

2017—2023 年丹江口库区水质时空变化及其与极端降雨的关系分析

陈景华¹, 张勇², 林庆明², 孙驷阳², 秦赫³, 魏玉杰^{1†}

(1.华中农业大学资源与环境学院, 430070, 武汉; 2.长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站, 430010, 武汉; 3.南水北调中线水源公司, 442700, 湖北十堰)

摘要: 【目的】近年来全球极端降雨事件频发, 明确丹江口库区水质时空变化及其对极端降雨的响应规律, 对水质安全保障具有重要意义。【方法】本研究基于 2017—2023 年逐日降雨数据及 31 个站点的月度水质数据, 采用极端降雨指数、季节性 Mann-Kendall 趋势检验、Sen's 斜率估计及 Pearson 相关性分析方法, 揭示了水质时空变化特征及其对极端降雨的响应差异。【结果】1)研究期内, 多项极端降雨指数总体呈上升趋势, 降水极端化特征增强。2)水质演变具有显著时空差异, 库区波动幅度整体小于支流, TN 在两类水体中均呈显著上升趋势, 为最突出的水质压力因子, 而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 变化相对平稳。3)水质对极端降雨的响应存在明显区域分异, 水温对降雨变化敏感, pH 在库区与极端降雨多呈正相关, 在支流中则以负相关为主, DO 随降雨增强普遍下降, 有机物指标 (COD_{Mn} 、COD) 呈升高趋势; TN 在库区与支流中均与降雨增强呈负相关, 但其主控降雨因子存在差异。【结论】总体而言, 极端降雨通过影响径流过程、污染物输移及水体稀释作用, 对库区与支流水质产生差异化影响。结果可为南水北调中线水源地水环境风险识别与分区管控提供依据。

关键词: 极端降雨指数; 水质趋势; 季节性 Mann-Kendall; 丹江口库区; 响应差异

中国分类号: X524 **文献标志码:** A

Spatiotemporal variations in water quality and their relationships with extreme rainfall in the Danjiangkou Reservoir from 2017 to 2023

CHEN Jinghua¹, Zhang Yong², LIN Qingming², SUN Siyang², Qin He³, WEI Yujie^{1†}

(1.School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 430070, Wuhan, China; 2.Yangtze River Basin Monitoring Center Station for Soil and Water Conservation, Changjiang Water Resources Commission, 430010, Wuhan, China; 3.South-to-North Water Diversion Project Midline Water Source Co, Ltd, 442700, Shiyan, Hubei, China)

Abstract: [Objective] In recent years, global extreme rainfall events have become increasingly

收稿日期: 2025-12-22 **修回日期:** 2026-07-16

项目名称: 国家自然科学基金“崩岗地貌形态演变与侵蚀发育过程的互作机制”(42477351), “花岗岩风化土体裂隙演化机制及其对崩岗侵蚀的影响”(42277329); 南水北调中线水源有限公司科研专项“丹江口库区及上游氮磷来源、变化及防控对策研究”(ZSY/YG-ZX (2023) 022)

第一作者简介: 陈景华 (2003—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀机理。E-mail: 15377576145@163.com

†通信作者简介: 魏玉杰 (1988—), 女, 博士, 副教授。主要研究方向: 土壤侵蚀过程与风险预警。E-mail: wyj@mail.hzau.edu.cn

frequent. Revealing the spatiotemporal variation characteristics of water quality in the Danjiangkou Reservoir area and its response to extreme rainfall is of great significance for ensuring water quality safety. [Methods] In this study, we made use of the daily rainfall data spanning the period from 2017 to 2023, together with the monthly water quality monitoring data that were collected from a total of 31 monitoring stations. A series of analytical approaches were adopted, which included the calculation of multiple extreme rainfall indices, the application of the seasonal Mann-Kendall trend test for detecting monotonic trends, the use of Sen's slope estimator for quantifying the magnitudes of the detected trends, and the performance of Pearson correlation analysis to evaluate the relationships between the extremization of rainfall and the various water quality indicators. Through the integration of these methods, we were able to reveal the trends of spatiotemporal water quality variation and their differential associations with extreme rainfall. [Results] The results obtained from this study are summarized as follows: 1) Over the entire study period, the majority of the extreme rainfall indices exhibited a general upward tendency, which clearly indicates that the characteristics of precipitation extremization became more pronounced. 2) The temporal and spatial evolution of water quality showed significant differences across the study area. More specifically, the range of fluctuations in water quality within the reservoir area was generally smaller than that observed in the tributary rivers. Among all the water quality parameters examined, total nitrogen (TN) exhibited a significant increasing trend in both the reservoir area and the tributaries, thus making it the most prominent factor exerting pressure on water quality. In contrast, the concentrations of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) and total phosphorus (TP) remained relatively stable throughout the study period, without showing any notable trends. 3) The response of water quality to extreme rainfall displayed clear regional differentiation. For instance, water temperature was found to be sensitive to variations in rainfall. Regarding pH, it was mostly positively correlated with extreme rainfall in the reservoir area, while in the tributaries the correlation was predominantly negative. Dissolved oxygen (DO) generally exhibited a decreasing trend with increasing rainfall, whereas the organic matter indicators, including COD_{Mn} and COD, showed increasing tendencies. As for total nitrogen (TN), it was negatively correlated with increased rainfall in both the reservoir and the tributaries; however, the specific rainfall indices that dominated the correlation differed between the two water bodies. [Conclusions] In general, extreme rainfall influences water quality by altering runoff processes, pollutant transport, and dilution effects, leading to differentiated responses between the reservoir and its tributaries. These findings provide a scientific basis for water quality risk identification and zoned management in the water source area of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords: extreme rainfall indices; water quality trends; seasonal Mann-Kendall test; Danjiangkou Reservoir Area; differential response

Funded: National Natural Science Foundation of China Project "Interaction Mechanisms between Benggang Landform Morphological Evolution and Erosion Development Processes" (42477351), "Mechanisms of Fracture Evolution in Granite Weathered Soils and Their Impacts on Benggang Erosion" (42277329). South-to-North Water Diversion Middle Route Water Source Co., Ltd. Special Research Project "Sources, Dynamics, and Control Strategies of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir Area and Its Upstream Region" (ZSY/YG-ZX (2023) 022)

水资源与水环境安全是人类社会和生态系统健康与可持续发展的重要基础^[1]。全球气候变化加剧了极端降雨事件的频发与增强,深刻改变了流域水文循环与径流过程^[2]。随着

