



平陆运河新坪水支流 洪枯季水沙输移特性分析*

李睿^{1,2}, 张文^{1,2}, 杨胜发^{1,2}, 甘滨蕊^{1,2}, 吴锦钢^{1,2}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 平陆运河沿线分布众多支流, 支流泥沙进入运河淤积后影响运河的修建及通航安全。新坪水是平陆运河支流来沙防控的重要对象, 为厘清该支流的输沙特点, 结合原位监测与理论分析, 研究不同河流水情中该支流的水沙输移特性, 并基于实测数据, 构建新坪水支流水流输沙率的经验预测方法。结果表明: 新坪水各横断面呈现为宽浅的 U 形, 沿程河床沙粒具有先粗化、后细化的特点; 无降雨时, 洪、枯季新坪水各河段的水流挟沙力大于实测输沙率, 水流可能冲刷河床并向运河输运泥沙; 洪季有降雨时, 新坪水交汇段的水流含沙量显著增大, 导致实测输沙率大于水流挟沙力而可能诱发河床淤积; 新坪水支流的水流输沙率与流量显著正相关。

关键词: 平陆运河; 支流来沙; 含沙量; 水沙监测

中图分类号: U612; TV142

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0114-08

Characterization of flow-sediment transport in Xinpingshui tributary of Pinglu Canal during flood and dry seasons

LI Rui^{1,2}, ZHANG Wen^{1,2}, YANG Shengfa^{1,2}, GAN Binrui^{1,2}, WU Jingang^{1,2}

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center of Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Many tributaries are distributed along the Pinglu Canal, and the aggradation of the sediment transported from them in the canal affects the canal construction and navigation safety. Xinpingshui is an important target in tributary-sediment-control efforts of the Pinglu Canal. For clarifying the sediment transport pattern of Xinpingshui, the flow-sediment transport characteristics in this tributary for different hydrological regimes are investigated on the basis of in-situ monitoring and theoretical analysis. Measured data are applied to propose an empirical prediction method for the sediment transport rate of Xinpingshui flow. The results show that every cross-section of Xinpingshui exhibits a wide and shallow U-shape, with sediment particles of riverbed displaying a pattern of coarsening followed by fining along the river. Without rainfall, the sediment transport capacity in each reach of Xinpingshui is greater than the measured sediment transport rate in both dry and flood seasons, indicating the flow may scour the riverbed and transport sediment to the canal. During the flood season, rainfall can significantly increase the flow sediment content near the confluence of Xinpingshui, resulting in the measured sediment transport rate exceeds the sediment transport capacity, which may cause riverbed aggradation here. The sediment transport rate of Xinpingshui flow is positively correlated with discharge.

Keywords: Pinglu Canal; tributary input sediment; sediment content; flow-sediment monitoring

收稿日期: 2024-09-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 广西科技重大专项资助(桂科 AA23023009); 国家自然科学基金基金项目(52309078); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300727、KJQN202300708)

作者简介: 李睿(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航道水沙动力学。

通信作者: 杨胜发(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航道水沙动力学。E-mail: ysf777@163.com

平陆运河是国家西部陆海新通道的骨干工程,全长约 135 km,开挖沿线分布着众多支流(规模较大的约有 26 条)持续向运河输运悬沙^[1]。由于缺少水文监测资料,这些支流中的泥沙输移特性不清,为开展支流来沙的防控带来困难,影响运河的建设和通航安全。因此,有必要深入研究平陆运河开挖沿线支流的输沙特性,为掌握支流来沙的影响并开展科学的工程防控提供基础。

国内外学者围绕入汇支流中的悬沙输移特性开展了大量研究,如钱宁等^[2]厘清不同水沙条件下的河流悬沙平衡输移规律;陈栋等^[3]基于非均匀悬沙的不平衡输移理论,探明水流挟沙力受悬沙沉速和挟沙力判数的影响规律;de Girolamo 等^[4]基于原位水沙监测,深入研究流量变化对河流悬沙含量的影响规律,建立悬移质含沙量的预测模型;王传贵等^[5]基于水沙资料和理论分析,研究支流水沙变化趋势及驱动因素,揭示人类活动因素与水沙变化的响应规律;王正成等^[6]基于水沙资料,深入探讨支流水文泥沙参量的变化特征及其影响因素,揭示年径流量与年均含沙量的相关关系;叶晨等^[7]基于水文资料和理论分析,得出支流输沙量响应降雨、径流与人类活动的规律。

