

刘子霞, 王红旗, 邹毅, 等. 涉水工程影响下的寨岗河流域山洪灾害多情景模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 15-31. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.002

LIU Zixia, WANG Hongqi, ZOU Yi, et al. Multi-scenario simulation study on flash floods in the Zhaigang River Basin under the influence of hydraulic engineering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 15-31. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.002

# 涉水工程影响下的寨岗河流域山洪灾害多情景模拟研究

刘子霞<sup>1</sup>, 王红旗<sup>1</sup>, 邹毅<sup>1</sup>, 柳杨<sup>2</sup>, 林波<sup>2</sup>, 刘荣华<sup>3</sup>

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东广州 510642; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东广州 510635; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:**【目的】山洪灾害是全球最为常见且破坏力极强的自然灾害之一, 随着气候变化的持续加剧, 山洪暴发的频率及强度显著增加, 使得山洪灾害模拟研究在防灾减灾和风险评估等领域的重要性日益凸显。然而, 单一的水文或水动力模型在山洪模拟时通常存在局限, 且常常忽略了山区涉水工程如桥梁、堰坝等对洪水演进的叠加影响, 导致山洪的易发性及其潜在危害被低估。为提高寨岗河流域山洪灾害模拟的准确性及可靠性。【方法】通过构建水文水动力耦合模型(CNFF-IFMS)开展寨岗河流域山洪灾害模拟研究, 运用耦合模型进一步量化分析防御河段上的三座桥梁(B1、B2、B3)及一座堰坝(W1)在多情景重现期(2 a、5 a、10 a、20 a、50 a及100 a)下的山洪响应机制, 并开展了洪水风险分析与评估。【结果】结果显示: 桥堰建成后, 各重现期下的断面水位相较于无桥堰时均有所上升, 加剧了漫堤风险, 并诱发了回水效应。根据回水效应的强度, 其顺序由强至弱依次为W1、B1、B3和B2; 各重现期下的断面流速相较于无桥堰时均有所降低, 但普遍加大了对工程周边二维区域的冲刷; 各重现期下的淹没面积和区间水深范围相较于无桥堰时均有所增加, 总淹没面积从2~100 a一遇洪水增加了4.732 km<sup>2</sup>, 与无桥堰相比增加了0.046 km<sup>2</sup>。【结论】结果表明: 水文水动力耦合模型较好地反映了流域降雨径流响应及其在山区沟道中的洪水传播机制, 实现了山区洪水在时间和空间上的动态演进。同时, 桥堰等涉水工程的重要性不容忽视, 在一定程度上放大了山洪灾害的影响后果, 亟需将其纳入流域山洪模拟研究范畴以减小模拟结果的不确定性。研究成果可为寨岗河及其他类似山区流域的防灾减灾提供技术支撑与参考。

**关键词:** 山洪灾害; 水文水动力耦合; 涉水工程; 洪水; 风险评估; 气候变化; 降水; 数值模拟

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0015-17



收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-09-09; 录用日期: 2024-09-10; 网络出版日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271095); 广东省水利科技创新项目(2025-08)

作者简介: 刘子霞(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事防洪减灾领域研究。E-mail: 2538786994@qq.com

通信作者: 王红旗(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事防洪减灾、水利信息化等领域研究。E-mail: whqpower@scau.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## Multi-scenario simulation study on flash floods in the Zhaigang River Basin under the influence of hydraulic engineering

LIU Zixia<sup>1</sup>, WANG Hongqi<sup>1</sup>, ZOU Yi<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, LIN Bo<sup>2</sup>, LIU Ronghua<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China;

2. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, Guangdong, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** [Objective] Flash floods are one of the most common and destructive natural disasters globally. With the continuous intensification of climate change, both the frequency and intensity of flash floods have notably increased. Consequently, the significance of flash flood simulation research in the fields of disaster prevention, mitigation, and risk assessment has become increasingly prominent. However, the use of a single hydrological or hydrodynamic model often has limitations in flash floods simulation and frequently overlooks the cumulative effects of hydraulic structures, such as bridges and weirs, on flood progression in mountainous areas. This oversight can lead to the underestimation of flash floods susceptibility and potential risks. [Methods] A coupled hydrological and hydrodynamic model (CNFF-IFMS) was developed to improve the accuracy and reliability of flash flood simulations in the Zhaigang River Basin. The coupled model was further employed to quantitatively analyze the flash floods response mechanisms of three bridges (i. e., B1, B2 and B3) and one weir (W1) located in the river defense sections of the basin under multiple return period (i. e., 2 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a and 100 a). Additionally, flood risk analysis and assessment for the basin were conducted. [Results] After the construction of the bridge and weir, the water levels at the cross-sections during various return periods have all increased compared to the situation without the bridge and weir, exacerbating the risk of overtopping and inducing backwater effects. According to the intensity of the backwater effects, they are ranked from strongest to weakest as W1, B1, B3, and B2. The velocities at the cross-sections during various return periods have all decreased compared to the situation without the bridge and weir, but they have generally increased the scouring of the two-dimensional area around the project. The flooded area and the range of water depth during various return periods have all increased compared to the situation without the bridge and weir. The total flooded area increased by 4.732 km<sup>2</sup> from the 2-year to the 100-year flood event, an increase of 0.046 km<sup>2</sup> compared to the situation without the bridge and weir. [Conclusion] The result indicated that the coupled hydrological and hydrodynamic model effectively reflected the basin rainfall-runoff response and its flood propagation mechanism in mountain gullies, realizing the dynamic evolution of mountain floods in time and space. Moreover, the importance of hydraulic structures such as bridges and weirs cannot be ignored, as they exacerbate the impacts of flash flood disasters to some extent. It is crucial to incorporate these structures into basin flash floods simulation studies to reduce uncertainty in the simulation result. The research can provide technical support and reference for disaster prevention and reduction in the Zhaigang River and other similar mountainous watersheds.

**Keywords:** flash floods; coupled hydrology and hydrodynamics; hydraulic structures; flood; risk assessment; climate change; precipitation; numerical simulation

## 0 引言

山洪是山区流域由降雨引起的突发性、暴涨暴落的地表径流, 为全球最常见且最具破坏性的自然灾害之一, 给人民生命财产安全造成了极大威胁<sup>[1-3]</sup>。近年来, 中国山洪灾害造成的死亡及失踪人口比例占洪涝灾害的70%以上, 是导致洪涝灾害死亡及失踪的主因<sup>[4]</sup>; 1996—2017年, 美国共计发生74 814例山洪灾害, 累积损失高达37亿美元<sup>[5]</sup>; 山洪灾害同样是欧洲面临的主要重大挑战, 其影响的人口数量超过其他任何类型的自然灾害<sup>[6-7]</sup>。随着气候变化等因素的持续影响, 山洪暴发的频率和破坏力不断加剧<sup>[8]</sup>,

为有效治理山洪灾害、保障山区社会安定和经济发展, 开展流域山洪灾害模拟研究是当前构建山洪灾害防御体系的重点工作之一。

当前, 山洪模拟的不确定性仍是灾害管理与评估中极具挑战性和紧迫性的科学问题<sup>[9-14]</sup>。山区河道上涉水工程(如桥梁、堰坝等)的建设是造成模拟不确定性的因素之一, 然而模拟过程中常忽略了其对洪水演进的叠加影响, 导致低估了山洪的易发性及潜在危害<sup>[15]</sup>。随着现代化进程的加速, 涉水工程的建设数量不断增多, 在山区复杂地理环境下面临着的洪水风险挑战日益严峻。河道行洪时, 桥堰易成为水流的障碍物, 引起水流在工程上方形成局部

漩涡、冲刷和剪切等现象,对工程造成不同程度的影响,甚至易导致工程失效<sup>[15-16]</sup>,这既直接影响着桥堰工程自身结构的安全稳定性,也会改变河道行洪的演变规律。

模拟方法的选择亦是影响山洪模拟结果不确定性的关键因素之一。目前开展山洪灾害模拟研究的主要模型可以分为三大类:水文模型、水动力模型、水文水动力耦合模型。水文水动力模型耦合是一个综合水文学和水动力学原理,以预测流域径流和水体流动行为的过程。根据水文与水动力耦合模型交互方式的不同,可分为串联耦合、动态单向耦合和动态双向耦合<sup>[17]</sup>。水文模型通常关注降水、蒸发、渗透和地表径流等过程,可为流域出口或河网提供相应的流量<sup>[18]</sup>,而水动力模型则应用流体力学原理模拟水体在河道中的流速、水位和流向变化,探究各水力要素之间的内在联系与相互作用<sup>[19]</sup>。将水文与水动力模型耦合可克服单一模型的局限性,进而增强山洪事件模拟的可靠性<sup>[17-21]</sup>。李云良等<sup>[22-23]</sup>基于分布式水文模型 WATLAC 和水动力模型 MIKE 21 构建鄱阳湖流域联合模拟模型,再现了鄱阳湖湖泊流域复杂的水文水动力过程,为相似湖泊流域的水文水动力模拟提供了重要参考。沈泽宇等<sup>[24]</sup>通过将水文模型(HEC-HMS)与水动力模型(HEC-RAS)耦合对温德河子流域进行降雨径流-洪水淹没模拟,该耦合模型展现了较高的模拟准确性,可用于实际洪水的预报。郝思佳等<sup>[3]</sup>基于水文模型(FFMS)和水动力模型(IFMS)开展了河南王宗店村“7·20”暴雨山洪的精细化灾后复盘,并强调了此次复盘模拟策略在未来我国山洪灾害的复盘模拟分析及灾后重建中的技术价值。高丹等<sup>[25]</sup>运用水文-水动力模型 Flood Map-Hydro Inundation 2D 动态精细模拟 2022 年“8·18”暴雨山洪灾害发展过程,揭示了模型能较好地模拟干旱区小流域暴雨山洪灾害的整个动态淹没过程。EL-SAOUD 等<sup>[26]</sup>采用水文模型(HEC-1)与二维水动力模型(HEC-RAS 5.0.7)耦合的方法对西班牙赫罗纳河开展了山洪风险模拟,并绘制了洪水淹没风险图。LI 等<sup>[27]</sup>将水文水动力耦合模型应用于山区,并完成了山区洪水模拟和山洪风险绘图。ZEIGER 等<sup>[28]</sup>使用集成建模的方法耦合了水文模型 SWAT 及水动力模型 HEC-RAS 探讨了美国混合土地利用类型流域的水文响应指标,耦合模型得到了较好的应用。综上,在山洪模拟的实际应用中,水文水动力耦合模型因其良好的应用效果和广阔的发展前景受到了重视。然而,耦合模型在山区的普及度