点源污染逐步得到控制,农业生产、城市径流等面源污染已成为河流与湖库水体营养盐及悬浮物的主要来源^[3]。

降雨径流是面源污染物输送的核心途径,其污染负荷受降雨量、雨强、降雨历时及下垫面条件共同控制^[4]。普通降雨主要通过中、小尺度径流推动污染负荷的持续输入,而强降雨或暴雨事件则引发水文过程突变,污染物输送效率显著提升,水质在短期内剧烈波动^[5-7]。极端降雨相比一般性降雨更能放大流域污染输送过程的非线性效应^[3]。一方面,极端降雨具有更高的侵蚀力和更短的汇流时间,使坡面侵蚀、沟道冲刷和底泥再悬浮同步增强,从而导致营养盐和悬浮颗粒物负荷在洪峰期间急剧上升^[8]。另一方面,极端降雨带来的巨量补给通常会显著改变水体的水动力结构,影响污染物的稀释、沉降与再释放过程。这种“强冲刷—强补给”的复合作用,使极端降雨成为影响水质波动的关键驱动因素^[9]。在气候变暖背景下,极端降雨事件在全球多个地区呈现“更频繁、更剧烈”的演变趋势,其在水体氮磷负荷、浊度、溶解氧以及有机污染指标的影响均显著强于一般性降雨过程,甚至可能在数小时至数日内改变水体的营养状态或生态风险等级。这一现象已在山地河流^[8]、平原河网^[4]、城市湖泊^[9]和大型河湖水系^[10]中被广泛观测到,凸显出极端降雨对水环境安全的系统性挑战。

与河流相比,水库具有“水力停留时间长-分层明显-内源释放强”的独特水环境特征。极端降雨引发的巨量入库径流可改变库区水动力结构,破坏热分层结构或促进底泥再悬浮,使外源输入与内源释放叠加,导致水质波动幅度更大、响应机制更为复杂^[11]。例如,洪水过程常伴随浊度陡升、总氮(TN)或总磷(TP)突增及水体色度变化,对供水安全带来潜在威胁^[12]。因此,明确水库水质在极端降雨背景下的响应特征,对于优化水库调度策略、提升水质风险预警能力具有重要意义。

丹江口水库是南水北调中线工程的核心水源地,水质状况直接关系到沿线1亿多人口的饮水安全与区域生态稳定^[13]。尽管丹江口水库水质常年保持在Ⅰ—Ⅱ类水平,但近年来汉江和丹江上游农业面源输入增多,支流水体TN偏高、库湾富营养化风险上升^[14]。同时,极端降雨及洪水过程频发,导致库区水质出现短期波动,水环境安全面临新的不确定性风险^[15]。然而,梳理现有研究发现:目前关于丹江口库区的研究多集中于水质现状评估与污染来源的分析,虽然已有研究对丹江口库区水质时空变化特征进行了有益探讨,但多侧重于常规条件下的水质评价与年际趋势分析,尚未将长期水质演变趋势与极端降雨事件下的动态响应过程进行系统关联,更缺乏对库区主体水体与上游支流在极端降雨事件中响应差异的比较,难以为精细化流域管理与水源地安全保障提供足够的科学支撑。

鉴于此,本研究依托2017—2023年丹江口库区多点位水质监测数据与降雨资料,通过极端降雨因子计算、Mann-Kendall分析等方法,旨在:(1)系统刻画库区主要水质指标的时间变化趋势与空间分布特征;(2)识别不同雨量等级尤其是极端降雨事件对水质指标的影响方向与响应幅度;(3)比较库区主体水体与上游支流在极端降雨背景下的响应差异。为水源地水环境风险预警与科学调控提供数据支撑与理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

丹江口水库位于鄂、豫、陕交界(N 32°36'~33°48', E 110°59'~111°49'),横跨湖北丹江口市和河南淅川县。属北亚热带季风气候,年均温15~16℃,年降水量800~1000 mm,其中70%以上集中于6—9月,多短历时强降雨,易诱发坡面侵蚀和面源污染。作为南水北调中线核心水源地,库区长期实行严格生态保护,土地利用以水域和林草地为主,耕地占比较小,城镇工矿不足5%。近年退耕还林、生态搬迁等措施持续推进,水源涵养能力不断增强。这一独特的地理与土地利用格局使库区对降雨变化高度敏感,是研究水质对降

雨响应的典型区域。

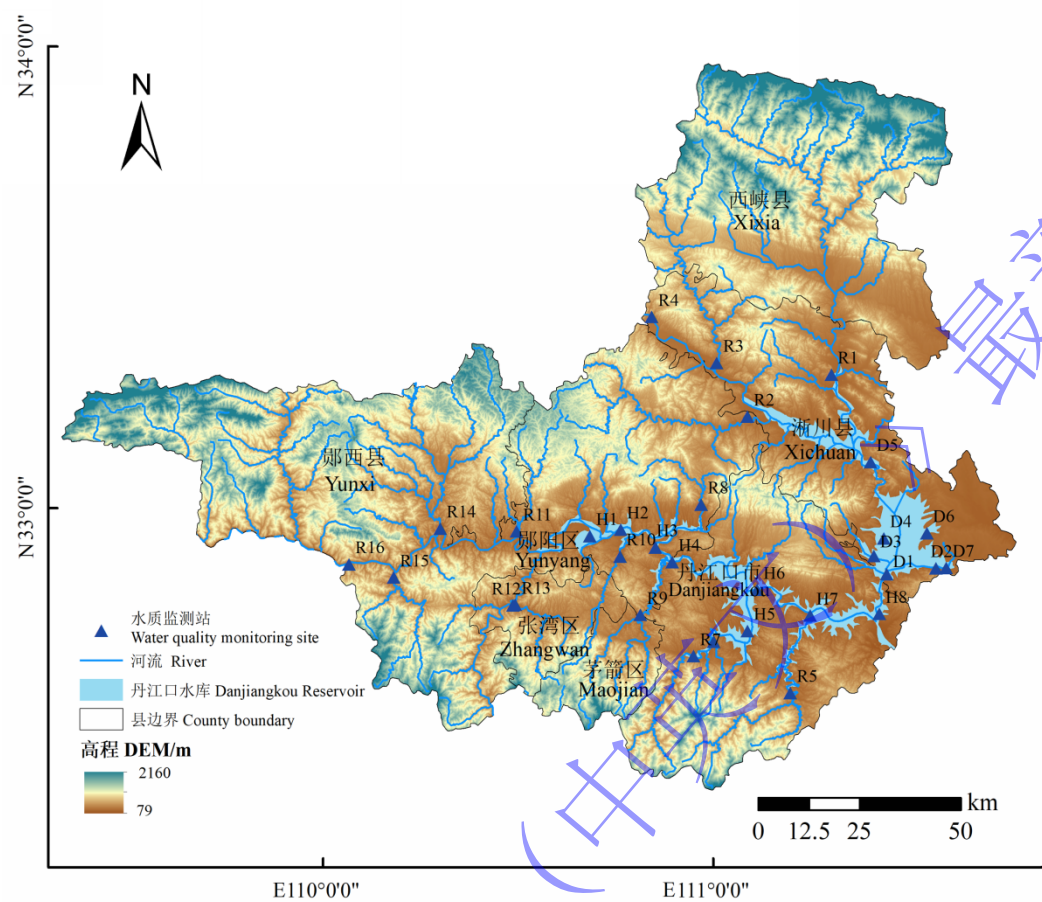


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 水质监测数据 丹江口水库集水区共设置 31 个水质采样点(表 1)，其中 16 个位于主要支流的入库河口 (R1-R16)，其余 15 个分布于库区干流及库湾。上述监测点均由中华人民共和国生态环境部 (MEEPRC, <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/>) 纳入国家水环境监测网络，承担丹江口水库流域水质长期观测任务。