然而,现有研究多基于实测水沙资料。由于平陆运河沿线各支流无水文站控制,缺少水沙资料支撑支流输沙特性分析。对于此问题,本文以平陆运河新坪水支流为研究对象,基于水沙原位监测深入研究洪枯季该支流的沿程水沙输移特征;结合理论分析,定量揭示该支流中的输沙规律。研究成果为分析平陆运河沿线支流中的输沙特性提供数据及理论支撑,对科学开展运河支流来沙防控具有重要意义。

1 研究区域概况

平陆运河是位于广西壮族自治区的跨流域人工运河,主要通过浚深、拓宽钦江等原生河道并按内河 I 级航道标准建设,包括马道、企石和青年 3 座梯级枢纽^[8]。新坪水为平陆运河右岸的一级支流^[9],位于运河中段,其与运河的交汇口上距企石枢纽约 12 km、下距青年枢纽约 61.1 km,见图 1。新坪水的河道规模较大,流域面积约 100.86 km²,河道两岸覆盖较多植被但边坡上的泥沙基本裸露。由于新坪水所处区域全年雨水充沛(年降雨量可达 1 800 mm)^[10],位于边坡上的泥沙易被雨水侵蚀而进入河道^[11]并向运河输运。

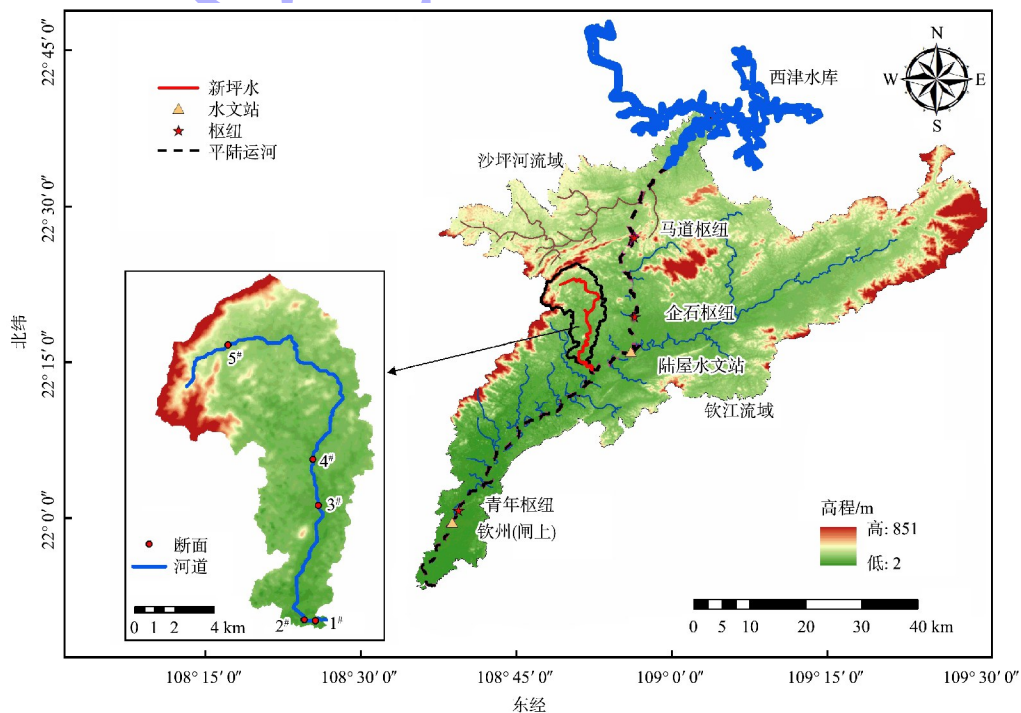


图1 新坪水的空间位置及流域

Fig. 1 Spatial location and watershed of Xinpingshui

陆屋水文站是平陆运河水系中的主要水文站(图1),位于钦江且上距企石枢纽约5 km,控制集雨面积为1 412 km²。该水文站实测数据表明,近50年来钦江流域的水沙通量因人类活动发生显著变化^[12]。因此,在运河修建等强人类活动影响下,运河水系中的水沙输运过程可能进一步变化。由于新坪水位于陆屋水文站的未控区间,无水文资料分析其水沙输运特性,亟待通过原位监测开展进一步研究。

