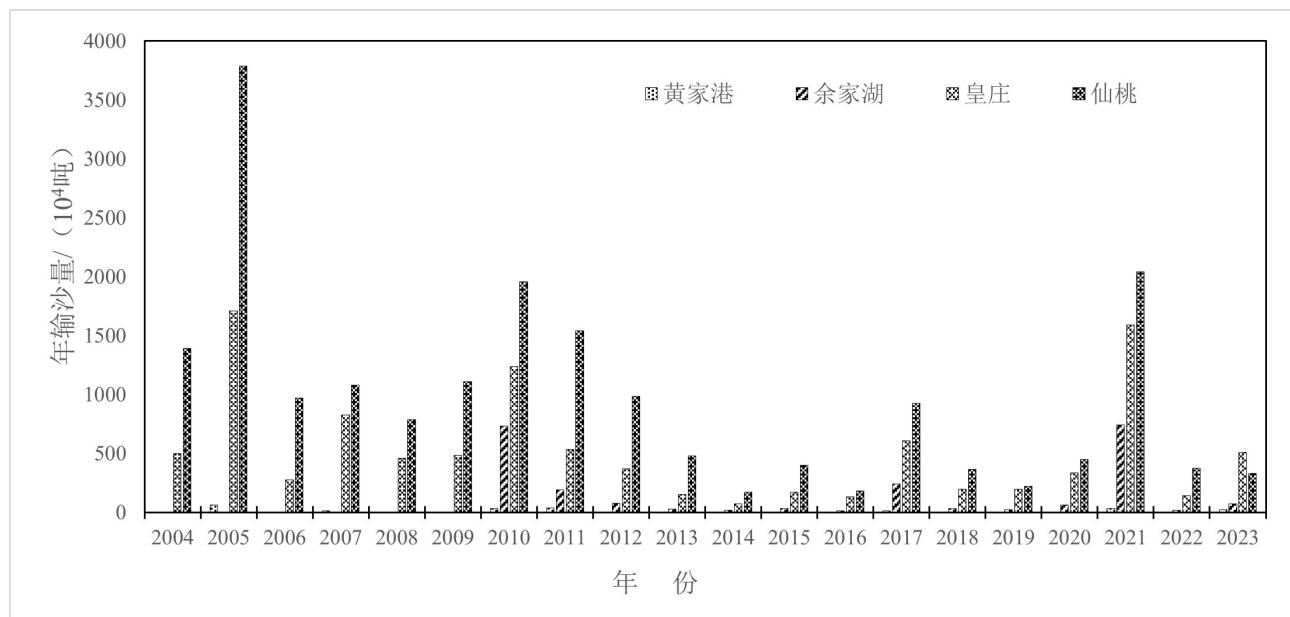


图 6. 2004~2023 年汉江中下游黄家港、余家湖、皇庄、仙桃断面年输沙量时空变化特征

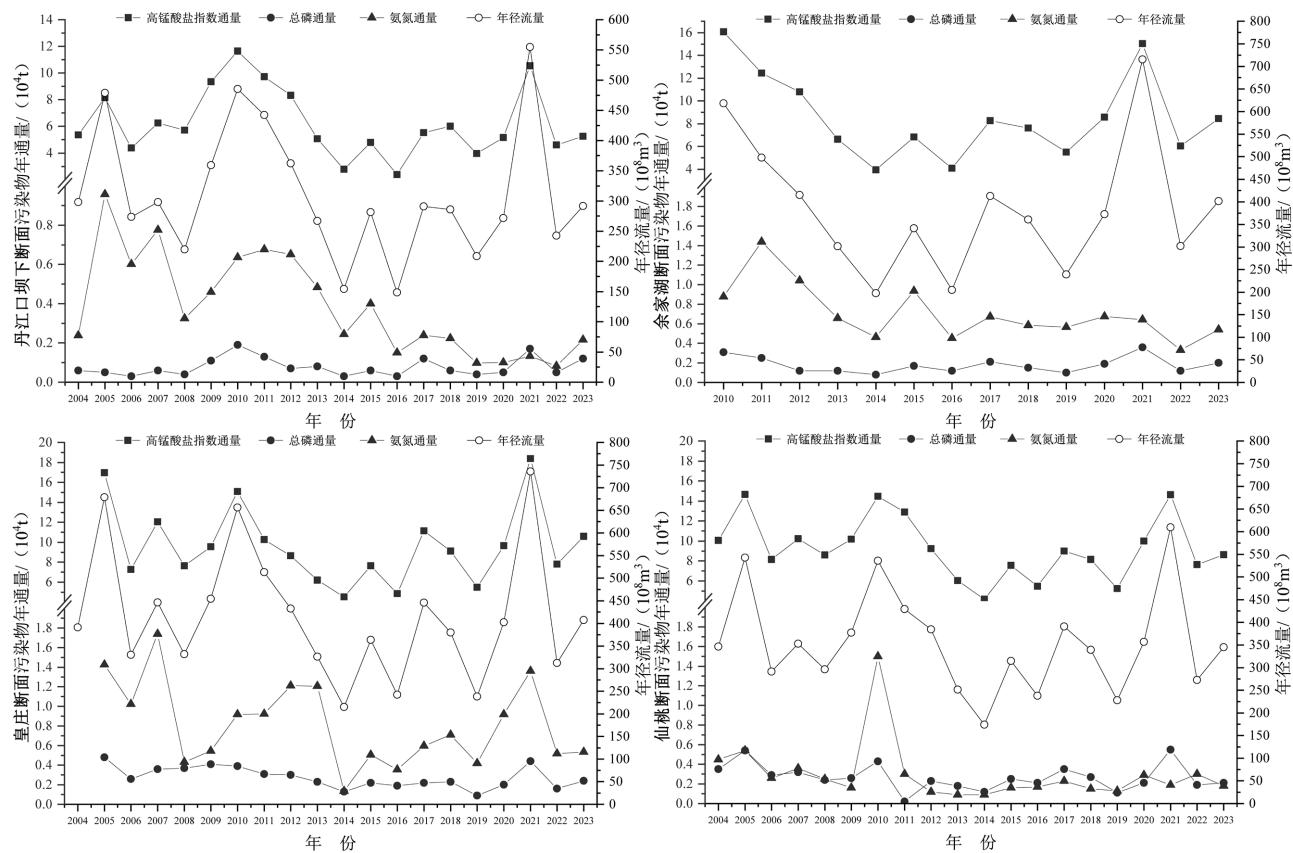
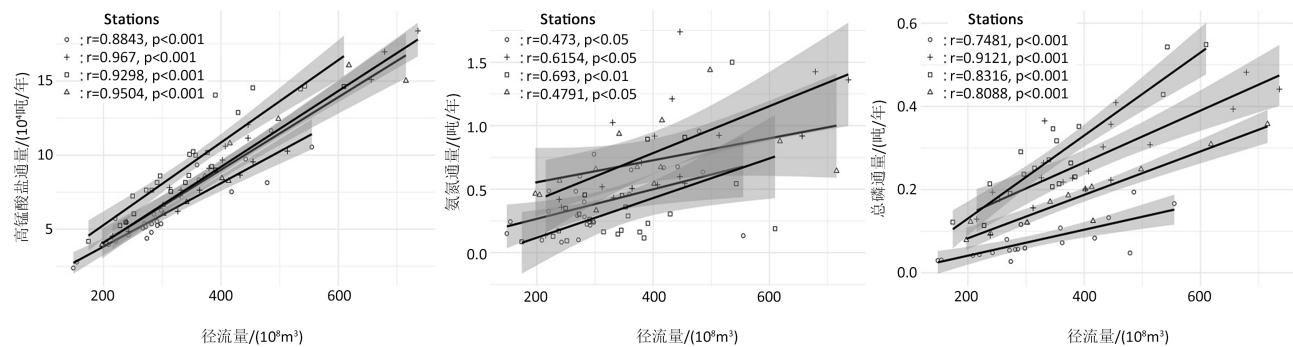


图 7. 2004~2023 年汉江中下游干流重要控制断面年径流量、污染物通量变化



图中 r 表示 Spearman 相关性系数, p 表示显著性。图中 \circ 为丹江口坝下站, \square 为余家湖站, $+$ 为皇庄站, Δ 为仙桃站

图 8. 2004~2023 年汉江中下游干流主要污染物通量与径流量相关性

主要污染物中, 四个断面的高锰酸盐指数通量与年径流量 Spearman 相关性系数 r 介于 0.8843~0.9504 之间, 均呈现极显著性相关($P < 0.01$), 说明高锰酸盐指数污染与地表水径流关系密切, 主要来源于面源污染。

四个断面中除了余家湖断面氨氮通量与径流量呈现极显著性相关($P < 0.01$)以外, 其他三个断面的氨氮通量与年径流量均呈现显著性相关($P < 0.05$), 因为水体中氨氮主要来源于点源污染, 相比于高锰酸盐指数, 氨氮的通量变化受径流量影响相对较小。

四个断面的总磷通量与年径流量呈极显著性相关($P < 0.01$), 由此可见, 虽然河流中的磷主要以水溶性磷和吸附性磷的形式存在, 水利工程对泥沙输移的拦截作用, 可能导致影响总磷通量的关键因素不再只是径流量, 还有输沙量, 其中输沙量的影响可能更大[21][22], 但这一结论并不适用于汉江中下游干流。因为汉江干流来水

泥沙含量较低,丹江口水利枢纽坝体的拦截效应更进一步导致常年清水下泄,因此很大程度上削弱了输沙量对汉江中下游干流总磷输移的影响,最终呈现出总磷通量与年径流量呈极显著性相关。