2017—2023 年间，由长江水利委员会长江科学院按每月一次的频率在 31 个采样点同步采集水样，并测定以下水质指标：pH 值、水温 (T, °C)、溶解氧 (DO, mg/L)、5 日生化需氧量 (BOD₅, mg/L)、化学需氧量 (COD, mg/L)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}, mg/L)、总磷 (TP, mg/L)、总氮 (TN, mg/L)、氨氮 (NH₃-N, mg/L)。各指标测定严格遵循国家水质监测技术规范 (如 SL 394.1-2007)，确保数据准确性与可比性。

表 1 水质采样点名称

Tab.1 Water quality monitoring station

类别	编号	名称
Type	ID	Name
支流系统	R1	老鹳河河口
	R2	滔河河口
Tributary system	R3	Taohe River Estuary
	R4	Laogan River Estuary

	R3	淇河河口 Qihe River Estuary
	R4	湘河河口 Xianghe River Estuary
	R5	浪河河口 Langhe River Estuary
	R6	剑河河口 Jianhe River Estuary
	R7	官山河河口 Guanshanhe River Estuary
	R8	淘沟河口 Taogou River Estuary
	R9	泗河河口 Sihe River Estuary
	R10	神定河河口 Shending River Estuary
	R11	曲远河河口 Quyuan River Estuary
	R12	犍河河口 Jianghe River Estuary
	R13	堵河河口 Duhe River Estuary
	R14	天河河口 Tianhe River Estuary
	R15	将军河河口 Jiangjunhe River Estuary
	R16	白河河口 Baihe River Estuary
汉江库区 Han River Reservoir Area	H1	柳陂镇山跟前 Liubei Town
	H2	汉库中心 Han Reservoir Central Site
	H3	青山-安阳 Qingshan - Anyang
	H4	远水库湾 Yuanhe Reservoir Bay
	H5	武当山-三塘湾 Wudangshan-Sandang Bay
	H6	肖川-龙口 Xiaochuan-Longkou
	H7	浪河口下 Lower Langhe Estuary
	H8	坝上 Dam Forebay
丹江库区	D1	凉水河-台子山

Danjiang River Reservoir Area		Liangshuihe-Taizishan
	D2	清泉沟 Qingquangou
	D3	仓房镇-赵沟
		Cangfang Town-Zhaogou
	D4	丹库中心
		Dan Reservoir Central Site
	D5	白渡滩 Baidutan
	D6	香花镇-张寨
		Xianghua Town-Zhangzhai
	D7	陶岔 Taocha

1.2.2 降雨数据 2017—2023 年丹江口水库流域逐日降雨数据来源于已发表的 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 高分辨率中国大陆降水数据集^[16]。参考 ETCCDMI 建议，本文利用逐日降雨数据计算降雨特征因子，分析丹江口库区极端降雨的时空演变特征。使用 RClimDex 1.9 软件包，在数据质量控制（QC）后计算 ETCCDMI 推荐的 12 项极端降雨指数，其定义及含义见表 2。

表 2 极端降水指标的定义

Tab.2 Definition of extreme precipitation indicator

指标 Index	名称 Name	定义 Definition	单位 Unit
Pm	降雨总量 Total precipitation	月总降水量 Monthly total precipitation	mm
Rx1day	最大一日降水 Maximum 1-day precipitation	单日降水最大值 Maximum daily precipitation	mm
Rx5day	最大五日降水 Maximum consecutive 5-day precipitation	5 日连续降水最大值 Maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	简单日降水强度指数 Simple daily intensity index	湿润日降水强度（日降水量 $\geq 1\text{mm}$ ） Wet-day precipitation intensity (daily precipitation $\geq 1\text{ mm}$)	mm/day
R10	强降水日数 Number of heavy precipitation days	降水 $\geq 10\text{mm}$ 的天数 Number of heavy precipitation days (daily precipitation $\geq 10\text{mm}$)	days
R20	大强降水日数 Number of very heavy precipitation days	降水 $\geq 20\text{mm}$ 的天数 Number of very heavy precipitation days (daily precipitation $\geq 20\text{mm}$)	days
R95p	强降水日降水量 Very wet-day precipitation	降水大于第 95 百分位的总降水量 Total precipitation on very wet days (daily precipitation > 95th percentile)	mm
R99p	极强降水日降水量 Extremely wet-day precipitation	降水大于第 99 百分位的总降水量 Total precipitation on extremely wet days (daily precipitation > 99th percentile)	mm
R95pTOT	强降水日降水比例 Proportion of heavy precipitation	强降水日总降水量的百分比 Percentage of total precipitation from heavy precipitation days	%
R99pTOT	极端强降水日降水比例 Proportion of extreme heavy	极端强降水日总降水量的百分比 Percentage of total precipitation from extremely heavy	%

	precipitation	precipitation days	
	连续干旱天数	降水<1mm 的最大连续日数	
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days with daily precipitation < 1 mm	days
	连续湿润日数	降水≥1mm 的最大连续日数	
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days with daily precipitation ≥ 1 mm	days

1.2.3 趋势检验 本文采用季节性 Mann-Kendall (Seasonal MK) 趋势检验与 Theil-Sen Median (Sen's) 斜率估计, 分析各水质指标 2017—2023 年的变化趋势。季节性 MK 检验属于非参数统计方法, 不依赖样本分布, 能够有效应对水质监测数据中常见的非正态性、离群值、缺失值及季节周期性, 已广泛应用于水质、水文、气象等环境变量趋势检测^[17]。

