

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.025; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.025.

童凯, 赵银军, 胡宝清, 等. 平陆运河建设前极端降水对广西北部湾钦江输沙量影响[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 39-45.

Tong Kai, Zhao Yinjun, Hu Baoqing, et al. Impact of extreme precipitation on sediment discharge in Qinjiang River of Beibu Gulf in Guangxi before construction of Pinglu Canal[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 39-45.

平陆运河建设前极端降水对广西北部湾 钦江输沙量影响

童凯^{1,2,5}, 赵银军^{1,2}, 胡宝清^{1,2}, 黄夏坤³,
邓建明³, 潘嘉嘉⁴, 刘惠雯⁴, 肖大远⁴

(1. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001;

2. 南宁师范大学 广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; 3. 广西壮族自治区水文中心,

南宁 530023; 4. 广西沿海水文中心, 广西 钦州 535000; 5. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098)

摘要: [目的] 探究极端降水对广西北部湾钦江输沙量影响, 为平陆运河工程建设和该区域河流管理提供重要科学依据。[方法] 采用RCLimDex模型、Pettitt突变检验和双累积曲线等方法分析工程建设前(1961—2021年)钦江流域极端降水和输沙量变化特征, 量化极端降水对输沙量变化影响。[结果] (1) 钦江流域R1day, R5day, R99p和PRCPTOT极端降水指数呈下降趋势, 其他指数(R10 mm, R25 mm, R95p, CWD和SDII)呈上升趋势, 且所有趋势均不显著。(2) 1961—2021年输沙量呈显著减少趋势(-0.445万t/a), 并在1998年发生突变。[结论] 极端降水指数与输沙量均呈显著相关性, R95p与输沙量相关性最强, 双累积曲线计算其对输沙量减少的贡献为-25.7%。

关键词: 输沙量; 极端降水; 钦江; 平陆运河

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0039-07

Impact of extreme precipitation on sediment discharge in Qinjiang River of Beibu Gulf in Guangxi before construction of Pinglu Canal

Tong Kai^{1,2,5}, Zhao Yinjun^{1,2}, Hu Baoqing^{1,2}, Huang Xiakun³,
Deng Jianming³, Pan Jiajia⁴, Liu Huiwen⁴, Xiao Dayuan⁴

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education,

Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes

and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 3. Hydrology Center of

Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China; 4. Guangxi Coastal Hydrology Centre, Qinzhou,

Guangxi 535000, China; 5. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the impact of extreme precipitation on sediment discharge in the Qinjiang River of the Beibu Gulf in Guangxi, thereby providing important scientific support for the construction of the Pinglu Canal project and river management in this region. [Methods] The RCLimDex model, Pettitt test, and double mass curve method were used to analyze the variation characteristics of extreme precipitation and sediment discharge in the Qinjiang River Basin before the project construction during 1961—2021, and to quantify the impact of extreme precipitation on sediment discharge. [Results] (1) The extreme precipitation indices R1day, R5day, R99p, and PRCPTOT in the Qinjiang River Basin showed decreasing

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-03-28

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 广西自然科学基金(2025GXNSFAA069302); 国家自然科学基金项目(42161005, 52469003)资助; 河海大学水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金资助项目(2023491511)

第一作者: 童凯(1982—), 男, 湖南沅江人, 博士, 副教授, 主要从事流域水文过程研究。E-mail: ktong@nnu.edu.cn

通信作者: 赵银军(1979—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 主要从事流域系统科学研究。E-mail: yinjunzhao@nnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

trends, while other indices (R10 mm, R25 mm, R95p, CWD, and SDII) showed increasing trends. All these trends were statistically insignificant. (2) The sediment discharge exhibited a significant decreasing trend (4.45×10^3 t/a) from 1961 to 2021, with an abrupt change occurring in 1998. [Conclusion] The extreme precipitation indices are significantly correlated with sediment discharge, with the strongest correlation observed between R95p and sediment discharge. The contribution of R95p to the reduction in sediment discharge is calculated to be -25.7% using the double mass curve.