尚需提升,且目前的研究多集中于降雨或下垫面影响机制的模拟,而较少将山区河流中的涉水工程纳入考虑。为了构建能更加合理反映山洪形成与演进过程的耦合模型,目前亟需将山区河流中的涉水工程纳入模型建模范畴,进而为山洪灾害防治工作提供更为坚实的科学支撑。

基于此,本文耦合水文模型与水动力模型对寨岗河流域开展山洪灾害模拟研究,精细化模拟山洪的生成、传播和淹没等过程,并量化分析涉水工程在多情景重现期下对山洪灾害的放大效应,实现流域山洪风险的综合分析与评估。研究对提高山区防灾和减灾能力、健全和完善山洪灾害预防与防治体系等方面具有十分重要的价值。

## 1 研究区概况和数据来源

寨岗河流域地处中国广东省清远市连南瑶族自治县,总流域面积为 409.04 km<sup>2</sup>,河流水系总长为 136 km,河道平均比降为 23.22‰,地形高程范围为 82~1 543 m,地形起伏较大、坡度较陡,为典型的山区地貌,流域覆盖的人口总数约为 13.20 万人,流域概况及测站分布如图 1 所示。本次选取的防御河段总长度为 16.8 km,囊括了河道两岸易受洪水影响的重点防洪村落和农田,村落主要有寨岗镇、新寨村、吊尾村、称架村、万角村、金星村、东升村、官坑村、金光村等。此外,本研究共涉及 4 处涉水工程,其中包括 3 座桥梁,1 处小型堰坝,主要集中在防御河段的中下游处。3 座桥梁均为公路桥,从上游开始依次命名为 B1、B2、B3,堰坝命名为 W1(下同),桥堰工程的分布概况如图 2 所示。对防御河段的涉水的工程位置、尺寸等信息进行详细测量,表 1 为测量成果。

本文使用的数据主要包括基础地理数据、水文气象数据及小流域实地调查数据三大类别。(1)基础地理数据:流域、水系、正射遥感影像数据、1:50 000 DEM、2.5 m 土地利用和植被类型信息数据均来源于中国水利水电科学研究院。(2)水文气象数据:包括 2019 年以来各水文站、雨量站和气象站的降雨量,以及河道的水位、流量记录,数据以小时为时间步长,均来源于广东省防汛保障与农村水利中心。(3)小流域实地调查数据:包括河道及周边地形、涉水工程尺寸等,数据均来自团队实地勘测及调查结果。地形数据坐标系采用了 2 000 国家大地坐标系,高程基准采用 1985 国家高程基准。

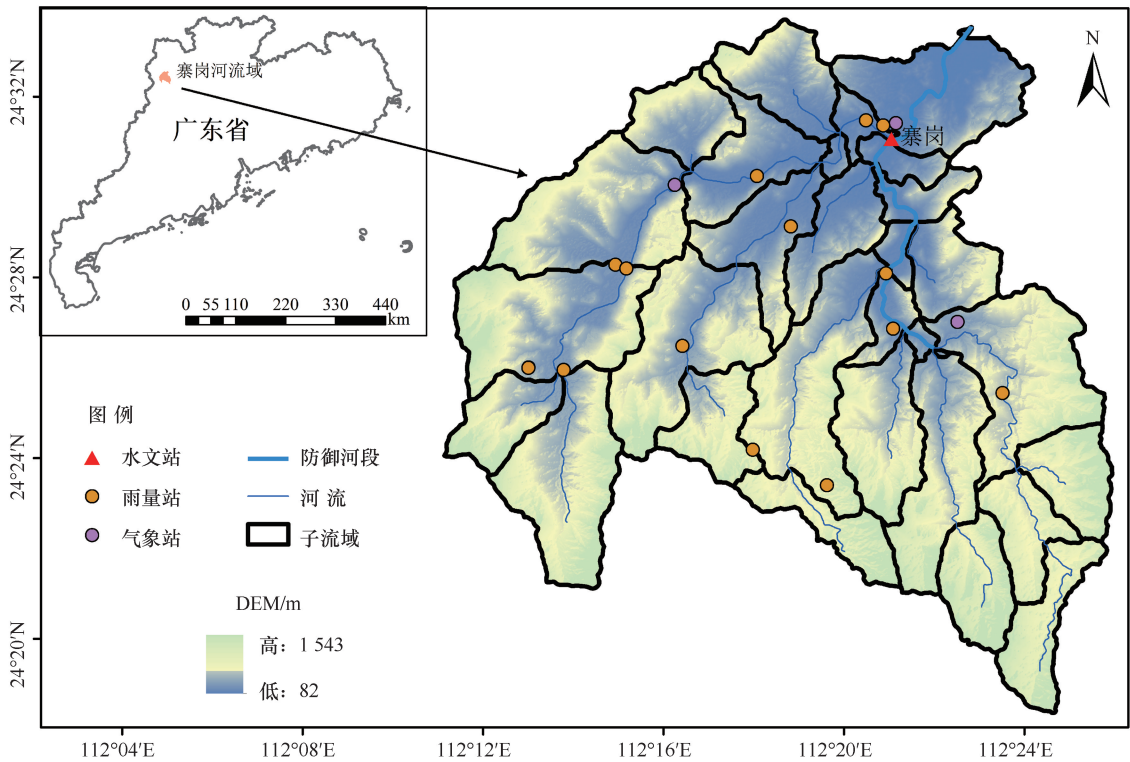


图 1 研究区域及测站概况

Fig. 1 Overview map of research area and stations

表 1 桥堰工程测量成果汇总

Table 1 Summary of survey results for bridges and weir

桥堰编号	类型	x 坐标/m	y 坐标/m	桥长/坝长/m	桥宽/坝宽/m	桥高/坝高/m	桥墩高/m	桥墩形状
B1	公路桥	2 709 115. 19	637 409. 19	55. 40	5. 74	4. 80	3. 00	圆 形
B2	公路桥	2 711 015. 95	636 980. 75	36. 30	3. 84	4. 30	3. 50	矩 形
W1	堰 坝	2 711 279. 90	636 782. 89	71. 90	8. 09	2. 72	—	—
B3	公路桥	2 711 015. 95	637 801. 47	124. 00	15. 59	8. 48	7. 48	圆 形

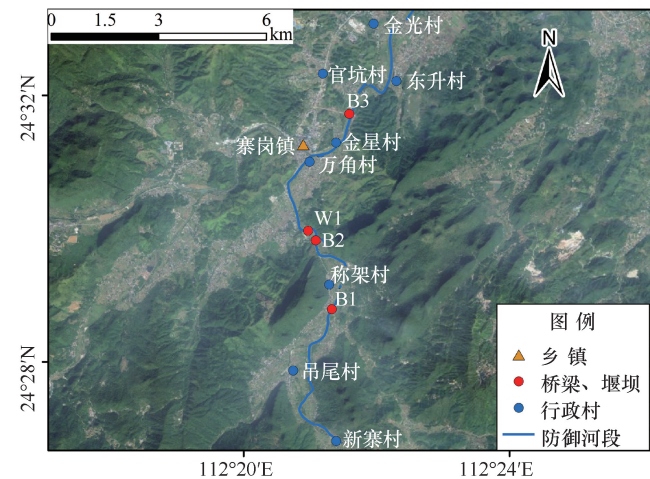


图 2 防御河段中桥堰工程的分布概况

Fig. 2 Overview map of the distribution of bridges and weir in the defended reaches

## 2 水文水动力耦合模型原理

### 2.1 CNFF 水文模型

水文模型采用中国水利水电科学研究院自主研发的中国山洪水文模型 CNFF (China Flash Flood Hydrological Model)<sup>[18-29]</sup>, 该模型可通过整合 7 类水文要素(包括小流域、节点、河段、水源、分水岭、洼地及水库)来构建数字化流域模型, 并以自然小流域为基本计算单元, 模型实现了降雨、蒸发、产流、汇流、演进及水库调蓄等 6 类水文过程的耦合, 支持 10 min、30 min、60 min 等多时段计算时间步长。目前, CNFF 已广泛用于中小流域洪水分析、山洪风险评估及洪水预报预警等方面。本文在模型计算过程中, 以寨岗河小流域为单元配置适合的山洪模拟方案, 产流计算采用三水源蓄满产流法, 汇流计算采用分布式单位线法, 河道洪水演进计算采用变参数动态

马斯京根法。在用 CNFF 进行降雨空间插值时, 基于测站记录的降雨量数据, 选用了泰森多边形插值法, 以计算整个流域的面雨量。

### 2.2 IFMS 水动力模型

水动力模型采用中国水利水电科学研究院自主研发的洪水分析软件 IFMS (Integrated Flood Modeling System)<sup>[30]</sup>, 以此建立河道一维水动力学模型及洪水淹没平面二维浅水模型。本次根据寨岗河防御河段的水动力学特性, 基于圣维南方程建立防御河段一维水动力学模型, 以结构化网格为计算单元, 采用 6 点中心 Abbott-Ionescu 格式的隐式有限差分格式对圣维南方程进行求解, 实现防御河段洪水要素的动态计算, 进而得到各时间步长和网格的洪水流量、水位过程。建立洪水淹没平面二维浅水模型时, 以离散的非结构化网格为计算单元, 采用有限体积法求解洪水通量变化, 来对洪水淹没演进过程的实现动态计算, 进而得到各时间步长和网格的洪水淹没水深、流速等水力信息。

### 2.3 耦合方法

本次采用串联耦合法构建水文水动力耦合模型。在此模式下, CNFF 水文模型作为独立的水文分析工具首先被启动, 对寨岗河流域的水文循环过程进行细致模拟, 涵盖各个子流域的降水、下渗、地表径流以及河网水系的汇聚过程。模型运行完成后, 输出包括各个子流域和主要河道出口断面的流量时间过程, 即流量时间序列。随后, 将流量时间序列数据作为边界条件导入 IFMS 水动力模型中, 同时, 水文模型提供的支流流量被作为集中入流边界条件纳入水动力建模。IFMS 在此基础上独立运行, 对河道及其周边二维平面区域的水流动态进行模拟。通过解析流体力学方程, IFMS 能够模拟出洪水演进过程中的流速、水位变化及洪水淹没范围等关键水动力学参数, 从而实现水文水动力模型耦合。