2 水沙原位监测

基于研究目的,于2023—2024年在运河现场开展4次水沙原位监测。首次监测于2023年1月11—14日(枯季、无降雨)进行,整体获取运河沿线26条支流入汇断面处的河道形貌(河宽 B 、比降 J)、水动力条件(流速 v 、水深 h)、床沙级配和水流含沙量(S)等参数;其余监测分别于2023-08-12(洪季、有降雨)、2023-09-24(洪季、无降雨)及2024-01-15(枯季、无降雨)开展,重点测量了新坪水沿程不同断面的上述参数。本文沿新坪水共设置5个监测断面(图1),其中1[#]和2[#]断面位于支流入汇段,3[#]和4[#]断面位于支流输运段,5[#]断面位于支流河源段。

监测过程中,采用激光测距仪测量各河段的河宽 B (误差为 ± 1 mm),采用实时动态载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)测量各河段的横、纵向河床高程(2000国家大地坐标系)。其中,横向高程点沿河宽均匀布置(间隔约1 m),用于刻画横断面形态;纵向高程点沿河道中心线布置(间隔约1 m),用于计算河床比降 J ,见图2。采用水尺测量各断面水深 h (误差为 ± 2 mm),使用LS-300A旋浆式流速仪在各断面中心线上的水下 $0.6h$ ^[13]处获取了断面的平均流速 $\bar{v}$ (3次平行测量结果的均值)。各断面水流含沙量的监测采用浑水取样和密度瓶法^[14]量测相结合的方式进行。浑水取样器为1 L取样瓶,同时也平行准备了清水水样。各监测断面处,采用三点法在 $B/4$ 、 $B/2$ 和 $3B/4$ 的测沙垂线上开展含沙量的预监测,监测结

果发现各测点的水流含沙量较为接近。为此,综合考虑研究测验要求,各断面处的水流含沙量监测在 $B/2$ 测沙垂线上的水下 $0.6h$ 处进行(单点法)。各断面的床沙级配采用原位床沙采集和实验室筛分相结合的方式进行。

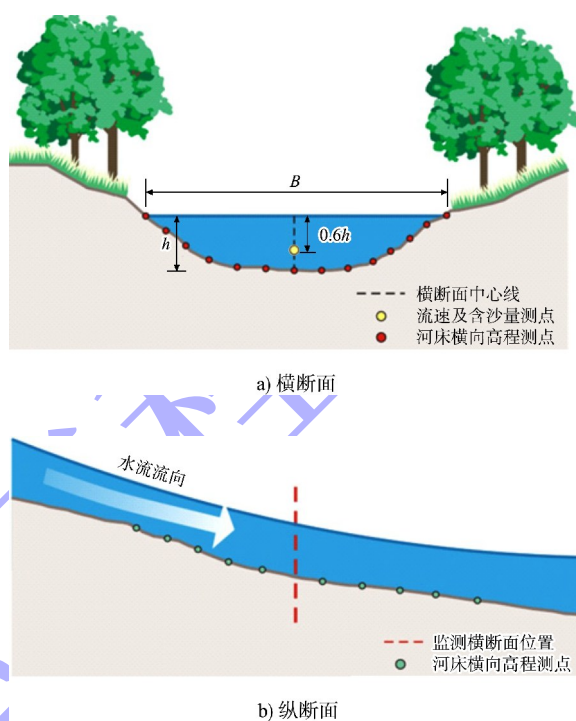


图2 监测参数及测点布置

Fig. 2 Monitoring parameters and layout for monitoring points

水沙监测期间,运河工程全力推进三大枢纽建设,包括新坪水在内的各支流入汇口仅做场地平整而未明显下挖。因此,各期支流水沙数据是在新坪水与运河交汇口情势未剧烈改变的条件下获取的。

3 结果与分析

3.1 不同河段的断面地貌特性

监测结果表明,新坪水不同河段的横断面均呈宽浅U形,且河宽及河床纵比降在测量期间变化较少。其中,河源段平均河宽为8 m,纵坡降为10.8‰,河底高程为55.13 m;输运段平均河宽为13.5 m,纵坡降为7.5‰,河底高程8.56~13.94 m;入汇段平均河宽为16 m,纵坡降为5.3‰,河底高程为1.73~5.24 m。上述实测结果