季节性 MK 检验首先分别对各季节 (或月份) 的序列进行 MK 趋势计算, 再综合得到总体趋势检验统计量, 用于判断时间序列是否存在显著上升或下降趋势。其核心统计量包括 Mann-Kendall 统计量 S 与标准化统计量 Z , 计算公式如式 (1) ~ 式 (3) 所示。

$$S = \sum_{i=1}^{12} S_i \quad (1)$$

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_{ij} - X_{ik}) \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: X_{ij} 是第 j 年第 i 月的水质指数, $\text{Var}(S)$ 是 S 的方差, n 是年数。由于水质状况是一个随机事件, 因此 Z 遵循标准正态分布。在没有趋势假设的情况下, Z 等于零。如果 Z 不等于零, 则水质指数呈上升趋势 ($Z > 0$) 或下降趋势 ($Z < 0$)。

Sen's 斜率估计量的中值斜率计算如式 (4) 所示:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \right) \quad j > i \quad (4)$$

其中: β 是数据点 X_j 和 X_i 之间的中间斜率, 其中 $i (j > i)$ 。

1.2.4 皮尔逊相关性 本文采用 Pearson 相关分析检验降雨指标与水质指标之间的线性相关性。Pearson 相关系数 r 用于表征两个变量之间线性相关关系的方向和强度, 其计算公式如式 (5) 所示

$$r = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (5)$$

其中: $\text{cov}(X,Y)$ 为变量 X 与 Y 的协方差; σ_X 和 σ_Y 分别为变量 X 与 Y 的标准差; X 和 Y 分别表示极端降雨指标与水质指标。

当 $r > 0$ 时, 表示两变量呈正相关; 当 $r < 0$ 时, 表示两变量呈负相关; $|r|$ 越大, 相关性越强。本文采用双侧检验判定相关性的显著性, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。需要说明的是, Pearson 相关分析主要用于识别降雨指标与水质指标的同步变化关系, 其结果反映变量之间的统计相关性, 不直接代表严格的因果关系。

2 结果

2.1 极端降雨指标变化特征

丹江口流域 2017 年—2023 年极端降雨指标变化如图 2 所示。研究期内, 除连续干旱日数

(CDD) 呈下降趋势外, 其余 11 项指数

(Pm、Rx1day、Rx5day、SDII、R10、R20、R95p、R99p、R95pTOT、R99pTOT、CWD) 均呈波动上升趋势, 该流域降水系统呈现出极端化与湿化特征。具体而言, 强降水贡献率 (R95pTOT 与 R99pTOT) 的持续上升, 表明极端降水在总降水量中的占比日益增大; 同时, 最大一日降水量 (Rx1day) 与最大五日降水量 (Rx5day) 的增强, 则直接印证了极端降水事件的量级与短时累积能力的加剧。。上述指标的变化共同驱动了降水总量 (Pm) 的增加。另一方面, 强降水日数 (R10 和 R20) 的增加, 以及连续湿润日数 (CWD) 的延长, 表明降水的时间分布结构发生改变。与此同时, 干旱期 (CDD) 的缩短, 显示出降水过程在时间维度上更为集中, 干湿期呈现出“湿期更长、干期更短”的两极分化特征。

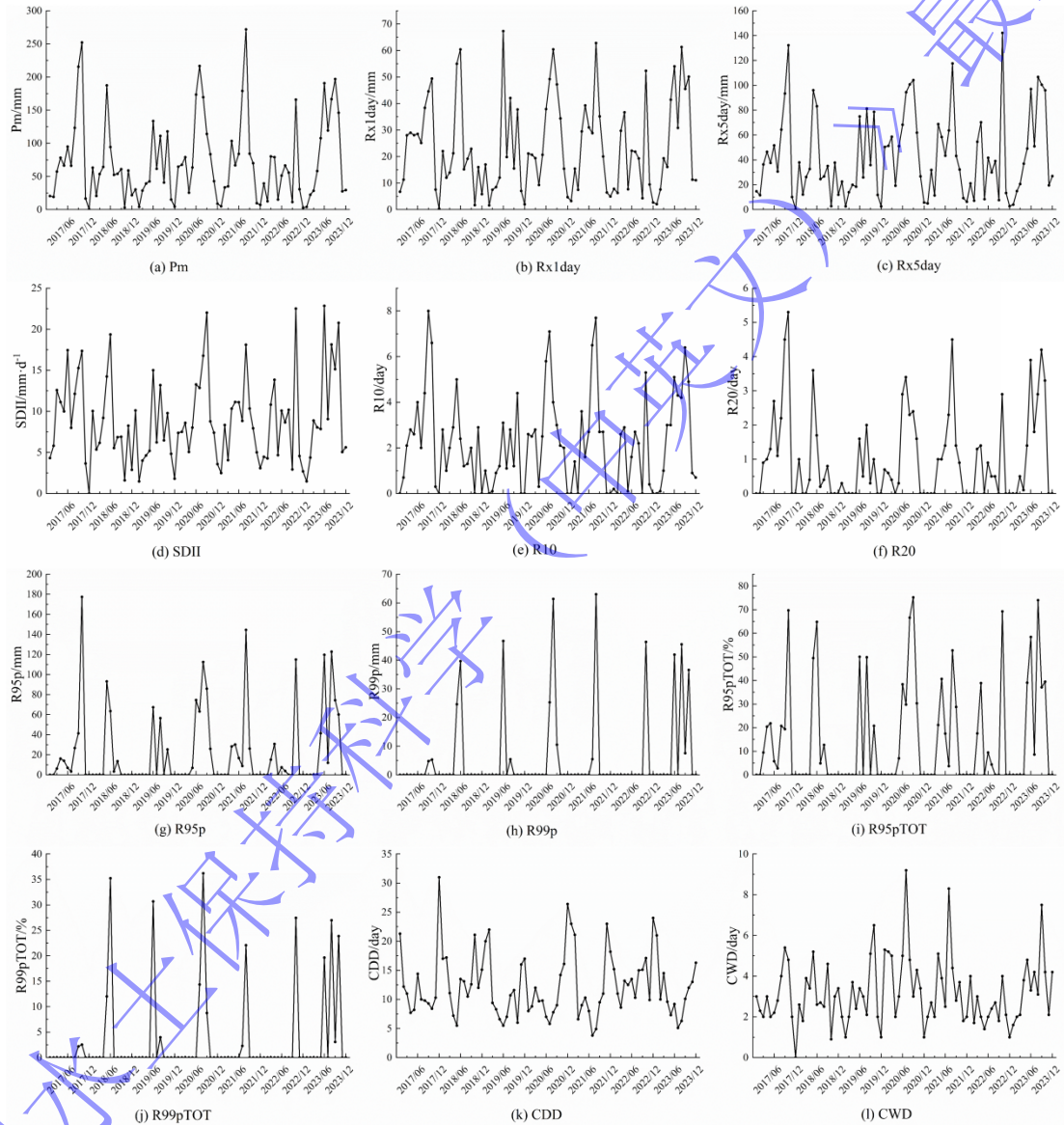


图 2 2017—2023 年丹江口流域极端降雨指数变化情况

Fig.2 Changes in extreme rainfall indices in the Danjiangkou Basin from 2017 to 2023