## 3 水文水动力耦合模型构建

### 3.1 CNFF 水文模型构建及参数率定

本次寨岗河流域总建模面积为 409.04 km<sup>2</sup>, 共被划分为 29 个子流域, 并对小流域提取了空间属性、土地利用、土壤类型等流域基础信息。对流域的降雨、洪水及测站等数据进行标准化处理, 构建了寨岗河流域模型底图, 并依据其上下游关系将小流域联系起来, 建立了完整的拓扑水系结构。流域土地特征包含土壤类型、土壤质地和土地利用三大属性, 本次绘制了该流域多样化的土地特征图, 如图 3 所示。经统

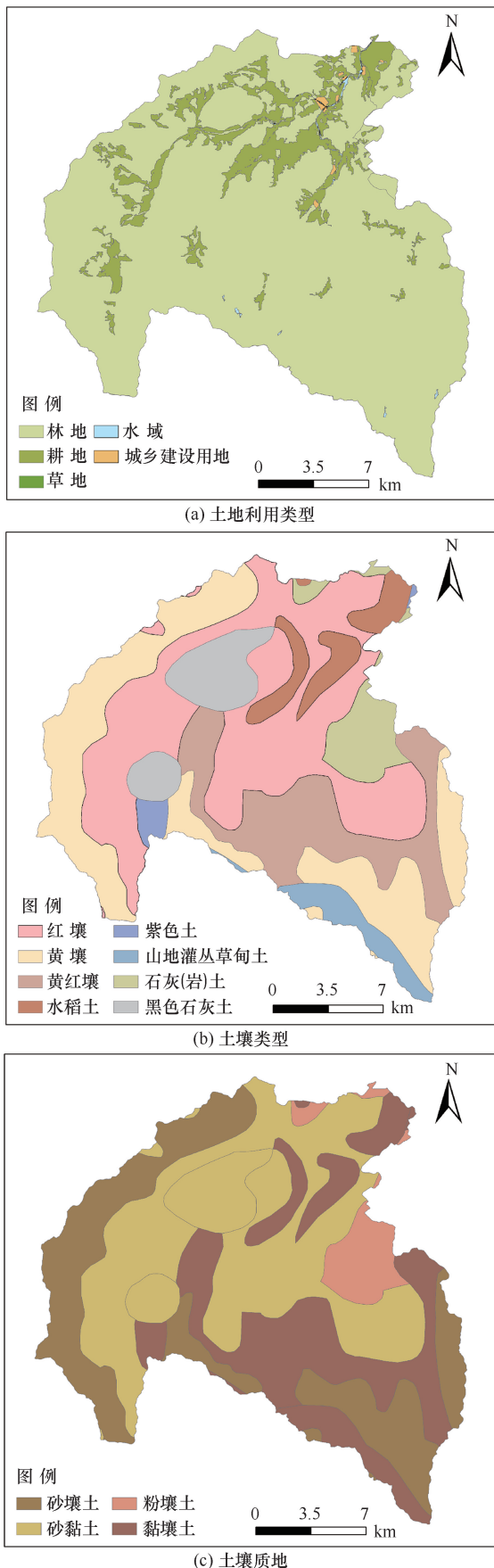


图 3 寨岗河流域土地特征

Fig. 3 Maps of land characteristics in the Zhaigang River Basin

表 2 CNFF 水文模型率定期和验证期结果

Table 2 Results of calibration and validation periods under the CNFF hydrological model

时 期	场 次	降雨量/mm	净雨/mm	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时间误差/h	纳什效率系数
率定期	20190505	94.3	50.7	-3.1	8.9	-1	0.81
率定期	20190708	85.7	46.3	-4.4	-4.2	-1	0.75
率定期	20200609	74.5	42.8	-4.3	-3.4	-1	0.89
率定期	20210520	86.2	63.7	2.6	-5.9	0	0.95
率定期	20220621	424.9	358.7	-4	-4.2	-1	0.91
率定期	20220704	101.5	54.1	5.1	-7.2	2	0.70
验证期	20190613	111.4	62.1	-8.2	-7.9	1	0.80
验证期	20200607	128.2	57.1	-3.1	2.5	-1	0.82
验证期	20220220	91.3	51.3	-3.5	9.8	1	0.77
验证期	20220613	66.5	28.4	0.5	-3.1	0	0.94

注：洪峰流量和峰现时间采用最大洪峰数据进行比较，且当峰现时间误差为正时，表示峰现时间延后，为负时表示峰现时间提前，下同。

计，流域土地利用类型以林地为主，占总流域面积的 87.62%，其次为耕地，占比为 11.89%；土壤类型以红壤和黄壤为主，分别占总流域面积的 35.74%、26.16%；土壤质地以砂黏土为主，占总流域面积的 42.61%，其次为砂壤土和黏壤土，占比分别为 26.16%、5.88%。

通过重现 2019—2022 年间 10 场历史洪水场次对 CNFF 水文模型进行率定与验证。随机选取其中的 6 场降雨用于模型率定，剩余 4 场降雨用于模型验证。径流深相对误差 ( $RER$ )、洪峰流量相对误差 ( $REQ$ )、峰现时间误差 ( $TP$ ) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 ( $NSE$ ) 四个指标共同构成洪水模拟精度的多维度评价体系，其评估场次洪水模拟精度最优值分别为 0%、0%、0 h 和 1，许可误差限分别取为  $\pm 20\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 2$  h 和  $\geq 0.60$ ，指标相关计算公式为

$$RER = \frac{\bar{R}_s - \bar{R}_o}{\bar{R}_o} \quad (1)$$

$$REQ = \frac{Q_{p,s} - Q_{p,o}}{Q_{p,o}} \quad (2)$$

$$TP = T_{p,s} - T_{p,o} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (Q_{i,s} - Q_{i,o})^2}{\sum_{i=1}^T (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

式中， $\bar{R}_s$  和  $\bar{R}_o$  分别为模拟和实测平均径流深 (mm)； $Q_{p,s}$  和  $Q_{p,o}$  分别为模拟和实测洪峰流量 ( $m^3/s$ )； $T_{p,s}$  和  $T_{p,o}$  分别为模拟和实测峰现时间 (h)； $Q_{i,s}$  和  $Q_{i,o}$  分别为  $i$  时刻的模拟和实测流量 ( $m^3/s$ )； $\bar{Q}_o$  为实测流量均值 ( $m^3/s$ )； $T$  为次洪总历时 (h)。

如表 2 所列，10 场洪水的合格率为 100%，其中平均径流深相对误差绝对值为 3.88%，平均洪峰流量相对误差绝对值为 5.71%，平均峰现时间误差绝

对值为 1 h，平均 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.83，表明 CNFF 水文模型模拟效果较好，CNFF 模型参数率定结果如表 3 所列。

表 3 CNFF 水文模型参数率定结果

Table 3 Results of parameter calibration under the CNFF hydrological model

参数符号	参数名	参数取值	参数下限	参数上限
B	蓄水容量分布曲线指数	0.2	0	1
IMP	不透水面积比例	0.01	0	1
WUM	上层土壤蓄水容量	15	0	20
WLM	下层土壤蓄水容量	70	0	90
WDM	深层土壤蓄水容量	40	0	90
EX	自由水蓄水容量曲线指数	1.2	1	2
SM	自由水蓄水库容量	20	0	100
KS	壤中流日流出系数	0.6	0	1
KG	地下径流日流出系数	0.2	0	1
KKS	壤中流日消退系数	0.05	0	1
KKG	地下径流日消退系数	0.01	0	1

本次依据 1991 年广东省水文总站编制的《广东省暴雨径流查算图表使用手册》<sup>[31]</sup> (以下简称《手册》) 确定不同重现期下 24 h 设计暴雨雨型。由《手册》可知，该研究区流域采用北江上游设计雨型，设计暴雨定点定面关系属于暴雨低区。进一步结合经过校准和验证的流域模型参数，应用 CNFF 分布式水文模型计算得到了寨岗河流域在六个重现期下的设计洪水流量，具体成果如图 4 所示。结果显示，在不同重现期 (2 a、5 a、10 a、20 a、50 a 及 100 a) 下寨岗河流域的设计洪水成果分别为 410.4  $m^3/s$ 、954.8  $m^3/s$ 、1 333.4  $m^3/s$ 、1 724.4  $m^3/s$ 、2 194.5  $m^3/s$ 、2 512.6  $m^3/s$ 。随着重现期的增加，流域洪峰流量呈显著增长态势，同时峰现时间也趋于提前。

### 3.2 IFMS 水动力模型构建

一维模型覆盖 16.8 km 的防御河段，包括多个村

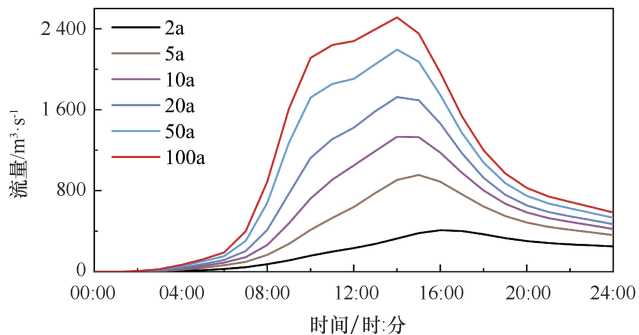


图4 不同重现期下的设计洪水成果

Fig. 4 Results for design floods under different return periods

落和涉水工程。二维模型则模拟洪水淹没区域, 考虑地形和洪水最远淹没范围来划定计算区域, 以确保覆盖所有风险区, 建模范围如图5所示。建立防御河段一维水动力学模型时, 采用河道断面数据构建一维河道, 本次通过现场勘测共获取26个实测断面, 但在建模过程中为了提高模型的准确性, 尤其是在实测断面上下游距离较远或河道存在急拐的情况下, 进一步结合上下游实测断面和DEM数据进行了断面插补, 最终本次建模共设置了37个河道断面, 平均间距约为0.5 km。同时, 通过在一维河道上增设连接元素并输入堰坝的尺寸数据等信息来进行堰坝的合理概化。对于桥梁, 则将桥墩的几何形状简化表示为河道断面的一部分, 并通过调整桥墩的宽度控制断面的有