表明,新坪水支流沿程呈现河床纵坡降下降、河宽逐渐展宽的变化趋势。

监测期间,新坪水不同断面的河床级配也变化较小,见图3。整体上看,各断面的床沙组成较不均匀,中值粒径 d_{50} 为0.23~1.12 mm,属于沙粒。由监测数据发现,河源区(5[#]断面)的床沙最细,现场查勘发现该河段的河床有较厚的淤积覆盖层,因此床面细沙含量最高;输运区中(3[#]和4[#]断面)的床沙粒径较大, d_{50} 为1.01~1.12 mm,几乎没有小于0.1 mm的细沙,且具有河床沿程粗化的变化特性;交汇区附近(1[#]和2[#]断面)的床沙逐渐细化,越靠近交汇口 d_{50} 越低(断面1处 d_{50} 为0.58 mm),小于0.1 mm的细沙含量增大,这可能与交汇区中的悬沙落淤有关。

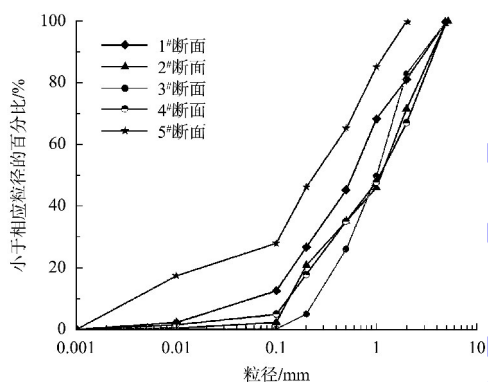


图3 2023年9月新坪水不同河段实测的床沙级配曲线

Fig. 3 Riverbed sediment grading curves measured in different reaches of Xinpingshui in September 2023

3.2 不同河段的水沙动力特性

不同时期新坪水各监测断面的流速及水深特点见图4。由图4a)可看出,新坪水不同断面的流速大小较为接近,且沿程呈现略微增大的趋势。对比洪季的两期监测数据发现,有降雨时各断面的实测流速均略大,为0.2~0.3 m/s。对比洪季和枯季的监测数据发现,枯季时各断面的实测流速大小最低,为0.1 m/s左右。由图4b)可看出,新坪水沿程的水深从左侧的5[#]断面至右侧的2[#]断面而逐渐增大,在靠近干-支交汇区时(1[#]断面),各期实测的水深差异较大,在洪季有降雨时该断面的水深较高,无降雨时水深有所下降且枯季较低。

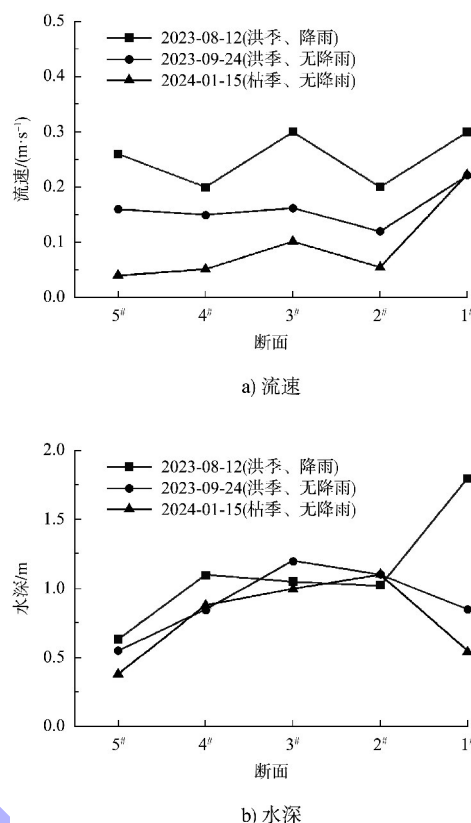


图4 新坪水不同河段流速和水深特点

Fig. 4 Characteristics of flow velocity and depth in different reaches of Xinpingshui