Keywords: sediment discharge; extreme precipitation; Qinjiang River; Pinglu Canal

“世纪工程”平陆运河是新中国首个连通江海的运河工程,是西部陆海新通道的骨干工程,是加快建设交通强国的标志性工程,对推动广西及西南地区发展具有战略意义^[1-2]。工程于2022年8月开工建设,起点为南宁横州市西津库区平塘江口,经钦州灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾,规划全长约134.2 km。平陆运河建设对钦江干支流进行大幅度拓宽疏浚和多次裁弯取直,造成河道平面和纵向形态变化,改变流域原有的水文特性,对河道行洪和泥沙输送产生较大影响^[3-6]。

降水是影响流域径流和产沙过程最直接的因素之一,而极端降水对土壤的侵蚀和破坏性更强,因此分析极端降水对流域输沙量的影响非常重要^[7-9]。广西极端降水呈现从东南向西北递减的趋势^[10-11]。广西平均每年出现台风极端强降水年平均日数为7.8 d^[12],1960—2014年广西沿海热带气旋最大日降水大于50 mm和250 mm的频次分别为180次和43次^[13]。学者们在广西北部湾入海河流开展了降水对径流泥沙影响的相关研究^[14-15],然而鲜见关于极端降水对入海河流输沙量影响的研究。平陆运河建成后,钦江流域水沙过程将发生重大变化,因此本文开展平陆

运河建设前极端降水对钦江输沙量影响研究具有重要理论和现实意义。

1 数据和研究方法

1.1 钦江流域概况

钦江仅次于南流江为广西北部湾第二大入海河流。陆屋水文站(108°57'E,22°17'N)控制集水面积1400 km²,占钦江流域总面积的58.6%,干流河长98 km。收集陆屋水文站1961—2021年输沙量数据,水文站以上流域内唯一国家气象站(灵山站)1961—2021年逐日降水数据。

1.2 研究方法

1.2.1 极端降水 本文选用9个极端降水指标(表1)。极端气候采用FClimDex软件进行计算,该软件由Xuebin Zhang和Feng Yang(加拿大气象局气候研究部)开发与维护。在应用软件处理数据之前,必须确保站点数据以文本格式储存,并按照年、月、日、降水、气温等顺序排列,缺测值统一设为-99.9。软件首先对输入数据进行质量控制,然后进行极端指标的计算。

表1 极端降水指数

Table 1 Extreme precipitation indices

指数(单位)	名称	定义
RX1day (mm)	最大日降水量	一年内最大日降水量
RX5day (mm)	最大连续5日累积降水量	一年内连续5d最大累积降水量
R10mm (d)	中雨日数	一年内日降水量>10 mm的日数
R25mm (d)	大雨日数	一年内日降水量>25 mm的日数
R95p (mm)	强降水量	一年内日降水量>研究时段所有日降水95%分位值的累积降水量
R99p (mm)	极端强降水量	一年内日降水量>研究时段所有日降水99%分位值的累积降水量
CWD (d)	最大连续湿润日数	一年内日降水量≥1 mm的最长连续日数
SDII (mm/d)	降水强度	年降水量与降水日数(日降水量≥1 mm)之比
PRCPTOT (mm)	年降水量	一年内降水日(日降水量≥1 mm)总降水量

1.2.2 Pettitt突变检验 本研究中,采用Pettitt方法^[16]检验钦江输沙量变化。Pettitt检验方法是一种非参数检验方法,不受分布类型限制,计算简便,物理意义明确,不仅可以识别水文序列变异点,还能量化变异点的显著性水平,广泛应用于水文时间序列突变检测^[17-18]。