2.2 水质特征的时空变化

研究期内, 库区与支流各水质指标均呈现不同程度的季节性变化, 且库区波动幅度整体小于支流 (图 3)。水温 (T) 呈现显著的季节性变化, 库区与支流变化趋势一致 (图 3a)。夏季库区最高水温高于支流, 而冬季支流最低水温低于库区。pH 值介于 7.4~8.9

(图 3b), 整体呈弱碱性, 支流均值略低于库区 ($8.08 < 8.14$)。DO 在库区与支流之间差异较小 (图 3c), 两者均呈现冬季较高、夏季较低的季节性特征。有机物指标方面, 支流 COD_{Mn} 和 COD 整体高于库区, 且波动更为剧烈 (图 3d、图 3e)。BOD₅ 在库区 ($0.51 \sim 1.65 \text{ mg/L}$, 均值 0.96 mg/L) 与支流 ($0.68 \sim 4.67 \text{ mg/L}$, 均值 1.52 mg/L) 间变化趋势一致 (图 3f), 但支流波动幅度更大。营养盐方面, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在库区与支流间的差异逐年减小 (图 3g)。支流 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 2017 年 2 月达到峰值后呈波动下降, 库区整体变化较为平稳。TP 在库区与支流的浓度差异总体较小 (图 3h), 支流 TP 于 2017—2021 年波动下降后略有回升, 库区 TP 在 2021 年下半年波动较大。TN 在库区与支流之间差异最为显著 (图 3i)。支流 TN 波动较大 ($1.42 \sim 6.16 \text{ mg/L}$, 均值 3.27 mg/L), 库区 TN 较稳定 ($0.93 \sim 1.70 \text{ mg/L}$, 均值 1.31 mg/L), 两类水体均呈“年初至年中降低、年中至年末升高”的季节变化。

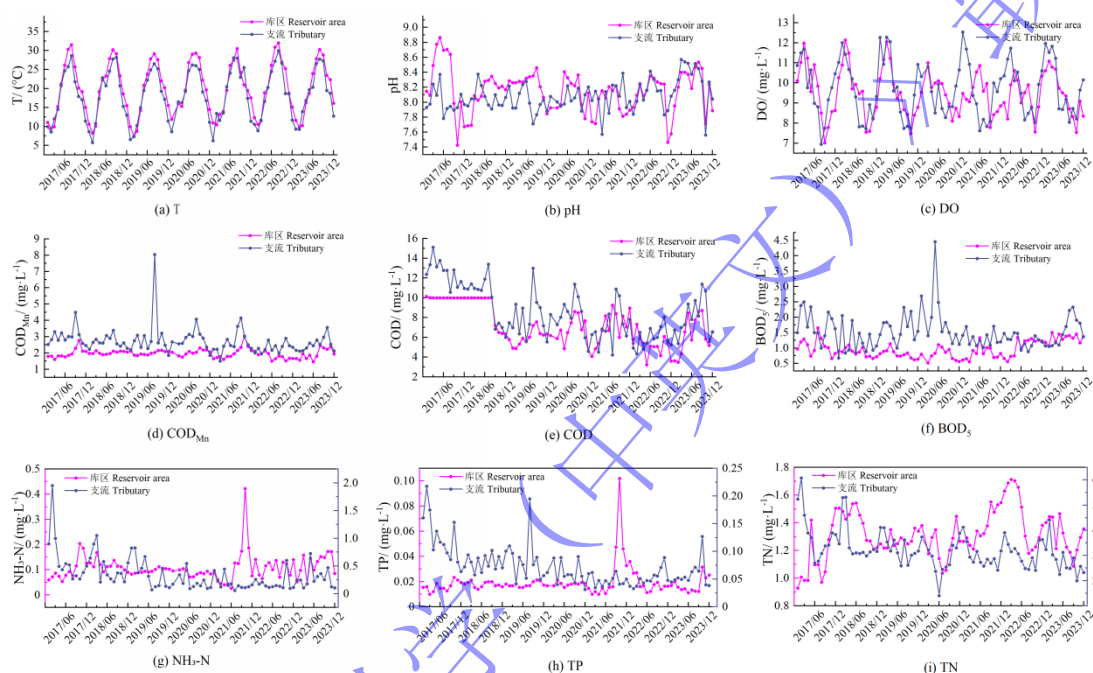


图 3 2017-2023 年丹江口库区及支流主要水质指标变化特征

Fig.3 Temporal variations in major water quality indicators in the reservoir area and tributaries from 2017 to 2023

结合 Sen's 斜率和季节性 Mann-Kendall 趋势检验, 可进一步揭示水质要素变化趋势的空间分布特征 (图 4)。2017—2023 年期间, 水温在多数站点 (74%) 呈上升趋势 (图 4a)。pH 整体变化较为平稳, 共有 12 个站点变化不显著; 支流 pH 以升高为主, 而库区部分站点呈下降趋势 (图 4b)。与水温趋势相反, DO 与 COD_{Mn} 在多数站点呈下降趋势 (图 4c、4d)。COD 在全部站点均呈下降趋势, 且显著及极显著站点比例超过 90% (图 4e)。BOD₅ 整体呈上升趋势, 显著与极显著上升站点主要集中于流域东部库区 (图 4f)。NH₃-N 与 TP 的趋势分布相对均衡: TP 中 5 个站点上升、8 个站点下降; NH₃-N 中 13 个站点上升、14 个站点下降。相比之下, TN 的上升趋势最突出, 在 30 个站点中有 20 个呈增加趋势 (66.7%), 表明流域氮污染负荷普遍加重。