不同时期新坪水中的沿程水流含沙量变化见图5。总体上,由于新坪水支流位于地势较为平缓的河网区,不同断面处水流的含沙量较低(小于1 g/L),但靠近交汇区的水流含沙量略高,表明支流中水流含沙量具有沿程恢复的特点^[15]。还可看出,外界无降雨时洪季和枯季各断面实测的水流含沙量变化较小,集中在0.2~0.4 g/L,但洪季的水流含沙量略高。外界有降雨时,位于河源区(5[#]断面)及输运区(3[#]和4[#]断面)的水流含沙量无明显变化,但位于交汇区(1[#]和2[#]断面)的水流含沙量显著增大。

根据现场情况可知,新坪水河源段和输运段的两岸植被茂密,地表泥沙不易被侵蚀,见图6a),河道中输运的泥沙主要源于支沟的河床表层。然而,交汇区受工程建设场地平整等因素影响,两岸植被被破坏,大量地表泥沙裸露,见图6b);有降雨时,这些地表泥沙可能被雨水侵蚀而汇入河道,补给了河道中输运的泥沙^[16]。因此,交汇

区的水流含沙量受降雨影响较大, 其他河段的水流含沙量较为稳定。

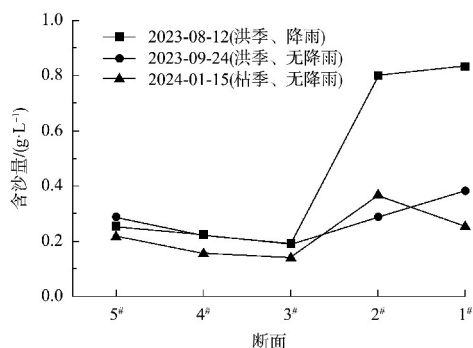


图 5 新坪水中水流含沙量的沿程变化特点
Fig. 5 Variation characteristics of sediment content in flow along Xinpingshui



a) 输运段



b) 交汇段

注: 箭头为水流方向。

图 6 新坪水支流现场

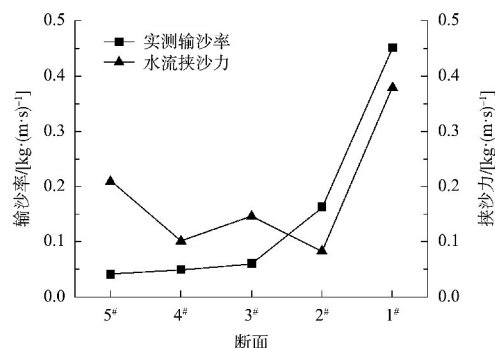
Fig. 6 Scene of Xinpingshui tributary

3.3 支流悬沙运动对水动力条件的响应

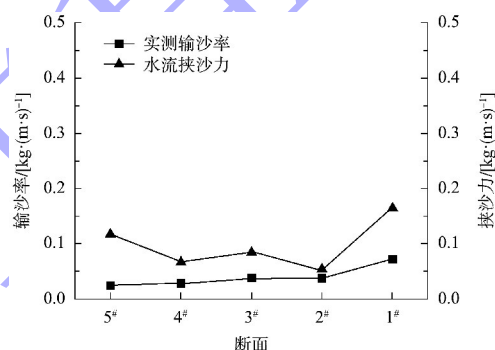
3.3.1 水流挟沙力分析

为进一步展现新坪水各河段的悬沙输移特点, 基于监测的水沙数据计算各时期不同河段中的水流

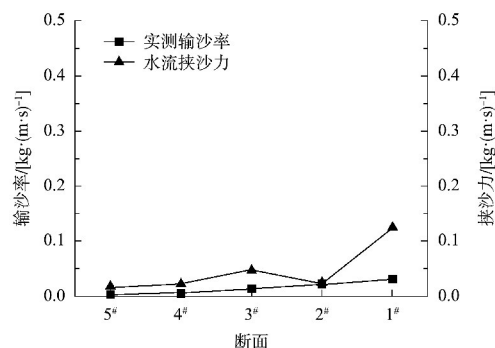
挟沙力, 并将其与实测输沙率进行对比, 见图 7。由于新坪水位于地势平缓的河网区, 输沙量以悬沙为主, 因此采用 van Rijn^[17] 悬沙输沙率公式近似计算水流的挟沙力^[18]。



a) 2023-08-12(洪季、降雨)



b) 2023-09-24(洪季、无降雨)



c) 2024-01-15(枯季、无降雨)