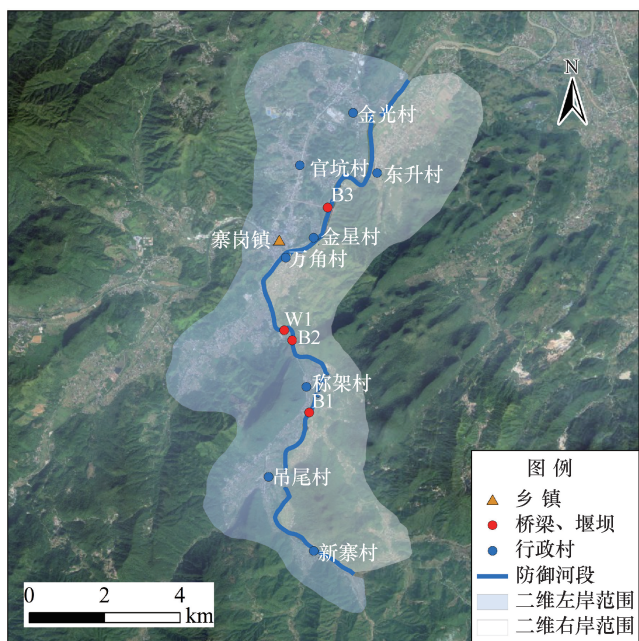


图5 一维和二维水动力建模范围

Fig. 5 Diagram of regions for one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic modeling

效过水面积, 从而模拟桥梁结构对河流水势的影响<sup>[32]</sup>。建立洪水淹没平面二维浅水模型时, 以离散的四边形非结构网格为计算单元, 来更好地适应复杂地形条件, 有效地贴合不规则的地表形态, 从而减少因地形简化导致的模拟误差<sup>[33-34]</sup>。采用局部网格加密法将网格靠近河道两岸区域设置边长20 m, 外围其他区域设置边长40 m。通过这一系列的网格设计和优化措施, 整个建模范围最终被划分为67 950个单元格, 共包含137 348个边元, 及69 400个节点, 网格剖分结果如图6所示。

### 3.3 模型率定与验证

利用寨岗镇水文站四场历史洪水(20220621、20220613、20210520、20200609)的水位和流量过程对耦合模型参数进行率定与验证分析, 以评估耦合模型的适用性。图7直观地展示了寨岗镇水文站水位、流量断面模拟与实测结果过程变化, 模型对洪水涨、落趋势模拟较好, 所构建的耦合模型在水位绝对误差、洪峰流量相对误差和峰现时间误差方面与实测数据基本一致, 其中平均峰值水位误差绝对值为0.105 m, 平均洪峰流量相对误差绝对值为7.77%, 平均峰现时间误差绝对值约为41 min, 表明耦合模型适用性较好, 可用于下一步计算与分析。通过率定与验证, 将河道的主槽糙率取值为0.025~0.035, 边滩糙率取值为0.030~0.040。

## 4 涉水工程影响下的洪水风险分析与评估

### 4.1 多情景重现期下水位动态变化分析

#### 4.1.1 桥堰回水效应分析

采用水文水动力耦合模型, 构建了六种不同重现期(2 a、5 a、10 a、20 a、50 a及100 a)下的多情景模拟过程, 计算并分析了桥堰(桥B1、B2、B3及堰坝W1)建成前后, 其所在断面的水位动态变化, 结果如表4所列, 可知桥堰建成后, 不同重现期下各桥堰断面的最高水位均高于无桥堰条件, 形成水位壅高现象, 即回水效应。此外, 根据分析, 随着洪水频率的增加, 桥堰的回水效应并不呈现单调增加或减少的趋势, 壅水高度在不同频率下显示出明显的波动, 这一结果规律与先前他人研究成果一致<sup>[35]</sup>。桥堰建成后, 其回水效应影响从大到小依次为W1、B1、B3、B2, 主要归因于河道断面过水面积的变化。特别是W1堰坝, 由于其阻水比最高, 其壅水高度显著高于其他桥梁结构, 壅水高度范围为1.388~1.943 m。B1、B2、B3均为公路桥, 但其回水效应存在较大的

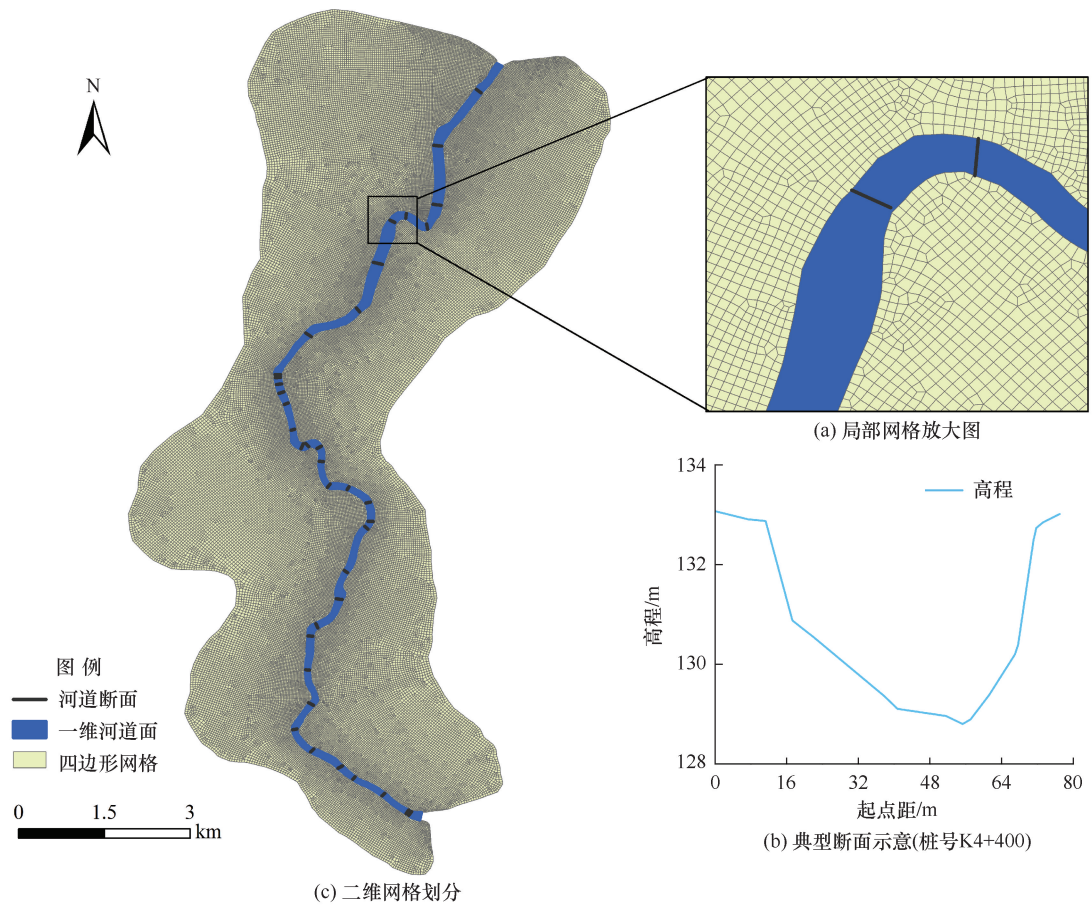


图6 河道断面分布及二维网格剖分

Fig. 6 Diagram of river cross-section distribution and two-dimensional mesh subdivision

表4 桥堰建成前后各重现期下的水位动态变化

Table 4 Water level dynamics under various return periods before and after the construction of the bridges and weir

桥堰名称	2 a		5 a		10 a		20 a		50 a		100 a	
	无桥堰	有桥堰	无桥堰	有桥堰	无桥堰	有桥堰	无桥堰	有桥堰	无桥堰	有桥堰	无桥堰	有桥堰
B1	122.580	122.709	123.814	124.089	124.478	124.854	125.030	125.277	125.360	125.601	125.546	125.777
B2	111.981	112.018	113.391	113.416	114.119	114.151	114.864	114.882	115.524	115.570	116.043	116.065
W1	108.987	110.93	110.051	111.640	110.572	112.069	110.976	112.392	111.297	112.714	111.515	112.903
B3	100.049	100.106	101.523	101.547	102.462	102.507	103.103	103.156	103.879	103.942	104.403	104.462

注: 其中水位单位均为 m。

差异, 三座桥梁中 B1 桥前回水效应较为显著, 壅水高度范围为 0.129~0.376 m, 而 B2、B3 桥前最大壅水高度均不超过 0.1 m(见图 8), 此差异是由于三座桥梁中, B1 桥的阻水比最高, 这是造成其回水效应较为显著的直接原因。

#### 4.1.2 漫堤风险分析

由上述回水效应分析可知, 四座涉水工程中 B1 及 W1 的水位动态变化较为显著, 因此本次以此两个断面为典型断面展开桥堰建成前后的漫堤风险分析。图 9 显示, B1 断面漫堤风险随重现期增长而增加。低重现期洪水下(2 a、5 a 一遇), B1 河道防洪标准

足够, 漫堤风险不显著。然而原本 20 a 一遇洪水才导致 B1 处漫堤, 但桥堰建成后, 遭遇 10 a 一遇洪水即可引发右岸漫堤, 水位超右岸堤顶 0.376 m。对于 20~100 a 一遇洪水, 无论有无桥堰, B1 处水位均超堤顶, 且桥堰的存在使水位比无桥堰时普遍高出 0.2~0.3 m。以上表明桥堰加剧了 B1 断面水位影响, 增加了洪水漫堤风险, 尤其在高重现期洪水时更为显著。W1 工程对河道洪水水位影响最为显著, 主要因其横跨河流, 导致河床升高、过水面积大幅减少。图 10 显示, 桥堰的存在使 W1 断面最高水位大幅提升, 仅遭遇 2 a 一遇洪水即引发漫堤, 且超左右岸堤顶