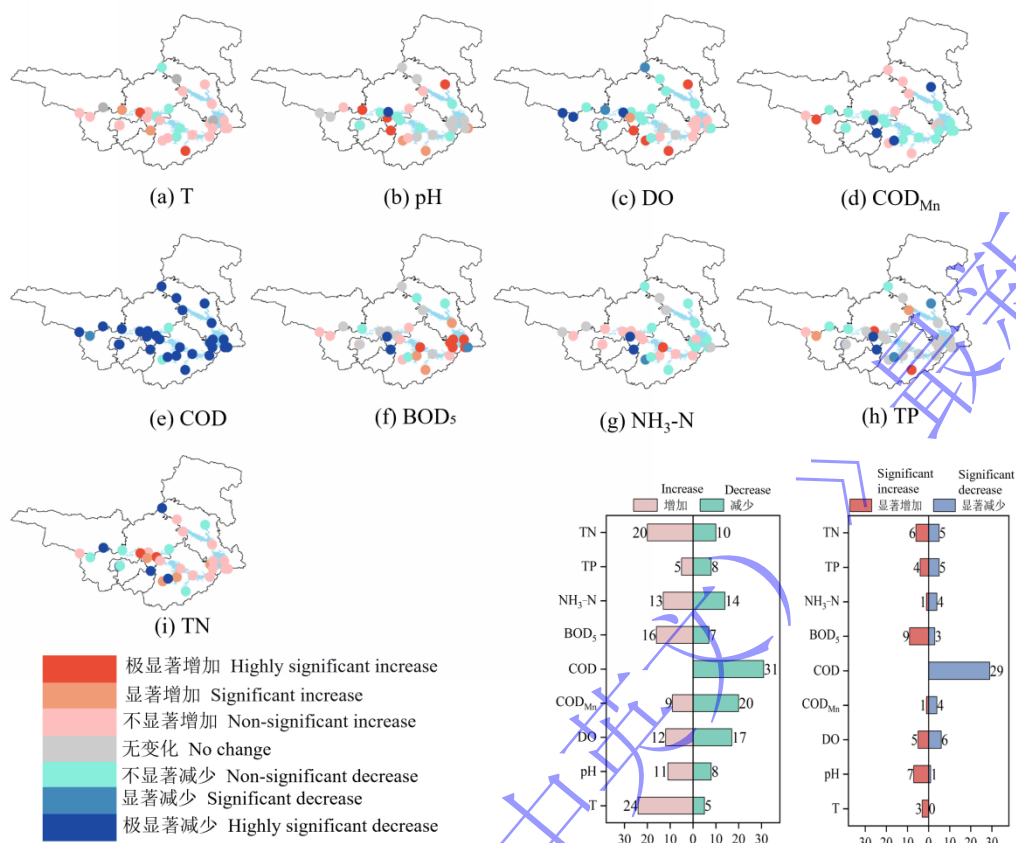


图 4 2017-2023 年丹江口流域各水质指标浓度变化趋势的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of trends in concentrations of various water quality indicators in the Danjiangkou Basin from 2017 to 2023

2.3 水质对降雨因子的响应关系

Pearson 相关性分析结果（图 5）显示，库区与支流水质指标对极端降雨的响应存在明显差异，部分理化指标和有机物指标对降雨变化表现出较高敏感性。在库区与支流中，水温（T）与降雨量及降雨强度相关的极端降雨指标（Pm、Rx1day、Rx5day、SDII、R10）均呈极显著正相关，而与连续干旱日数（CDD）呈显著负相关。pH 在库区与多数极端降雨指标均呈极显著正相关，与 CDD 呈显著负相关；在支流则整体呈负相关，且与 CDD 相关性不显著。DO 在库区与各类极端降雨指标普遍呈负相关，其中与 R20 的负相关程度最高（ $P < 0.001$, $r = -0.16$ ）。相比之下，支流 DO 与除 CDD 外的极端降雨指标负相关性更为显著，同时与 CDD 呈正相关，显示出与库区不同的响应特征。在有机物指标方面，库区与支流的 COD_{Mn} 和 COD 均与除 CDD 外的极端降雨指标呈正相关关系。BOD₅ 在库区与极端降雨指标的相关性整体强于支流，表明库区 BOD₅ 对极端降雨的响应较支流更为敏感。NH₃-N 和 TP 与各类极端降雨指标的相关系数均低于 0.1，未表现出明显相关性。相比之下，TN 在库区与支流中均与除 CDD 外的极端降雨指标呈负相关。在库区，TN 与连续湿润日数（CWD）呈显著负相关（ $P < 0.001$, $r = -0.18$ ）；在支流，TN 则与 Pm 和 R10 表现出显著负相关关系（ $P < 0.001$, $r = -0.12$ ）。

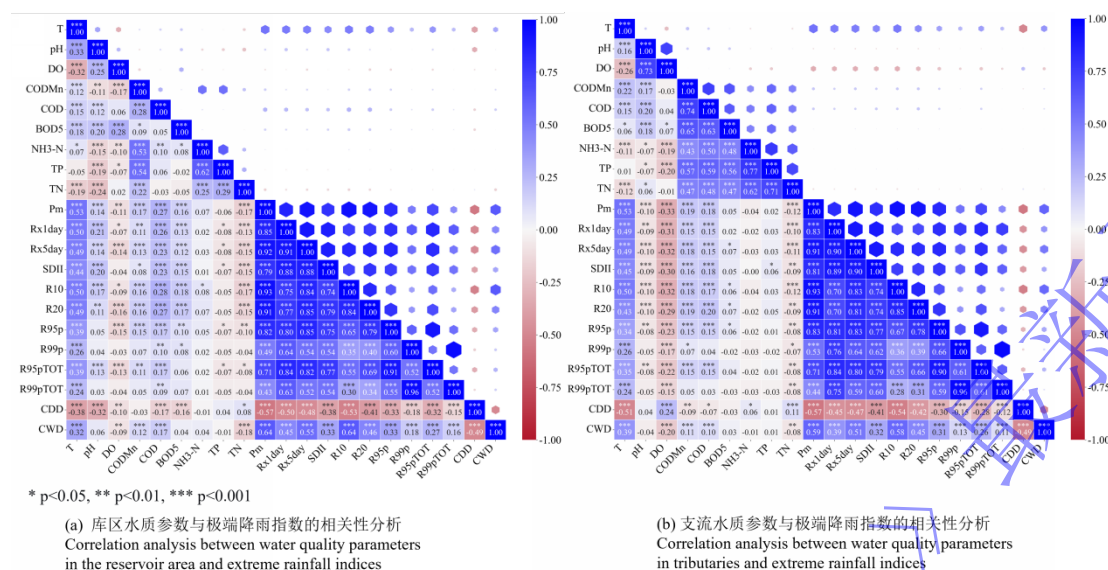


图5 丹江口水库库区与主要支流水质参数与极端降雨指数的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between water quality parameters and extreme precipitation indices in the Danjiangkou Reservoir area and its major tributaries