图 7 新坪水各断面水流挟沙力与输沙率关系

Fig. 7 Relationship of sediment transport capacity and sediment transport rate of flow in each section of Xinpingshui

由图 7a) 可看出, 洪季有降雨时, 河源段 (5#断面) 和输运段 (3#和 4#断面) 中水流挟沙力均大于实测输沙率, 表明该时期这些河段中的水流具有冲刷河床的趋势^[19]。被水流冲刷的泥沙随之

向交汇区运动,结合被雨水侵蚀向河道补给的岸边泥沙,交汇区(1#和2#断面)中的水流输沙率超过水流挟沙力,导致该时期这些河段存在河床淤积的态势。交汇区的悬沙落淤也影响了床沙级配,即图3表明的2#断面较1#断面的床沙中值粒径逐渐降低。由图7b)可看出,由于监测中无降雨发生,该时期新坪水各断面的实测输沙率均低于水流挟沙力,表明支流中的水流可能冲刷河床而向运河输运泥沙。由图7c)可看出,枯季中新坪水中水流运动强度有所降低,河源段(5#断面)和输运段(3#和4#断面)中水流挟沙力与实测输沙率较为接近,此时这些河段的河床较为稳定。交汇区附近(1#断面)水流的挟沙力略大于实测输沙率,即枯季新坪水交汇区的水流仍可能冲刷河床并向运河输运泥沙。

3.3.2 输沙率-流量关系

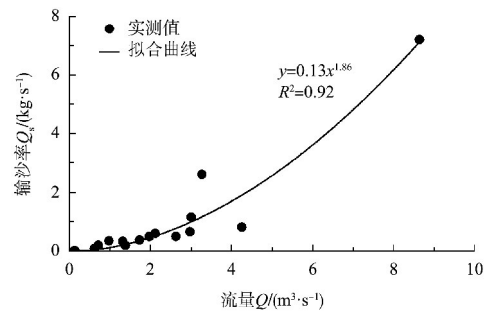
新坪水支流中实测输沙率 Q_s 与流量 Q 的变化关系见图8。由图8a)可看出,新坪水中输沙率随流量增大而逐渐增加,与已有研究的结果相同^[20],故 Q_s 与 Q 的关系可表示为:

$$Q_s = aQ^b \quad (1)$$

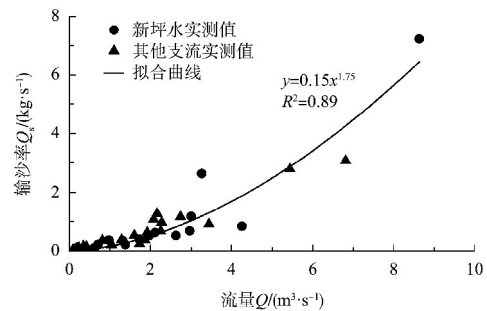
式中: a 、 b 为待定参数,其中 a 与流域内泥沙侵蚀特性有关, b 与河流输沙能力有关^[21]。

基于图8a)的所有数据,拟合得到新坪水中 a 可取 0.13、 b 可取 1.86 ($R^2 = 0.92$),表明新坪水流域中泥沙不易被侵蚀,且新坪水的输沙能力有限,这与新坪水各河段中水流含沙量较低的特点相符(图5);由图8b)可看出,运河沿线支流中 Q_s 随 Q 的变化趋势基本与新坪水中的一致,表明运河沿线各支流的输沙特性较为相似。基于此,拟合所有监测数据后, a 可取 0.15、 b 可取 1.75,此时式(1)仍具有较高精度 ($R^2 = 0.89$)。

图8的 Q_s - Q 关系可为计算新坪水的水流输沙率提供理论支撑,也可为评估平陆运河其他类似支流的水流输沙率提供依据。该 Q_s - Q 关系均基于监测结果,适用于 $0 < Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水文条件,可进一步考虑其他水文条件下的监测结果增强其适用性及可靠性。



a) 新坪水输沙率与流量关系



b) 运河支流输沙率与流量关系

图8 新坪水及运河支流输沙率与流量关系

Fig.8 Relationship between sediment transport rate and discharge in Xinpingshui and canal tributary