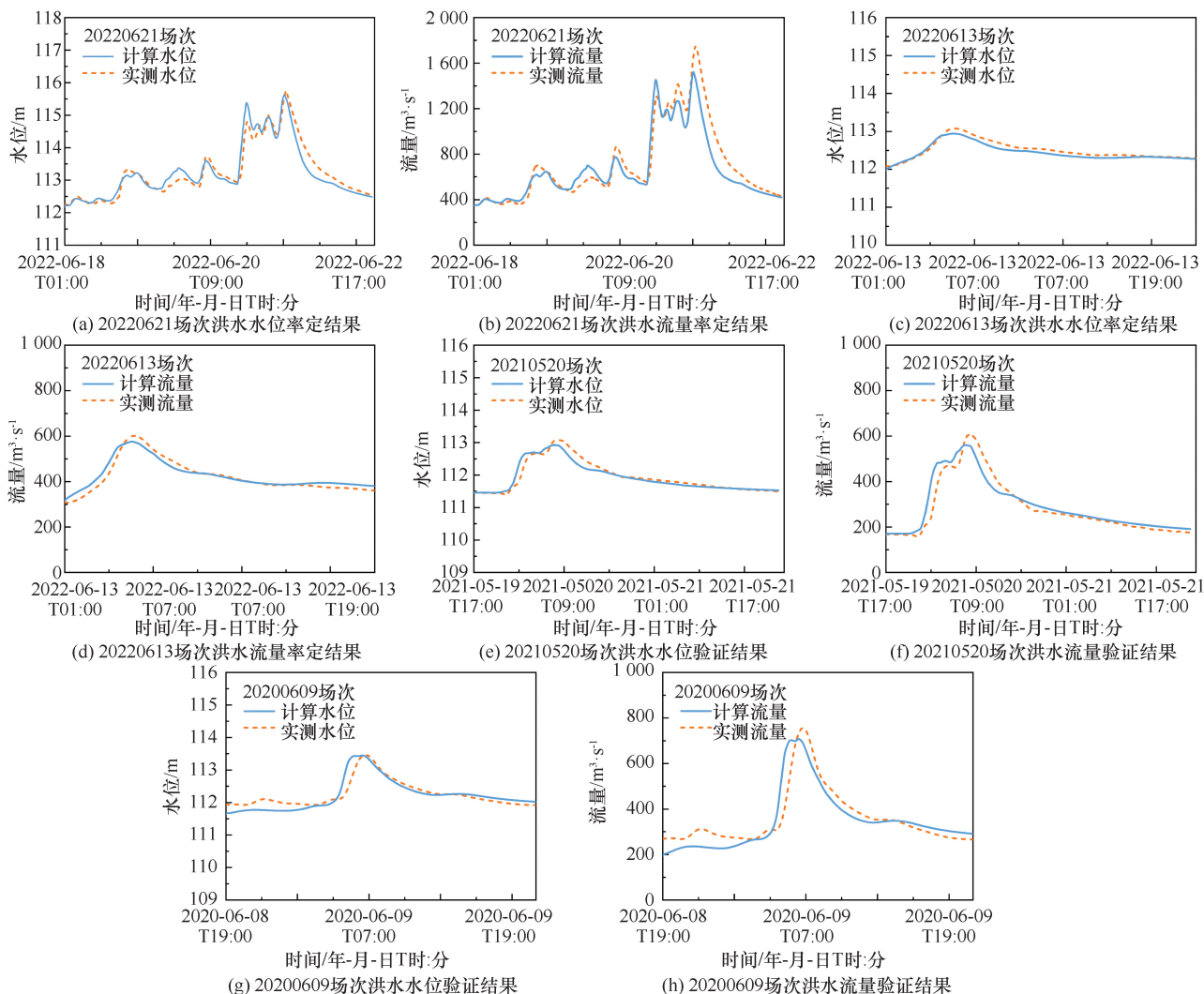


图7 水文水动力耦合模型的率定与验证结果

Fig. 7 Results of calibration and validation under the coupled hydrological and hydrodynamic model

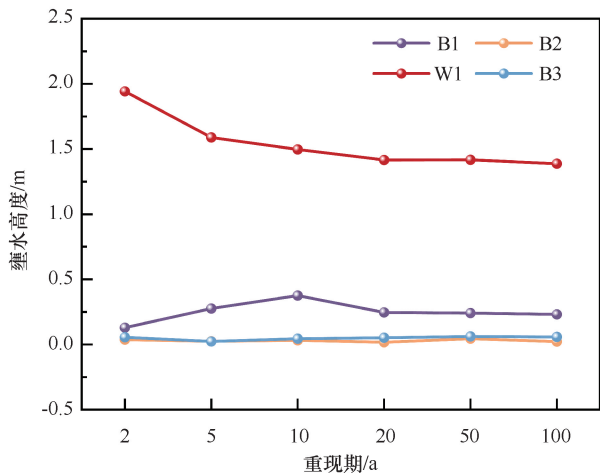


图8 各重现期下桥堰前壅水情况

Fig. 8 Backwater in front of the bridges and weir under various return periods

高度分别达 0.287 m 和 1.01 m。100 a 一遇洪水下, 最高水位超左岸堤顶 2.26 m, 超右岸堤顶 2.983 m, 极大地增加了漫堤风险。

## 4.2 多情景重现期下流速变化分析

### 4.2.1 一维河道流速分析

图 11 展示了不同重现期下各桥堰断面最大流速变化情况, 随着重现期的增大, 无论是否存在桥堰, 各桥堰断面的最大流速均呈现明显上升趋势。具体而言, 桥堰建成前, 从 2~100 a 一遇重现期洪水, B1 断面流速从 1.929 m/s 增加至 3.941 m/s, B2 断面流速从 2.119 m/s 增加至 3.319 m/s, W1 断面流速从 1.861 m/s 增加至 3.676 m/s, B3 断面流速从 1.871 m/s 增加至 3.362 m/s; 桥堰建成后, 从 2~100 a 一遇重现期洪水, B1 断面流速从 1.809 m/s 增加至 3.578 m/s, B2 断面流速从 2.082 m/s 增加至 3.277 m/s, W1 断面流速从 0.744 m/s 增加至 2.309 m/s,

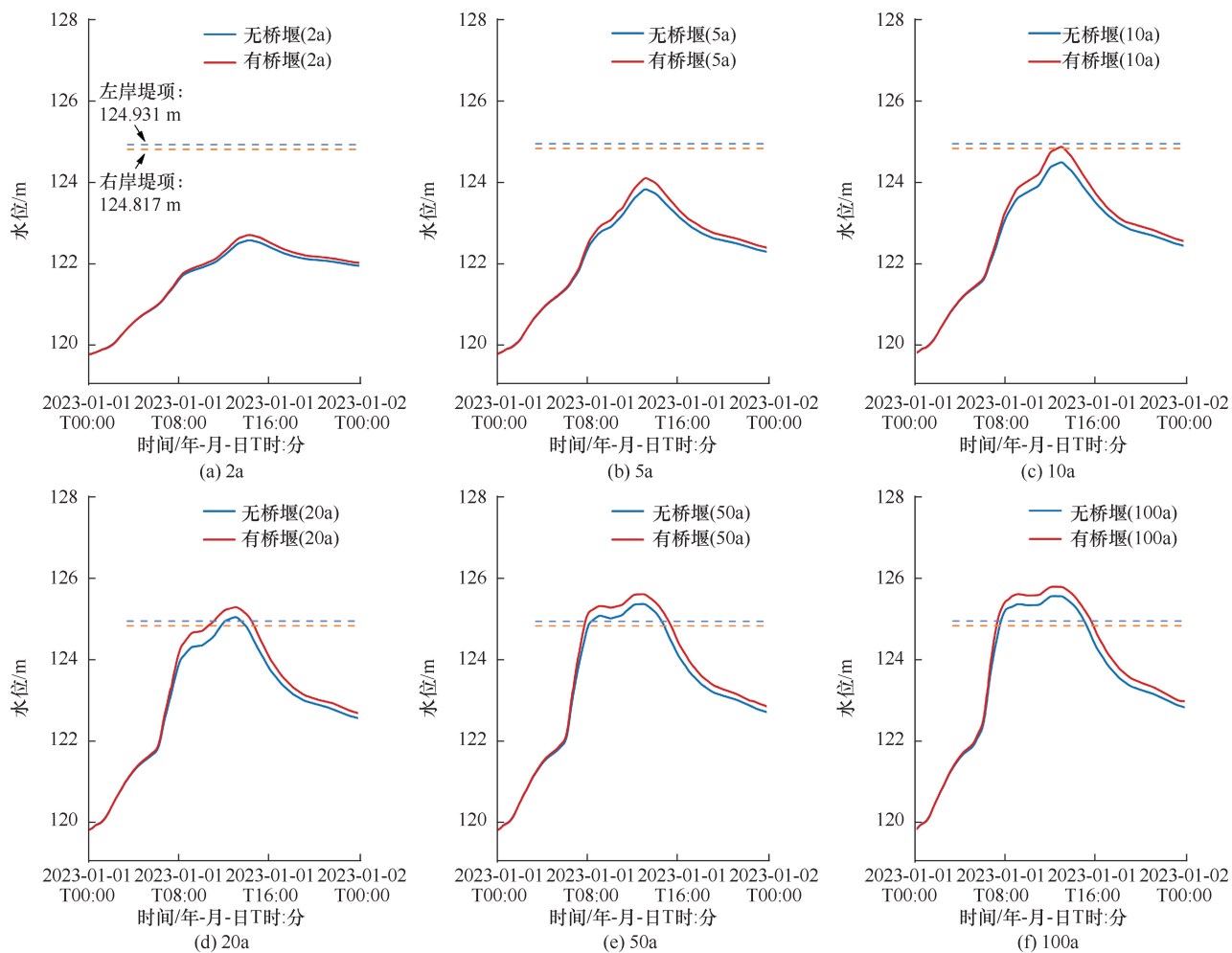


图9 桥堰建成前后各重现期下 B1 所在断面的水位变化过程

Fig. 9 Changes in water level at B1 under various return periods before and after the construction of the bridges and weir

B3 断面流速从 1.835 m/s 增加至 3.309 m/s。高流速加大了水流冲击桥堰结构及河道周边, 易增加桥堰破坏及河道冲刷的风险<sup>[36]</sup>。