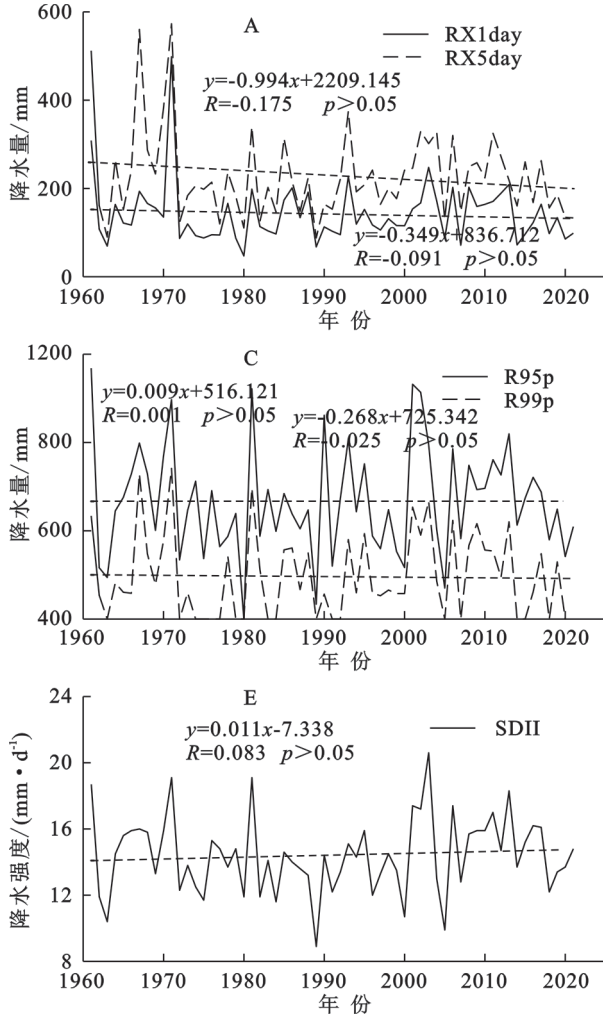
1.2.3 双累积曲线 双累积曲线(Double Mass Curve,

DMC)方法是目前用于水文气象要素一致性或长期演变趋势分析中最简单、最直观、最广泛的方法^[19]。双累积曲线方法的理论基础是分析两个要素(或变量)应具有正比关系。本文通过建立极端降水与输沙量的双累积曲线,分析极端降水和人类活动对输沙量变化的影响。

2 结果与分析

2.1 钦江极端降水特征

由图 1 看出, R1day, R5day, R99p 和 PRCPTOT 指数呈下降趋势, 趋势分别为 -0.349 mm/a 、 -0.994



mm/a 、 -0.268 mm/a 和 -0.105 mm/a ; 其他极端降水指数均呈上升趋势, 趋势分别为 R10mm 和 R25mm 的 0.004 d/a 和 0.024 d/a , R95p 的 0.009 mm/a , CWD 的 0.006 d/a , SDII 的 $0.011 \text{ mm}/(\text{d} \cdot \text{a})$ 。钦江流域所有极端降水指数趋势均不显著。

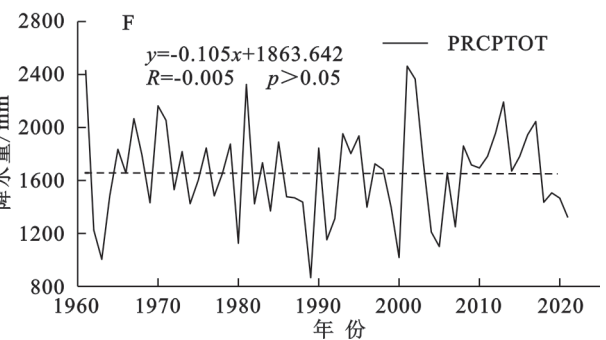
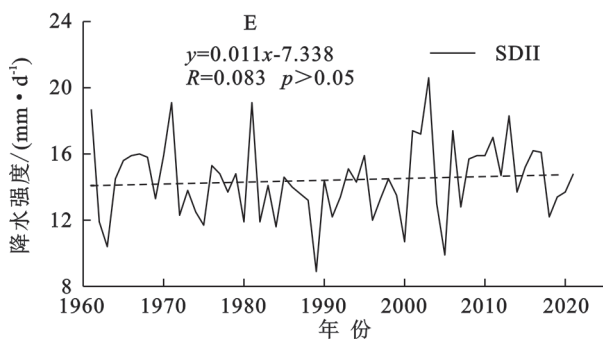
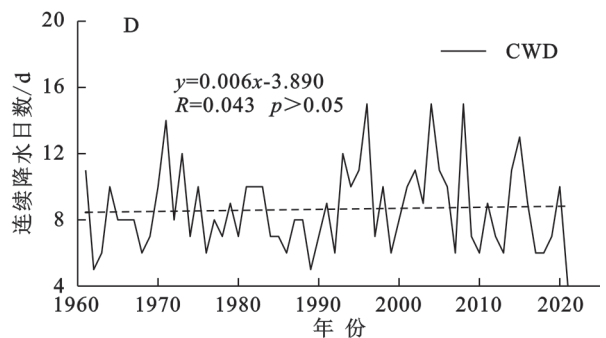
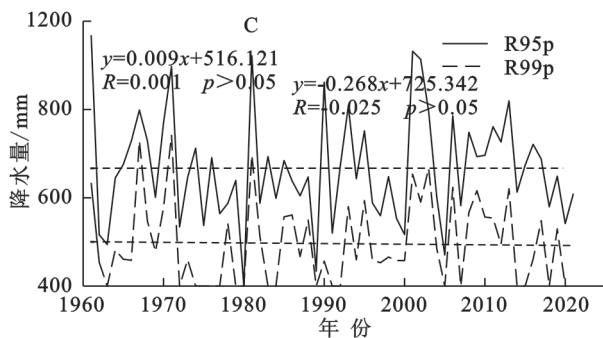
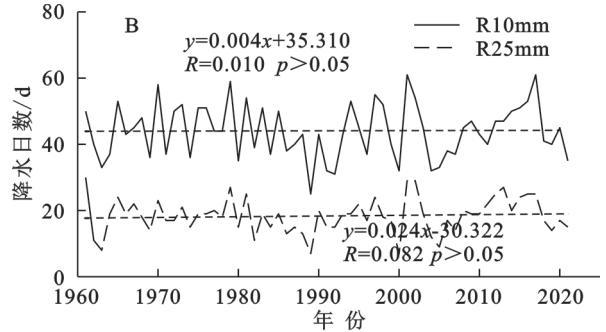