4 结论

1) 新坪水不同河段的横断面均为宽浅U形,床沙为级配不均匀的沙粒。河源区—交汇区,新坪水的河道纵比降逐渐变缓,河宽变宽,床沙呈现先粗化、后细化的变化特性。

2) 不同河流水情中,新坪水的流速、水深及水流含沙量均呈现沿程略微增大的趋势。与枯季相比,洪季新坪水各河段的水流含沙量均略微增大,且有降雨时,交汇口附近的水流含沙量易显著增大。

3) 无降雨时,洪、枯季新坪水各河段的水流挟沙力均大于实测输沙率,水流可能冲刷河床并向运河输运泥沙。洪季有降雨时,交汇段中实测输沙率大于水流挟沙力,可能导致河床淤积。

4) 新坪水不同河段的水流输沙率与流量具有一定相关性。基于实测数据,构建新坪水中水流输沙率的经验计算方法,可为新坪水或平陆运河其他类似支流的水流输沙率计算与评估提供依据。

参考文献:

- [1] 欧芳兰, 邓建明, 卢远, 等. 钦江流域历史径流泥沙演变规律分析[J]. 大众科技, 2020, 22(10): 15-17, 28.
OU L F, DENG J M, LU Y, et al. Analysis on the evolution law of historical runoff and sediment in Qinjiang River basin[J]. Popular science & technology, 2020, 22(10): 15-17, 28.
- [2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
QIAN N, WAN Z H. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] 陈栋, 李凌云, 郭小虎. 三峡建库后长江中游非均匀悬移质挟沙力变化[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(8): 1-9.
CHEN D, LI L Y, GUO X H. Changes in non-uniform suspended sediment carrying capacity in middle Yangtze River after the construction of Three Gorges Dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(8): 1-9.
- [4] DE GIROLAMO A M, RICCI G F, ABDELWAHAB O M M, et al. Suspended sediment transport in mediterranean streams: monitoring and load estimation[J]. Water, 2023, 15(15): 2715.
- [5] 王传贵, 梅雪梅, 张国军, 等. 1989—2019 年黄河宁夏段支流水沙变化规律及其驱动因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 844-856.
WANG C G, MEI X M, ZHANG G J, et al. Variation of water and sediment in the tributaries of Ningxia section of Yellow River, China from 1989 to 2019 and their driving factors[J]. Journal of earth sciences and environment, 2023, 45(4): 844-856.
- [6] 王正成, 毛海涛, 申纪伟, 等. 长江上游主要支流水沙特性及其影响因素分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020(1): 126-138.
WANG Z C, MAO H T, SHEN J W, et al. Analysis of water and sediment characteristics in the main tributaries of the Yangtze River and their associated influence factors [J]. Journal of East China Normal University (natural science), 2020(1): 126-138.
- [7] 叶晨, 张正栋, 张杰, 等. 华南湿热区小流域水沙变化及影响因子分析: 以五华河为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1083-1091.
YE C, ZHANG Z D, ZHANG J, et al. Analysis of runoff and sediment change and impact factor in the southern humid area river basin: a case study of Wuhua [J]. Resources and environment in the Yangtze basin, 2017, 26(7): 1083-1091.
- [8] 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 mouth of the Jiuzhou River tributary of the Pinglu Canal[J]. Western China communications science & technology, 2023(12): 1-2, 60.
- [9] 杨亚男, 周世良, 王云莉, 等. 平陆运河新坪水支流汇入口河段通航水流条件优化试验研究[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(3): 92-98, 106.
YANG Y N, ZHOU S L, WANG Y L, et al. Optimization test on navigable flow conditions at confluence of Xinpingshui tributary of Pinglu Canal [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2025, 42(3): 92-98, 106.
- [10] 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. The impact and reflection of the Pinglu Canal project on flood control in the Qinjiang River basin [J]. Water resources planning and design, 2023(12): 16-18, 43.
- [11] 何宇琛, 晋华, 朱博文, 等. 晋西北黄土区土壤侵蚀动态变化及驱动力研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 201-204, 136.
HE Y C, JIN H, ZHU B W, et al. Study on dynamic change and driving force of soil erosion in loess area of Northwest Shanxi Province [J]. Water resources and power, 2024, 42(8): 201-204, 136.
- [12] 莫剑, 卢远, 王丹媛, 等. 广西钦江流域水沙年际变化规律分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 130-138.
MO J, LU Y, WANG D Y, et al. Analysis of interannual water-sediment variation law of Qinjiang River basin in Guangxi [J]. Water resources and hydropower engineering, 2020, 51(1): 130-138.
- [13] 吴持恭. 水力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WU C G. Hydraulics [M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [14] 崔俊华, 孟文芳, 华玉芝, 等. 比重瓶法快速测定高浊水中含砂量[J]. 中国给水排水, 2003, 19(S1): 159-160.
CUI J H, MENG W F, HUA Y Z, et al. Density bottle method for rapid measurement of silt content in high turbid water [J]. China water & wastewater, 2003, 19(S1): 159-160.