然而, 在相同重现期下, 桥堰建成后各断面最大流速与无桥堰相比均呈现下降态势, W1 流速降低最显著, 其次是 B1, 而 B2、B3 流速降低不大。同样以 B1、W1 为例, 桥堰建成后, 各重现期下 B1 断面的最大流速降低了 6.241%~9.218%; W1 断面流速降低更显著, 降低了 37.183%~60.014%。

#### 4.2.2 二维区域流速分析

图 12 为各重现期下桥堰建成前后二维区域最大流速差。可知桥堰建设显著改变了二维平面区域内的流速分布状态, 且随着洪水重现期的增大, 其影响范围呈现出逐步扩大的趋势。桥堰建成前后, 二维区域流速大小变化复杂, 既有流速增加的区域也存在流速降低的区域, 变化范围主要集中在±0.2 m/s 以内。进一步可知, B1 处的左右岸流速均有所增加, W1

及 B3 的左岸流速也显示出增大趋势, 而 B2 的右岸流速在不同重现期下则表现出较为复杂和不规则的变化模式。周边如万角村、金星村等村落的流速亦呈现出显著的增大趋势, 其中部分地区的流速增加值超过 0.6 m<sup>3</sup>/s。总体上看, 桥堰工程的存在导致其周边区域的流速呈现增加的趋势, 加速了河道周边区域的冲刷, 对当地村民的生命财产安全造成了不容忽视的威胁。

#### 4.3 多情景重现期下洪水淹没分析

二维洪泛区淹没情况是评估山区洪水风险及其破坏力的核心指标之一, 直接反映了洪水对洪泛区与人类活动的潜在威胁程度<sup>[37-39]</sup>。研究统计分析了桥堰建成前后各重现期下的淹没变化情况, 并采用不同水深区间对淹没面积进行分类, 以期提供更详细的洪水淹没分析。由表 5 可知, 桥堰建成前, 随着重现期的增大, 最大淹没面积呈上升趋势, 从 2~100 a 一遇淹没面积增加了 4.686 km<sup>2</sup>。以 100 a 一遇洪水为例,

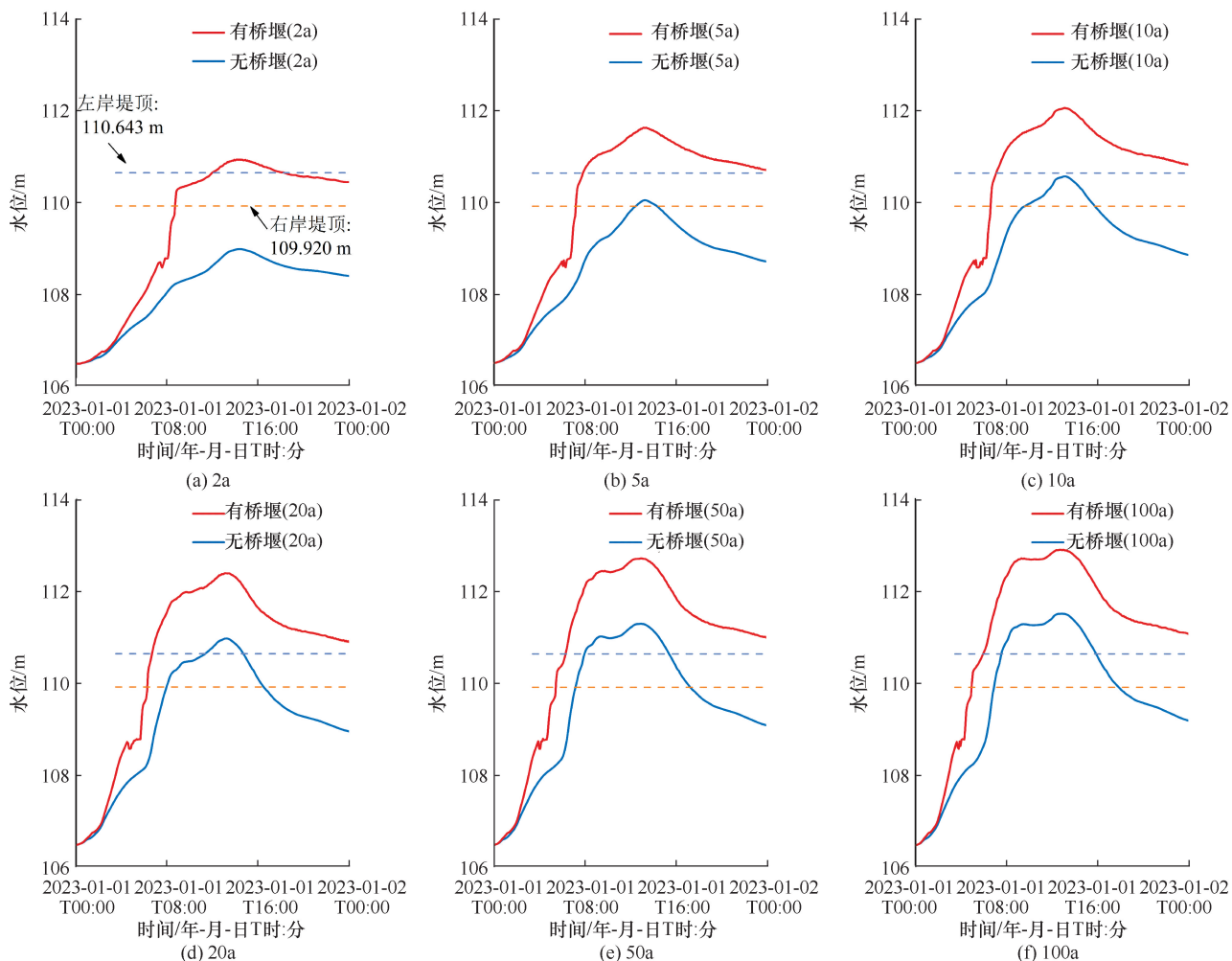


图 10 桥堰建成前后各重现期下 W1 所在断面的水位变化过程

Fig. 10 Changes in water level at W1 under various return periods before and after the construction of the bridges and weir

淹没水深区间主要集中在 2.0~4.0 m，其次为 4.0~6.0 m，近一半淹没区域受到较高水深影响。桥堰建成后，总淹没面积同样随着重现期的增大而增加，从 2~100 a 一遇淹没面积增加了 4.732 km<sup>2</sup>，与无桥堰时相比增加了 0.046 km<sup>2</sup>。各重现期下所有区间水深的淹没面积与无桥堰相比也呈现递增趋势，表明桥堰建成后在一定程度上改变了洪水淹没模式，从而增加了洪水淹没面积及区间水深。

利用遥感影像及 GIS 技术，融合桥堰和防洪保护区信息，绘制多情景洪水淹没图，全面可视化洪水淹没范围和深度，如图 13 所示。分析可知，当遭遇 2 a 一遇洪水时，各防洪村落均未出现淹没情况，该地区的防洪体系能够有效抵御 2 a 一遇的设计洪水，这一结果与现场实际调研结果相符。由于河口区地形低洼且是多条河流的汇集地，河口滩地在该洪水频率下出现了淹没情形，淹没水深多集中在 2.0~4.0 m 区间；当遭遇 5 a 一遇洪水时，万角村上游因防洪设计标准

较低而存在部分淹没，主要淹没范围为农田及小部分居民地，此外，除河口处滩地发生明显淹没外，河口右岸部分农田发生淹没情形，该洪水频率下淹没水深小于 1 m 的面积占比居多；当遭遇 10 a 一遇洪水时，万角村附近及河口处的淹没面积扩大，并且桥 B2、堰 W1 和称架村附近也出现小部分农田淹没，该洪水频率下淹没水深多集中在 2.0~4.0 m 及 1 m 以下区间；当遭遇 20 a 一遇至 100 a 一遇洪水时，农田和居民地受灾面积持续扩大，河道出现多处淹没点，主要体现在万角村、金星村、称架村、金光村及桥堰附近，淹没水深多集中在 2.0~4.0 m 区间。