图 1 钦江流域极端降水事件时间序列及趋势

Fig. 1 Time series and trends of extreme precipitation events in Qinjiang River Basin

2.2 钦江输沙量变化

图 2 为钦江陆屋水文站 1961—2021 年输沙量时间序列及 Pettitt 突变检验。输沙量呈显著年际波动变化, 其中最低为 2018 年的 3.45 万 t, 最高为 1981 年的 69.4 万 t, 最高年输沙量是最低年输沙量的近 20 倍。1961—2021 年输沙量呈显著减少趋势, -0.445 万 t/a 。Pettitt 检验发现, 年输沙量 U 值从 1961 年开始呈上升趋势, 于 1998 年达到峰值 632, 之后呈快速回落。1998 年 p 值为 0.000 02, 达到显著性水平, 即钦江年输沙量在 1998 年发生突变。

2.3 钦江极端降水对输沙量影响

图 3 为钦江流域极端降水与年输沙量散点图。各极端降水指数与年输沙量呈较好的正相关性。其中 R95p, RX5day 和 PRCPTOT 指数与年输沙量的相关

性最高, 分别为 0.610, 0.594, 0.573, 达到 0.01 的显著性水平。其他极端降水指数与年输沙量的相关性排序为 $\text{R99p} > \text{RX1day} > \text{SDII} > \text{R25mm} > \text{R10mm} > \text{CWD}$, 相关性最低的 R10mm 和 CWD 也达到 0.05 的显著性水平, 表明钦江流域极端降水对输沙量有显著影响。

根据 Pettitt 检验结果, 将研究时段 (1961—2021 年) 分为突变前后两个时段, 即 1961—1998 年和 1999—2021 年。1961—1998 年期间的累计输沙量为 1 187.995 万 t, 到 2021 年末累计输沙量为 1 516.262 万 t, 前后时段实测年均输沙量分别为 31.263 万 t 和 14.272 万 t, 年均减少 16.991 万 t。选取与年输沙量相关性最高的极端降水指数 R95p 进行双累积曲线分析 (图 4)。

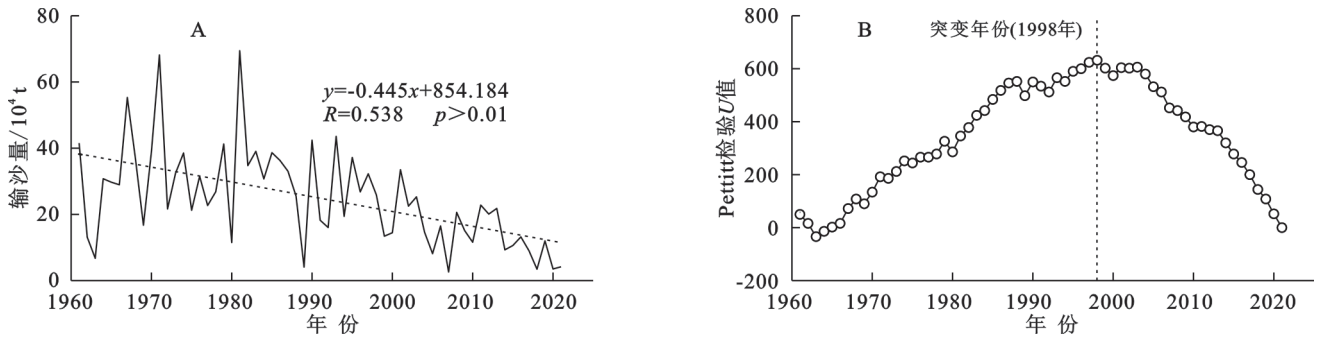


图 2 钦江陆屋水文站输沙量年时间序列及 Pettitt 突变检验

Fig. 2 Annual time series of sediment discharge and Pettitt test at Luwu hydrological station in Qinjiang River