- [15] 郭小虎,朱勇辉,黄莉,等.三峡水库蓄水后长江中游河床粗化及含沙量恢复特性分析[J].水利水电快报,2017,38(11):19-24.
GUO X H, ZHU Y H, HUANG L, et al. Analysis of characteristics of riverbed coarsening and sediment concentration recovery in the middle reaches of the Yangtze River after the Three Gorges Reservoir impoundment[J]. Express water resources & hydropower information, 2017, 38(11): 19-24.
- [16] 杨燕华,刘晓强,张明进,等.坝下河段悬移质和推移质沿程冲刷过程研究[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(6):1147-1159.
YANG Y H, LIU X Q, ZHANG M J, et al. Research on the streamwise erosion process of suspended load and bed load below a dam[J]. Journal of basic science and engineering, 2017, 25(6): 1147-1159.
- [17] VAN RIJN L C. Sediment transport, part II: suspended load transport [J]. Journal of hydraulic engineering, 1984, 110(11): 1613-1641.
- [18] 邵学军,王兴奎.河流动力学概论[M].北京:清华大学出版社,2005.
SHAO X J, WANG X K. Introduction to river mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [19] 郭庆超.天然河道水流挟沙能力研究[J].泥沙研究,2006(5):45-51.
GUO Q C. Sediment-carrying capacity in natural rivers[J]. Journal of sediment research, 2006(5): 45-51.
- [20] 傅彦超,王友胜,杨志,等.近30年苦水河水沙变化特征及成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):224-232.
FU Y C, WANG Y S, YANG Z, et al. Analysis of characteristics and causes of water and sediment changes in recent 30 years [J]. Research of soil and water conservation, 2023, 30(1): 224-232.
- [21] 王冰洁,傅旭东.皇甫川流域含沙量-流量关系年内年际变化特性[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):642-651.
WANG B J, FU X D. Intra-and inter-annual variations in the relationship between suspended sediment concentration and discharge of the Huangfuchuan watershed[J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(3): 642-651.

(本文编辑 王璁)

(上接第113页)

- [15] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等.极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J].水利水电科技进展,2021,41(2):28-35.
ZHANG G J, LUO G X Z, ZHU B Y, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Advances in science and technology of water resources, 2021, 41(2): 28-35.
- [16] 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司.常德市鼎城区澧水洪道砂砾石资源勘察报告[R].长沙:湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司,2022.
Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd. Survey report of sand-gravel resources of Lishui floodway in Dingcheng District of Changde City [R]. Changsha: Hunan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Institute Co., Ltd., 2022.
- [17] 湖南化工地质工程勘察院有限责任公司.安乡县澧水河道(陈家嘴河段)砂石储量分析地质勘察报告[R].长沙:湖南化工地质工程勘察院有限责任公司,2021.
Hunan Chemical Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd. Geological Survey report of analysis on sand-gravel reserves of Lishui River (Chenjiauzi segment) in Anxiang County [R]. Changsha: Hunan Chemical Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd., 2021.
- [18] 水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231 - 2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [19] 张冬冬,戴明龙,陈玺,等.荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响[J].水资源保护,2022,38(6):71-80.
ZHANG D D, DAI M L, CHEN X, et al. Influences of topographical change of Jingjiang reach on hydrological situation of Dongting Lake [J]. Water resources protection, 2022, 38(6): 71-80.
- [20] 李炜.水力计算手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2006.
LI W. Handbook of hydraulic calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2006.

(本文编辑 王璁)