### 5 结果讨论

在洪水风险分析与评估过程中，涉水工程对山洪的影响主要体现在回水效应、漫堤风险、流速变化及淹没分析等方面，形成了较为全面的流域山洪灾害模

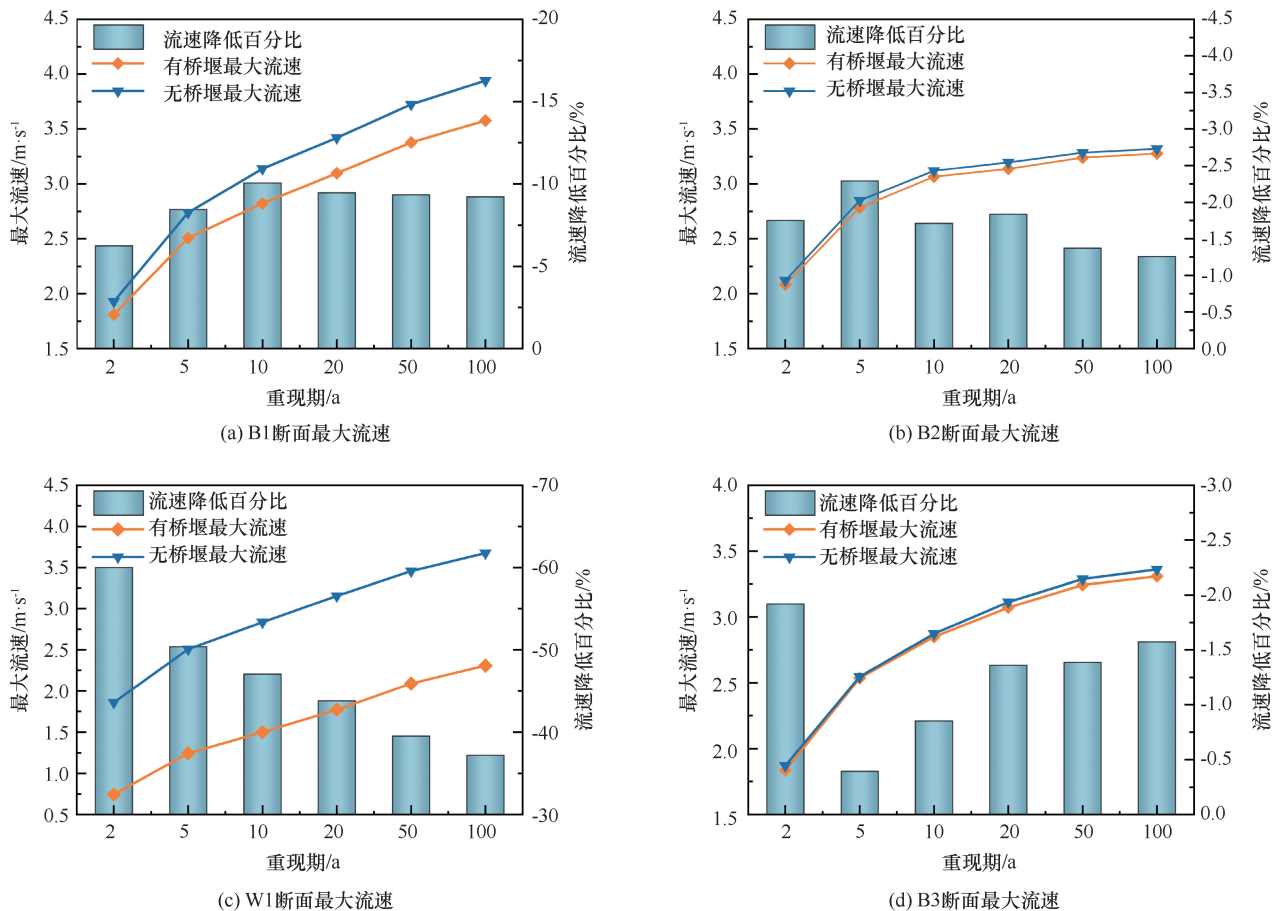


图 11 桥堰建成前后各重现期下的最大流速

Fig. 11 Maximum flow velocities under various return periods before and after the construction of the bridges and weir

表 5 桥堰建成前后各重现期下的淹没面积及水深变化情况

Table 5 Changes in inundation area and water depth under various return periods before and after the construction of the bridges and weir

重现期/a	工 况	淹没面积/km <sup>2</sup>					总淹没面积 /km <sup>2</sup>
		<1	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	>6.0	
2	建成前	0.038	0.040	0.049	0.019	0.024	0.170
	建成后	0.044	0.041	0.051	0.022	0.024	0.182
5	建成前	0.432	0.255	0.257	0.078	0.040	1.061
	建成后	0.438	0.264	0.260	0.081	0.041	1.083
10	建成前	0.649	0.546	0.617	0.203	0.075	2.089
	建成后	0.651	0.550	0.628	0.206	0.077	2.113
20	建成前	0.745	0.591	0.996	0.450	0.147	2.929
	建成后	0.771	0.605	0.997	0.463	0.151	2.987
50	建成前	0.866	0.751	1.168	0.806	0.351	3.941
	建成后	0.868	0.767	1.172	0.816	0.370	3.994
100	建成前	0.963	0.791	1.382	1.084	0.636	4.856
	建成后	0.973	0.800	1.401	1.086	0.654	4.914

注: <1、1.0~2.0、2.0~4.0、4.0~6.0、>6.0 均代表淹没水深区间, 单位为 m。

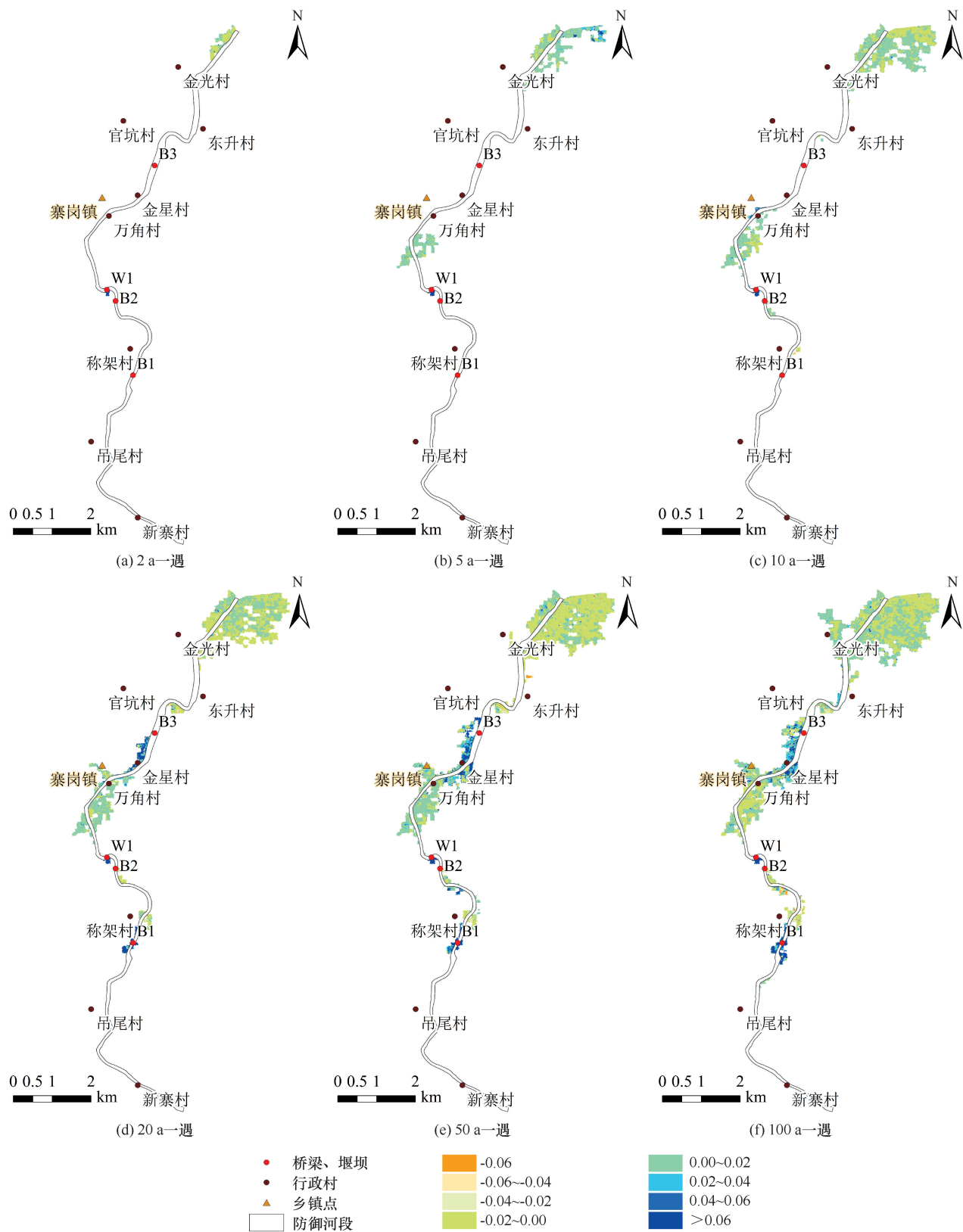


图 12 桥堰建成前后各重现期下的最大流速差(单位: m/s)

Fig. 12 Maximum flow velocity difference at various return periods before and after the construction of the bridges and weir(Unit: m/s)

拟分析方法。同时, 水文水动力耦合模型(CNFF-IFMS)与传统单一的水文或水动力模型相比, 既较好

地实现了流域降雨径流响应, 又较为准确地反映了洪水波在山区沟道的传播机制, 全面地展现了山洪在时

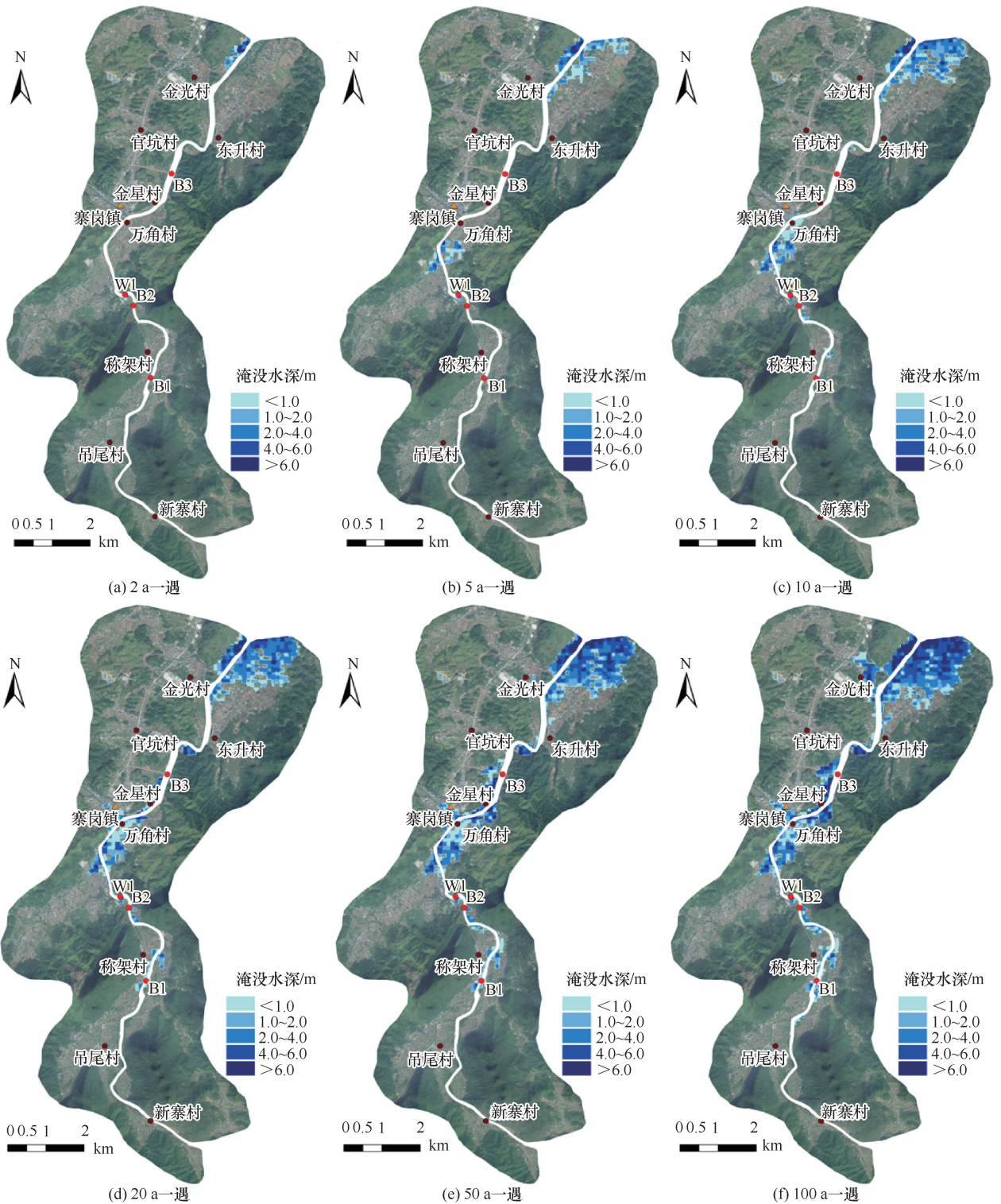


图 13 桥堰建成后各重现期下的洪水淹没

Fig. 13 Flood inundation maps under various return periods after the construction of the bridges and weir