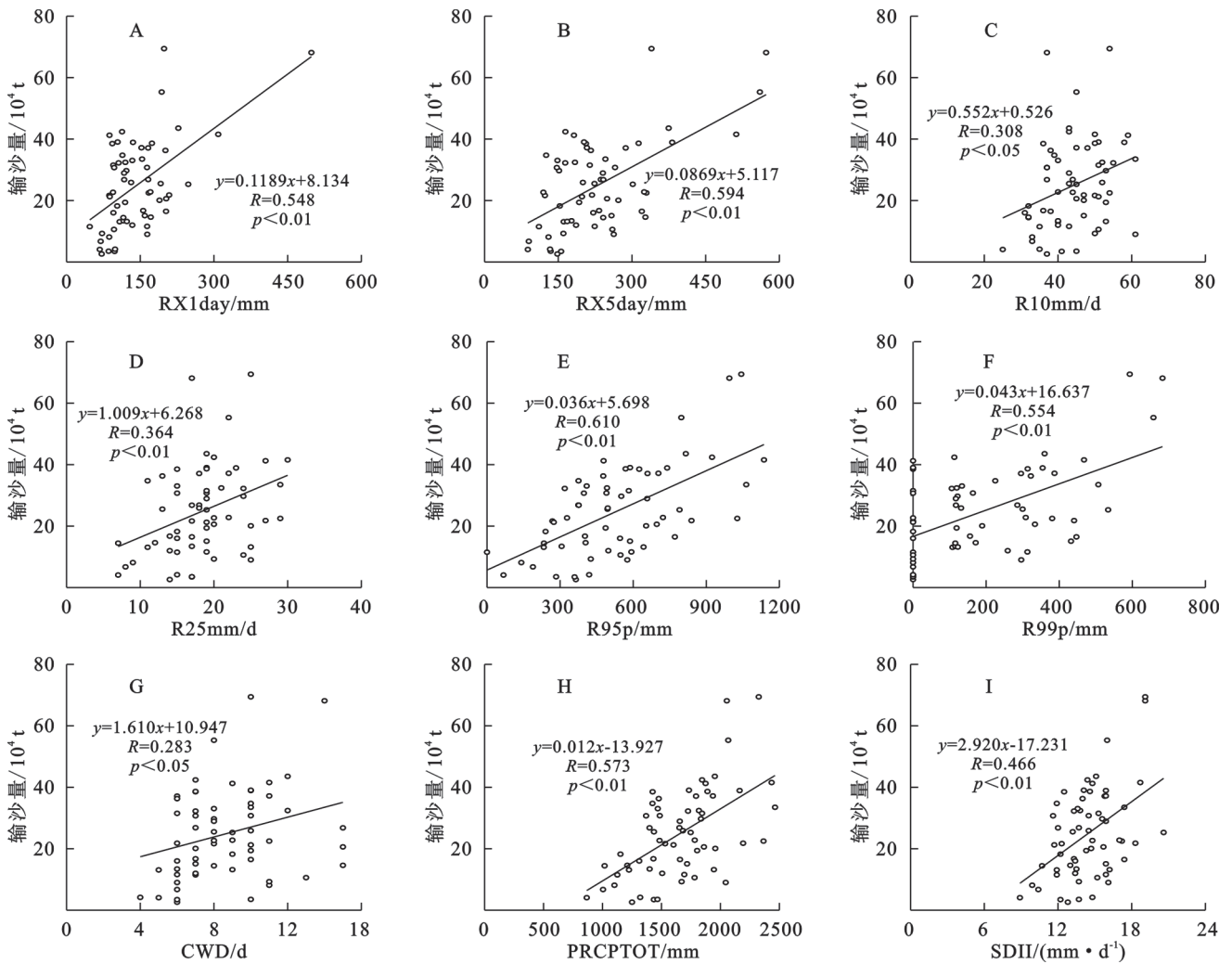


图 3 钦江流域极端降水事件与输沙量散点图

Fig. 3 Scatter plots of extreme precipitation events and sediment discharge in Qinjiang River Basin

累积极端降水与累积输沙量在 1998 年前后两个阶段呈不同斜率, 1961—1998 年累积极端降水 R95p 与累积输沙量斜率为 0.064, 1998 年之后斜率明显下降为 0.025, 表明后一个阶段河流输沙量明显减少。突变前的 1961—1998 年累积极端降水与累积输沙量基本沿着直线分布, 建立线性方程 $y=0.064x-50.802$ (x 和 y 分别代表累计极端降水和累计输沙量)。由方程计算 1961—1998 年累计输沙量为 1 208.747 万 t (年均分别

为 31.809 万 t), 与实测的 1 187.995 万 t (年均 31.263 万 t) 非常接近, 表明线性方程合理; 而以此计算的 2021 年末累计输沙量为 2 040.683 万 t, 即 1999—2021 年累计输沙量为 831.937 万 t, 年均均为 36.171 万 t。根据极端降水 R95p 计算的输沙量, 1999—2021 年相对 1961—1998 年年均增加 4.362 万 t, 与实测年均减少 16.991 万 t 相比即为极端降水对输沙量变化贡献, 即 -25.7% (表 2)。