3 讨论

3.1 丹江口库区水质时空变化特征

本研究显示, 2017—2023 年丹江口库区及其支流的水质变化呈现出明显的时空分异特征。丹江口库区水温整体呈上升趋势, DO 呈下降特征。温度升高通常会降低水体氧溶解度, 并可能强化库区的热分层结构, 从而增加底层水体缺氧风险, 促进内源污染物释放^[18-19]。支流 pH 上升, 而库区 pH 略有下降。支流氮、磷营养盐较高, 藻类光合作用消耗 CO₂, 有助于提升 pH 水平^[20]; 而库区受支流输入的有机物影响更显著, 有机质沉降分解释放 CO₂, 增强水体酸化效应, 加之深水缺氧环境, 可能导致 pH 下降。有机物指标方面, 库区 COD_{Mn} 整体呈下降趋势, 表明库区水体有机物总体负荷较低; 但部分支流 COD_{Mn} 上升, 提示局地仍可能受到生活污水或工业排放的影响^[21]。此外, 库区 BOD₅ 显著上升而 COD_{Mn} 同期下降, 暗示输入库区的外源有机物中可降解组分比例较高, 可能与生活污水或农业面源污染有关^[22]。营养盐方面, NH₃-N 与 TP 的整体变化平稳, 但 TN 呈明显上升趋势, 说明流域面源氮污染仍在持续积累。氮污染的长期累积以及局部区域的 NH₃-N、TP 波动特征, 表明丹江口库区及其支流面临的富营养化风险仍不容忽视。总体而言, 库区水质波动幅度相对较低, 而支流对有机物与营养盐变化更为敏感。支流的脉冲式输入特征, 加之库区水体滞留时间较长, 使库区在汛期更易形成营养盐累积并放大其环境效应。

3.2 水质对降雨因子的响应特征及其差异性

相关性分析结果显示, 水质指标对降雨因子(量级、强度、雨日结构等)的响应具有明显差异, 并在库区与支流之间表现出不同模式。水温与多项降雨指数(包括强度与总量)呈显著正相关, 暗示高强度、短历时的降雨过程可能对水温产生显著影响^[23]。pH 在库区与除 CDD 外的降雨指标呈正相关, 而在支流中则整体呈负相关。该差异源于库区与支流水动力条件、径流汇入方式及水体更新速率的不同。库区水体滞留时间长、水量大, 降雨径流携带的碱性物质进入后稀释缓慢, pH 响应呈正相关; 而支流流速快、水量相对较小, 大量酸性雨水的直接稀释效应占主导, 迅速降低 pH^[24]。DO 在库区与大强降水日数(R20)及其他降雨强度指标呈显著负相关, 极端降雨过程与库区 DO 两者具有较强的同步性, 可能是因为强降雨携带大量有机物和氮类营养盐进入库区并在静稳水体中被微生物

分解,加剧耗氧过程^[25]。在支流中,DO与降雨指标的负相关关系更为突出,而与CDD呈正相关,反映出干旱期水体透明度提高、光合作用增强,有利于DO水平升高^[26]。有机物指标方面,库区与支流COD_{Mn}和COD均与除CDD外的降雨指数呈正相关,暗示极端降雨可能显著增强了地表冲刷作用并提高了有机物输入强度,降雨径流汇流时可携带腐殖质、植被残体及农业和生活源污染物,使有机物在短时间内集中进入水体^[27]。而干旱期由于缺乏径流输送,该类外源补给作用消失,因此与CDD相关性较弱。相比之下,BOD₅在库区对极端降雨的响应强于支流,反映出库区较长的水体滞留时间有利于生物可降解有机物的持续分解与耗氧过程。营养盐指标中,NH₃-N与TP对极端降雨的相关性整体较弱,可能与外源输入、稀释、沉降及吸附等过程平衡有关^[28]。TN与除CDD外的降雨指数呈负相关,可能是因为在长时间范围里,TN总浓度会在干旱期累积,随后在降雨期间被冲刷带走,因此存在短期稀释效应。需要指出的是,TN的长期上升趋势与其在极端降雨条件下的负相关关系反映了不同时间尺度上的过程差异。在强降雨过程中稀释效应占主导,TN浓度反而呈下降趋势,这与已有研究结果一致^[29]。值得注意的是,库区TN与CWD呈显著负相关($P<0.001$),表明持续湿润条件下水体中无机氮更易被生物吸收,因此水体生产力可能逐渐转向受磷限制^[30],这凸显了控制TP输入在降低藻华风险中的重要性。此外,受径流汇流和污染物迁移过程影响,水质对降雨的响应可能存在一定滞后性。因此,未来需要利用其它分析手段进一步完善相关问题。

4 结论

1) 2017—2023年,丹江口库区及支流水质整体保持稳定,但局部仍存在NH₃-N和TP污染风险。值得注意的是,TN呈持续上升趋势且增幅显著,表明研究期内流域尺度氮污染负荷普遍加重。

2) 库区与支流水质指标对极端降雨的响应具有显著差异性。水温(T)对降雨过程高度敏感;pH在库区与多数极端降雨指数呈正相关,而在支流则表现为负相关;DO在两类水体中普遍随极端降雨增强而下降,但支流DO与CDD呈正相关,有机物指标

(COD_{Mn}、COD)均随极端降雨增强而升高,且BOD₅在库区的响应更强。NH₃-N与TP对极端降雨的敏感性较弱,而TN在库区与支流均呈随降雨增强而下降的趋势,但其主控降雨因子存在差异。

3) 极端降雨通过改变径流规模、输移过程与水体稀释效应,共同驱动库区与支流水质产生差异化响应。因此,在水环境管理与风险评估中,应强化极端降雨情景下污染物输移与营养盐风险的动态识别,并针对库区与支流实施差异化调控措施。在此基础上,未来应构建“气象-水文-水质”耦合的智能预警体系,实现从被动响应向风险预见性调控转变。

5 参考文献

- [1] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, 467: 555-561.
- [2] GOODESS C M. How is the frequency, location and severity of extreme events likely to change up to 2060[J]? *Environmental Science & Policy*, 2013, 27: S4-S14.
- [3] ZHANG Guoshuai, QIN Shunxing, LI Zhonghua, et al. Nonlinear pollution source switching under extreme rainfall revealed by budget-closed graph-based apportionment[J]. *Water Research*, 2026, 302: 126045.
- [4] XU Jing, MO Yuming, JIANG Qihao, et al. Rainfall-dependent influence of water parameter interactions and land use on lake water quality: A hybrid ensemble approach and management implications[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 662: 134019.