5. 结论

1) 2004~2023 年汉江中下游干流沿程各断面主要污染物高锰酸盐指数和氨氮浓度年际变化均呈现总体下降趋势,汉江中下游干流水体中总磷浓度整体水平都较低,总磷浓度无明显变化趋势。其中汉江中游干流代表断面丹江口坝下、余家湖、皇庄的高锰酸盐指数和氨氮下降幅度明显高于汉江下游干流代表断面仙桃和汉口(集),汉江中游干流总磷浓度波动范围进一步减小,水体总磷浓度更加趋于稳定。

2) 2004~2023 年汉江中下游干流各重要控制断面年径流量并无明显变化趋势,均只在一定幅度内波动,年输沙量呈现沿程增大的趋势,其中由于丹江口大坝清水下泄,导致的黄家港水文站多年年输沙量为 0 万 t。高锰酸盐指数、总磷和氨氮的年通量的低值和高值出现的年份与年径流量关系密切,其中高锰酸盐指数的变化趋势与年径流量的变化趋势一致性更高。与下游断面相比,汉江中游断面年径流量和污染物年通量特征值变化趋势一致性更高。

3) 通过 Spearman 相关性分析,汉江中下游干流主要污染物指标中高锰酸盐指数和总磷与径流量呈极显著性相关,氨氮与径流量呈显著性相关;因为汉江干流来水泥沙含量较低,丹江口水利枢纽坝体的拦截效应更进一步导致常年清水下泄,因此很大程度上削弱了输沙量对汉江中下游干流主要污染物输移的影响,因而导致年径流量对污染物通量的影响更大,进一步证实了丹江口水利枢纽坝体对汉江中下游干流主要污染物通量变化存在显著影响。

基金项目

武汉市知识创新专项资助项目资助,任务书编号: 2023020201020364。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 何术锋, 余星源, 林育青, 等. 汉江中下游水质时空特征及环境流量确定[J]. 水力发电学报, 2024, 43(11): 17-26.
- [3] 卢金友, 林莉. 汉江生态经济带水生态环境问题及对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1179-1186.
- [4] 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]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 47-53.
- [5] 洪兴骏, 余蔚卿, 任金秋, 等. 丹江口水利枢纽汛期运行水位优化研究与应用[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 27-34.
- [6] 朱艳容, 吴哲, 王峰. 丹江口水库水质现状及水资源可持续发展策略探讨[J]. 水利水电快报, 2016, 37(11): 10-11+16.
- [7] 王珍. 汉江中下游水质沿程变化规律及污染成因分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 长江科学院, 2021.
- [8] 秦听听, 徐鑫, 王盈心, 等. 水运枢纽梯级开发对汉江中下游水质时空变化影响分析[J]. 水道港口, 2024, 45(2): 206-214.
- [9] 程兵芬, 张远, 夏瑞, 等. 汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4211-4221.
- [10] 陈峰, 王文静, 何涛, 等. 汉江中下游水华发展新形势及治理对策分析[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 7-17.
- [11] 黄振伟. 南水北调中线工程丹江口水利枢纽大坝加高工程地质勘察[C]//水利水电工程勘测设计新技术应用. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2018: 13.
- [12] 彭祥. 南水北调工程总体规划前期论证历程总结、分析与评价[J]. 中国水利, 2024(8): 14-24+32.
- [13] 董付强, 穆青青, 王伟, 等. 丹江口水利枢纽汛末提前蓄水方案研究[J]. 水利水电快报, 2023, 44(9): 79-85.
- [14] 任实, 高宇. 三峡工程泥沙问题研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1611-1625.
- [15] 张为, 黎睿, 王丹阳, 等. 上游梯级水库建成运行对长江总磷输移影响分析及管控对策建议[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1-13.
- [16] 易沅壁. 大坝拦截下河流有机碳转化机制研究——以珠江梯级水库为例[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2022.
- [17] 王文静, 周才金, 聂真真, 等. 汉江襄阳河段主要污染物通量分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(3): 68-73.

-
- [18] 秦灏, 柳子豪, 姚杰夫, 等. 入太湖污染物通量削减目标下水工程调控优化探究[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 75-83.
 - [19] 朱艳容, 龙雪峰, 方文宏. 汉江干流中游断面污染物通量估算方法研究[J]. 水利技术监督, 2018(6): 178-180.
 - [20] 余启辉, 林莉, 金海洋, 等. 丹江口水库氮磷时空分布特征及水质安全保障对策[J]. 中国水利, 2024(20): 59-66.
 - [21] 富国, 雷坤. 河流污染物通量估算方法分析(II)——时空平均离散通量误差判断[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 5-9, 42.
 - [22] 娄保锋, 卓海华, 周正, 等. 近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1150-1162.