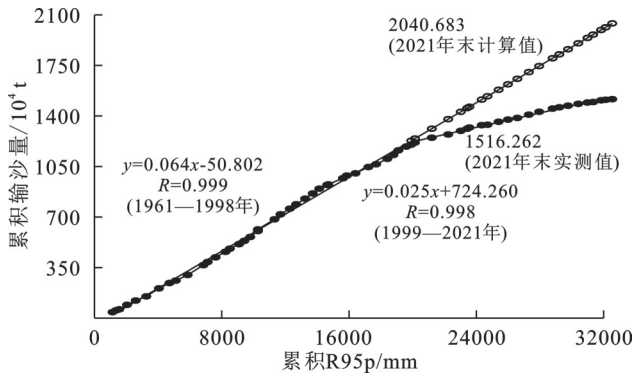


图 4 钦江流域极端降水指数 R95p 与输沙量双累积曲线
Fig. 4 Double mass curves of extreme precipitation index R95p and sediment discharge in Qinjiang River Basin

3 讨论

近年来,全球主要河流水沙通量发生了明显变化,24%的大河呈显著径流量变化,40%的大河呈显著泥沙通量变化,总体上泥沙通量下降 20.8%^[20]。近 60 年来我国九大河流入海泥沙由 19.5 亿 t 下降至 3 亿 t^[21]。学者们利用双累积曲线、气候弹性模型、水文模型等方法对不同河流输沙量变化及其影响因素进行了研究^[22-24]。广西北部湾钦江、南流江近几十年水沙通量呈下降趋势,特别是输沙量下降明显;季节上泥

沙输送主要集中在丰水期^[25-27],且水沙输送受热带气旋影响^[28]。研究表明,降水(气候变化)和人类活动分别是广西北部湾入海河流径流变化和输沙量变化的主要原因^[14-15]。广西北部湾沿海区域受热带气旋等影响,极端降水频发^[12-13]。平陆运河所在的钦江流域所有极端降水指数与输沙量均呈正相关,其中相关性最强的 R95p 呈不显著增加趋势,后一时段(1999—2021 年)年均均为 562.8 mm,高于前一时段(1961—1998 年)年均均为 515.7 mm。在极端降水增强趋势下,如果没有人类活动影响,钦江流域输沙量将增加(计算年均增加 4.363 万 t,表 2),而实测输沙量由 1961—1998 年年均 31.263 万 t 减少为 1999—2021 年年均 14.272 万 t,年均减少了 16.991 万 t。由此钦江流域极端降水 R95p 对输沙量减小贡献为负值(-25.7%,表 2),人类活动是钦江输沙量减少的主要原因。本研究结果与 Zhao 等^[15]利用年降水量与年输沙量双累积曲线计算的结果基本一致(降水对输沙量减少贡献为-36.6%~-14.8%,人类活动(如筑坝、采砂等)导致输沙量减少)。Tong 等^[29]在邻近流域南流江模拟结果表明,大量小型水利设施截留了泥沙,导致河道输沙量减少。

表 2 极端降水 R95p 对钦江输沙量变化影响

Table 2 Impact of extreme precipitation R95p on sediment discharge variation in Qinjiang River

时段	实测累积输沙量/万 t	实测年均输沙量/万 t	R95p 计算累积输沙量/万 t	R95p 计算年均输沙量/万 t
1961—1998 年	1187.995	31.263	1208.747	31.809
1961—2021 年	1516.262		2040.683	
1999—2021 年		14.272		36.171

4 结论

(1) 钦江流域 R1day, R5day, R99p 和 PRCPTOT 极端降水指数呈下降趋势,其他指数(R10mm, R25mm, R95p, CWD 和 SDII)呈上升趋势,且所有趋势均不显著。(2) 1961—2021 年钦江输沙量呈显著减少趋势(-0.455 万 t/a),并在 1998 年发生突变。(3) 钦江极端降水指数与输沙量均呈显著相关性, R95p 与输沙量相关性最强,双累计曲线计算其对输沙量减少的贡献为-25.7%,而人类活动是钦江输沙量减少的主要原因。随着平陆运河的建设,未来将继续关注大型水利工程对流域水沙过程影响。

参考文献 (References):