- [5] SUN Qiming, GAO Maosheng, HOU Guohua, et al. Response of hydrodynamics and hydrochemistry at multiple-water quality interfaces to extreme rainfall on a muddy coast[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 513: 145746.
- [6] DOU Jinghui, XIA Rui, XIA Xinghui, et al. Extreme rainfall drives the shift in dominant water quality "Sink" from forest land to grassland in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 658: 133218.
- [7] CHIN D A. Rainfall event separation and determination of the water quality volume[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 642: 131881.
- [8] MIRANDA F S M, AVELAR A S. Water quality modulations under influence of rainfall and land cover in a mountain basin in southeast Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2025, 154: 105403.
- [9] JIA Ziliang, CHANG Xuan, DUAN Tingting, et al. Water quality responses to rainfall and surrounding land uses in urban lakes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113514.
- [10] HU Bingtao, LIU Yuhong, CHEN Yixue, et al. Water quality and pollution source apportionment responses to rainfall in steppe lake estuaries: A case study of Hulun Lake in northern China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 168: 112791.
- [11] 王璨, 李一平, 李聂贵, 等. 南方水库热分层消亡时期水体混合特征及其驱动机制[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1613-1622.
- WANG Can, LI Yiping, LI Niegui, et al. Characteristics and mechanism of water mixing structure during the extinction of thermal stratification in southern reservoirs[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1613-1622.
- [12] 张胜, 苏紫颖, 林莉, 等. 泄洪对典型有机污染物迁移转化行为的影响——以丹江口水库为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 108-117.
- ZHANG Sheng, SU Ziyang, LIN Li, et al. The influence of flood discharge on the migration and transformation of typical organic pollutants: A case study on the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 108-117.
- [13] NONG Xizhi, YI Xianjie, CHEN Lihua, et al. A holistic water quality risk assessment and key parameter identification approach coupling comparative water quality index (WQI) models: a six-year monitoring study in Danjiangkou Reservoir, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2024, 83 (20): 588.
- [14] 赵康平, 杨文杰, 沙健, 等. 丹江口水库水体营养状态空间特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(3): 51-58.
- ZHAO Kangping, YANG Wenjie, SHA Jian, et al. Spatial characteristics of nutrient status in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(3): 51-58.
- [15] LI Weijia, CHEN Xiaoqiang, XU Shiguo, et al. Effects of storm runoff on the spatial-temporal variation and stratified water quality in Biliuhe Reservoir, a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31: 19556-19574.
- [16] HU Jinlong, MIAO Chiyuan, SU Jiajia, et al. An upgraded high-precision gridded precipitation dataset for the Chinese mainland considering spatial autocorrelation and covariates[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17 (8): 3987-4004.
- [17] BOUZA-DEAO R, TERNERO-RODRÍGUEZ M, FERNÁNDEZ-ESPINOSA A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain)[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 361(3-4): 227-239.
- [18] ZHANG Yuanning, GAO Xueping, SUN Bowen, et al. Oxygen evolution and its drivers in a stratified reservoir: A supply-side perspective for informing hypoxia alleviation strategies[J]. *Water Research*, 2024, 257: 121694.
- [19] 黄丁阳, 林莉, 潘雄, 等. 基于溶解氧需求侧视角的丹江口水库热分层期溶解氧垂向分布特征及其成

- 因[J]. 湖泊科学, 2025, 37(3): 902-915.
- HUANG Dingyang, LIN Li, PAN Xiong, et al. Characteristics of vertical distribution and causes of dissolved oxygen during thermal stratification in Danjiangkou Reservoir based on the perspective of dissolved oxygen demand side[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(3): 902-915.
- [20] ZHANG Wenke, WANG Wanfa, XU Sen, et al. Effectively mitigated eutrophication risk by strong biological carbon pump (BCP) effect in karst reservoirs[J]. Water Research, 2025, 278: 123395.
- [21] 高雯媛, 邹霖, 朱俊毅, 等. 湖南省地表水水质时空变化特征及驱动因子分析[J]. 环境工程, 2024, 42(08): 17-24.
- GAO Wenyuan, ZOU Lin, ZHU Junyi, et al. Temporal and spatial variation characteristics and driving factors of surface water quality in Hunan province, China[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(08): 17-24.
- [22] 袁航飞, 姚志宏, 雷俊山, 等. 丹江口水库上游典型小流域农业面源氮磷污染负荷估算[J]. 中国水土保持科学, 2026, 24 (3) : 84 – 98.
- YUAN Hangfei, YAO Zhihong, LEI Junshan, et al. Estimation of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus pollutionload in a typical small watershed upstream of Danjiangkou Reservoir[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026, 24 (3) : 84 – 98.
- [23] 华逢耀, 黄廷林, 李楠, 等. 不同强度降雨径流对水源水库热分层和水质的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(03): 1234-1242.
- HUA Fengyao, HUANG Tinlin, LI Nan, et al. Influence of rainfall runoff with different intensities on thermal stratification and water quality of water source reservoir[J]. China Environmental Science, 2021, 41(03): 1234-1242.
- [24] 王登超, 李发东, 李曹乐, 等. 降雨对河流水质影响及污染源解析: 以鉴江茂名段为例 [J]. 环境科学, 2025, 46 (04): 2165-2178.
- WANG Dengchao, LI Fadong, LI Caole, et al. Impact of Rainfall on River Water Quality and Source Identification: An Example in the Maoming Section of the Jianjiang River[J]. Environmental Science, 2025, 46 (04): 2165-2178.
- [25] 张彦, 邹磊, 梁志杰, 等. 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(05): 2537-2547.
- ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhijie, et al. Differential characteristics and source identification of water quality of the rivers in northern Henan before and after rainstorm[J]. Environmental Science, 2022, 43(05): 2537-2547.
- [26] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. 环境科学, 2018, 39(02): 774-782.
- LIU Xinyuan, SONG Linxu, JI Daobin, et al. Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and Its mechanism analysis[J]. Environmental Science, 2018, 39(02): 774-782.
- [27] 辛苑, 李萍, 吴晋峰, 等. 强降雨对北运河流域沙河水库水质的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(01): 199-208.
- XIN Yuan, LI Ping, WU Jinfeng, et al. Impacts of heavy rainfall on the water quality of Shahe Reservoir in the North Canal Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(01): 199-208.
- [28] JIANG Yan, BAO Xin, HUANG Zhengfang, et al. Identification of pollutant delivery processes during different storm events and hydrological years in a semi-arid mountainous reservoir basin[J]. Science of The Total Environment, 2023, 883: 163606.
- [29] 唐誉硕, 王仕琴, 吕嘉丽, 等. 府河至白洋淀沿线水体氮磷时空变化及对极端降雨的响应[J]. 湖泊科学, 2025, 37(5): 1593-1603.

TANG Yushuo, WANG Shiqin, LV Jiali, et al. Spatiotemporal characteristics of nitrogen and phosphorus in water from Fu River to Lake Baiyangdian and their response to extreme rainfall[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(5): 1593-1603.

- [30] XU Hai, ZOU Wei, ZHU Guangwei, et al. Impoundment-induced stoichiometric imbalance exacerbated phosphorus limitation in a deep subtropical reservoir: Implications for eutrophication management[J]. Water Research, 2025, 269: 122787.