[1] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6):1-11.
Liu N. Research and contemplation on key issues in con-

struction of Pinglu Canal Project[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(6):1-11.
[2] 国家发展改革委. 西部陆海新通道总体规划[M]. 北京: 国家发展改革委, 2019.
National Development and Reform Commission. Master Plan for the New Western Land-Sea Corridor[M]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2019.
[3] 靳高阳, 何俊. 平陆运河工程对钦江流域防洪的影响与思考[J]. 水利规划与设计, 2023(12):16-18, 43.
Jin G Y, He J. Impact and reflection of the Pinglu canal project on flood control in Qinjiang river basin[J]. Water Resources Planning and Design, 2023(12):16-18, 43.
[4] 陆彦婕, 倪倩, 甘富万, 等. 基于多种 Copula 函数的平陆运河上游郁江段雨洪遭遇综合分析[J]. 水文, 2024, 44(6):44-50.
Lu Y J, Ni Q, Gan F W, et al. Comprehensive analysis of rainfall-flood encounter in the Yujiang River section of the upper Pinglu canal based on multiple Copula functions

- [J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(6):44-50.
- [5] 何俊辉. 平陆运河旧州江支流口泥沙淤积模拟研究[J]. *西部交通科技*, 2023(12):1-2, 60.
He J H. Simulation study on sediment deposition at the tributary mouth of Jiuzhou River in Pinglu Canal [J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2023(12):1-2, 60.
- [6] 原国智, 班文辉, 陆家琨. 平陆运河沙埠江支流口泥沙淤积数值模拟分析[J]. *西部交通科技*, 2023(12):44-46.
Yuan G Z, Ban W H, Lu J K. Numerical simulation analysis of sediment deposition at the tributary mouth of Shabu River in Pinglu Canal [J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2023(12):44-46.
- [7] 周才钰, 何毅, 穆兴民, 等. 黄河中游极端降雨对输沙量影响的时序分析[J]. *人民黄河*, 2019, 41(3):6-10, 15.
Zhou C Y, He Y, Mu X M, et al. Time series analysis of rainfall extremes change on sediment discharge in the middle Yellow River [J]. *Yellow River*, 2019, 41(3):6-10, 15.
- [8] 王晶晶, 莫淑红, 张竞哲. 基于 RClimDex 模型的嘉陵江流域极端降水分析及其对输沙量的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(12):2778-2788.
Wang J J, Mo S H, Zhang J Z. Analysis of extreme precipitation in Jialing River based on RClimDex model and influence on sediment yield [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(12):2778-2788.
- [9] 赵泽坤, 史明昌, 杨润泽, 等. 暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):43-51.
Zhao Z K, Shi M C, Yang R Z, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and soil loss in sloping area under heavy rainfall conditions [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):43-51.
- [10] 孙桂凯, 杜媿, 杨爱萍, 等. 广西极端降水时空变化规律研究[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2021, 46(2):327-335.
Sun G K, Du T, Yang A P, et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation in Guangxi [J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2021, 46(2):327-335.
- [11] 孙桂凯, 马龙, 王熙财, 等. 广西极端降水空间分布特征及重现期分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(8):9-12, 31.
Sun G K, Ma L, Wang X C, et al. Spatial distribution characteristics and recurrence period analysis of extreme precipitation in Guangxi [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(8):9-12, 31.
- [12] 郑凤琴, 王盛繁, 赵金彪, 等. 广西台风极端强降水特征及环境参数异常性分析[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(4):7-13.
Zheng F Q, Wang S F, Zhao J B, et al. Analysis on the characteristics of typhoon Extreme Precipitation and the anomaly of environmental parameters in Guangxi [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2021, 42(4):7-13.
- [13] 夏侯杰, 朱伟军, 任福民. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因初探[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(4):510-518.
Xiahou J, Zhu W J, Ren F M. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes over mainland of the South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(4):510-518.
- [14] 张亚丽, 王栋华, 田义超, 等. 广西北部湾入海流域径流演变特征及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *广西科学*, 2022, 29(5):971-983.
Zhang Y L, Wang D H, Tian Y C, et al. Variation characteristics of runoff in basin entering the sea in the Beibu Gulf of Guangxi and its response to climate change and human activities [J]. *Guangxi Sciences*, 2022, 29(5):971-983.
- [15] Zhao Y J, Wang S, Li J X, et al. Changes in the hydrological and sediment regimes of two neighboring catchments in the past sixty years [J]. *Catena*, 2023, 230:107248.
- [16] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2):126.
- [17] 王永红, 彭锦, 黄畅, 等. 珠江流域下游 1960—2019 年水沙异变诊断及控制因素[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5):21-31.
Wang Y H, Peng J, Huang C, et al. Abnormal changes diagnosis and its control factors of water and sediment discharge in the lower reaches of Pearl River Basin from 1960 to 2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5):21-31.
- [18] 李华东, 曾伽丽, 盘懿霏, 等. 东江流域水沙变化定量归因及对河道冲淤影响研究[J]. *人民珠江*, 2020, 41(9):1-10.
Li H D, Zeng J L, Pan Y F, et al. Quantitative attribution of runoff and sediment changes in the east river basin and impact on erosion and siltation of river channel [J]. *Pearl River*, 2020, 41(9):1-10.
- [19] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. *水文*, 2010, 30(4):47-51.
Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4):47-51.
- [20] Li L, Ni J R, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(1):62-69.
- [21] Wu Z Y, Zhao D N, Syvitski J P M, et al. Anthropogenic impacts on the decreasing sediment loads of nine

- major rivers in China, 1954-2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,739:139653.
- [22] 刘春月,信忠保,秦瑞杰,等.1986—2018年黄土丘陵区典型小流域不同水文年水沙变化[J].*水土保持研究*, 2024,31(1):126-135.
Liu C Y, Xin Z B, Qin R J, et al. Variation of runoff and sediment of the typical watershed in Loess Hilly Region in the different hydrological years during the period from 1986 to 2018 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(1):126-135.
- [23] Wang L, Zhang F, Chen Y, et al. Investigating climate change impacts on runoff and sediment transport processes in the midstream of the Yarlung Tsangpo river based on hydrological simulation [J]. *Catena*, 2025, 254:108920.
- [24] Guo J H, Yue Y, Huai W X, et al. Original vegetation condition and precipitation growth rate bifurcate sediment flux trend on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025,6:90.
- [25] 黎树式,黄鹤.近50年钦江水沙变化研究[J].*广西科学*,2018,25(4):409-417.
Li S S, Huang H. Variations of runoff and sediment in Qinjiang River in the past 50 years [J]. *Guangxi Sciences*, 2018,25(4):409-417.
- [26] Li S S, Dai Z J, Mei X F, et al. Dramatic variations in water discharge and sediment load from Nanliu River (China) to the Beibu Gulf during 1960s-2013 [J]. *Quaternary International*, 2017,440:12-23.
- [27] Li S S, Yang X L, Huang H, et al. Variations in the suspended sediment concentration in mountain-type rivers flowing into the sea in the past 60 years: taking Nanliu River in Beibu Gulf as an example [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022,10:913022.
- [28] Tang R N, Dai Z J, Zhou X Y, et al. Tropical cyclone-induced water and suspended sediment discharge delivered by mountainous rivers into the Beibu Gulf, South China [J]. *Geomorphology*, 2021,389:107844.
- [29] Tong K, Zhao Y J, Wei Y P, et al. Quantifying sediment retention by high-density small water conservancy facilities under insignificant variation of water discharge in the Nanliu River Basin, Beibu Gulf [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022,43:101184.

(上接第38页)

- [24] 周苍宁,王清震,唐恺,等.紫色土坡耕地不同微地形地表汇流网络特征[J].*水土保持学报*,2022,36(2):146-152.
Zhou C N, Wang Q Z, Tang K, et al. Characteristics of surface confluence network in different micro-topography types of purple soil slope farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(2):146-152.
- [25] 李志刚,梁心蓝,黄洪粮,等.坡耕地地表起伏对坡面漫流的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(2):71-77,85.
Li Z G, Liang X L, Huang H L, et al. Effect of surface land fluctuation on overland flow in sloping farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 71-77,85.
- [26] 司登宇,张金池,闵俊杰,等.模拟降雨条件下苏南黄壤产流起始时间及影响因素研究[J].*干旱区资源与环境*,2013,27(5):184-189.
Si D Y, Zhang J C, Min J J, et al. The factors affecting the starting time of slope runoff based on the rainfall simulation for the yellow soil in south Jiangsu [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5):184-189.
- [27] Zhao L S, Fang Q, Hou R, et al. Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns [J]. *Geoderma*, 2021,396:115085.
- [28] 张利超,刘窑军,李朝霞,等.降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表汇流网络特征[J].*水土保持研究*,2019,26(1):53-60.
Zhang L C, Liu Y J, Li Z X, et al. Characteristics of the soil surface flow networks on red soil sloping farmland under rainfall simulation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(1):53-60.
- [29] Wang S, Strauss P, Yao A, et al. Assessing hydrological connectivity development by using a photogrammetric technique with relative surface connection function (RSCf) in a plot-scale experiment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,73(5):518-532.
- [30] Luo J, Zheng Z C, Li T X, et al. Impact of tillage-induced microtopography on hydrological-sediment connectivity and its hydrodynamic understanding [J]. *Catena*, 2023,228:107168.