间和空间上的演进过程。

尽管本文已取得一些阶段性成果,但仍存在一定的不足,未来的研究工作还可从以下方面进行改进与完善:

(1)在进行涉水工程对山洪的影响分析时,仅考虑了河道断面有效过水面积的改变这一因素,而涉水工程对山洪的影响还可能与桥梁的具体结构、桥墩数量及形状、桥梁位置等因素存在一定联系<sup>[40-41]</sup>,未

来研究应进一步深入探讨这些因素对山洪的叠加影响机制。

(2) 由于实测降雨数据的样本数量及精度限制, 本文初步采用了具有较强普适性的《广东省暴雨径流查算图表使用手册》进行暴雨雨型设计。未来研究可利用长时序的高分辨率降雨数据, 并融合区域气候特性与流域的地形条件等关键因素进行流域多元化雨型设计, 得到更适用于寨岗河流域山区条件的暴雨雨型。

(3) 山洪风险评估是一个涉及多因素交互作用的复杂过程, 包括气候变化、地形地貌、社会经济状况及人类活动等多方面因素。未来将进一步探讨涉水工程被河道漂浮物堵塞后对山洪暴发的影响机制, 以便更全面评估多因素影响背景下的山洪风险。

## 6 结 论

为提高寨岗河流域防灾减灾能力, 减小山洪模拟结果的不确定性, 本文构建了水文水动力耦合模型以开展流域山洪灾害模拟研究, 基于耦合模型探讨了多情景重现期下河道涉水工程对流域山洪的影响, 进行了洪水风险分析与评估, 并绘制了洪水淹没图。

(1) 结合 CNFF 及 IFMS 构建了水文水动力耦合模型, CNFF 水文模型结果显示平均径流深相对误差绝对值为 3.88%, 平均洪峰流量相对误差绝对值为 5.71%, 平均峰现时间误差绝对值为 1 h, 平均 Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.83, 模拟效果较好。采用 IFMS 构建了防御河段一维水动力模型和洪水淹没平面二维水动力模型, 结果显示平均峰值水位误差绝对值为 0.105 m, 平均洪峰流量相对误差绝对值为 7.77%, 平均峰现时间误差绝对值约为 41 min, 证明了耦合模型具有较高的可靠性。

(2) 在进行山区洪水模拟和风险评估时, 由于桥堰等涉水工程结构会影响洪水要素和成灾风险, 因此在模拟过程中亟需将其影响纳入考虑。桥堰建成后, 河道断面过水面积的变化导致不同重现期下各桥堰断面的最高水位均高于无桥堰条件, 断面回水效应及漫堤风险有所提高, 特别是对于堰坝处的水位动态影响最为显著。

(3) 对于一维河道, 随着重现期的增大, 无论是否存在桥堰, 各桥堰断面的最大流速均呈现明显上升趋势。然而, 桥堰建成后, 相同重现期下的断面最大流速较无桥堰条件有所减小。对于二维区域, 随着重现期的增大, 桥堰建成后的影响范围呈现出逐步扩大

的趋势, 总体上, 桥堰的存在显著提高了其周边区域的流速, 局部冲刷效应增强, 需加固桥堰周边护岸工程。

(4) 总淹没面积随重现期增加呈增长态势, 桥堰建成后各重现期下的淹没面积通常略高无桥堰情况, 从 2~100 a 一遇淹没面积增加了 4.732 km<sup>2</sup>, 与无桥堰相比增加了 0.046 km<sup>2</sup>, 且各区间水深范围均有所扩大。此外, 河道出现多处淹没点, 主要集中在万角村、金星村、称架村、东升村、金光村及桥堰附近, 迫切需要制定与执行针对性的山洪防治策略。

## 参考文献 (References):

- [1] 赵红莉, 王力, 徐永年. 基于 GIS 的山洪及诱发灾害的风险分析 [J]. 泥沙研究, 2004(5): 41-45.  
ZHAO Hongli, WANG Li, XU Yongnian. Risk analysis of torrent and concomitant disasters based on GIS [J]. Journal of Sediment Research, 2004(5): 41-45.
- [2] 丁留谦, 郭良, 刘昌军, 等. 我国山洪灾害防治技术进展与展望 [J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(Z1): 11-17.  
DING Liuqian, GUO Liang, LIU Changjun, et al. Technical progress of flash flood disasters prevention and control systems in China [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(Z1): 11-17.
- [3] 郝思佳, 王文川, 马强, 等. 基于水文水动力模型的山洪灾害复盘策略: 以河南王宗店村“7·20”山洪为例 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(6): 1-11.  
HAO Sijia, WANG Wenchuan, MA Qiang, et al. A numerical rehearsal strategy of flash flood disaster with hydrological and hydrodynamic modelling: case study of “7·20” flash flood disaster in Wangzongdian Village, Henan Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(6): 1-11.
- [4] 翟晓燕, 郭良, 张永勇. 基于洪水行为特征指标的我国山洪类型辨识与模拟 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1092-1106.  
ZHAI Xiaoyan, GUO Liang, ZHANG Yongyong. Flash flood type identification and simulation based on flash flood behavior indices in China [J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(7): 1092-1106.
- [5] AHMADALIPOUR A, MORADKHANI H. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996—2017 [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124106.
- [6] BARREDO J I. Major flood disasters in Europe: 1950-2005 [J]. Natural Hazards, 2007, 42(1): 125-148.
- [7] PETRUCCI O, ACETO L, BIANCHI C, et al. Flood fatalities in Europe, 1980—2018: Variability, features, and lessons to learn [J]. Water, 2019, 11(8): 1682.
- [8] FOWLER H J, LENDERINK G, PREIN A F, et al. Anthropogenic

- intensification of short-duration rainfall extremes[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(2): 107-122.
- [9] 张晨钰, 张攀, 王伟, 等. 基于多参数优化地理探测器的山洪灾害驱动力分析及风险评价[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(6): 1-15.  
ZHANG Chenyu, ZHANG Pan, WANG Wei, et al. Driving force analysis and risk assessment of flash flood disaster based on multi-parameter optimized geographic detector[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(6): 1-15.
- [10] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(2): 13-20.  
TANG QiuHong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(2): 13-20.
- [11] AMPONSAH W, MARRA F, ZOCCATELLI D, et al. Scale-dependence of observational and modelling uncertainties in forensic flash flood analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127502.
- [12] EDOUARD S, VINCENDON B, DUCROCQ V. Ensemble-based flash-flood modelling: Taking into account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 480-494.
- [13] QUINTERO F, SEMPERE-TORRES D, BERENGUER M, et al. A scenario-incorporating analysis of the propagation of uncertainty to flash flood simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 460/461: 90-102.
- [14] TENG J, JAKEMAN A J, VAZE J, et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 90: 201-216.
- [15] TUBALDI E, WHITE C J, PATELLI E, et al. Invited perspectives: Challenges and future directions in improving bridge flood resilience [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(3): 795-812.
- [16] MARTIN-VIDE J P, LLASAT M C. The 1962 flash flood in the Rubi stream (Barcelona, Spain)[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 441-454.
- [17] 江春波, 周琦, 申言霞, 等. 山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J]. *水利学报*, 2021, 52(10): 1137-1150.  
JIANG Chunbo, ZHOU Qi, SHEN Yanxia, et al. Review on hydrological and hydrodynamic coupling models for flood forecasting in mountains watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(10): 1137-1150.
- [18] 王雪梅, 翟晓燕, 郭良. 山区小流域洪水分布式模拟与危险性评估[J]. *水文*, 2023, 43(4): 45-52.  
WANG Xuemei, ZHAI Xiaoyan, GUO Liang. Distributed simulation and hazard assessment of flash floods in small mountainous catchment [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(4): 45-52.
- [19] LI X H, YAO J, LI Y L, et al. A modeling study of the influences of Yangtze River and local catchment on the development of floods in Poyang Lake, China [J]. *Hydrology Research*, 2016, 47 (S1): 102-119.
- [20] FELDER G, ZISCHG A, WEINGARTNER R. The effect of coupling hydrologic and hydrodynamic models on probable maximum flood estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 157-165.
- [21] LI J, WANG Z, ZHANG T. Flood simulation using the hydrological model and the hydrological-hydrodynamic coupling model in a small watershed in semi-arid and sub-humid region, North China [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(10): 3496-3516.
- [22] 李云良, 张奇, 姚静, 等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 227-235.  
LI Yunliang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang-catchment system[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2): 227-235.
- [23] LI Y L, ZHANG Q, YAO J, et al. Hydrodynamic and hydrological modeling of the Poyang Lake catchment system in China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(3): 607-616.
- [24] 沈泽宇, 丁永生, 孔乔. 降雨径流与洪水淹没模型耦合的应用研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(8): 1473-1483.  
SHEN Zeyu, DING Yongsheng, KONG Qiao. Application study of coupling rainfall-runoff modeling and floodplain inundation mapping [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(8): 1473-1483.
- [25] 高丹, 殷杰, 王丹丹, 等. 干旱区暴雨山洪淹没数值模拟与验证 [J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2271-2283.  
GAO Dan, YIN Jie, WANG Dandan, et al. Modeling and validation of flash flood inundation in drylands [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2271-2283.
- [26] EL-SAOUD W A, OTHMAN A. An integrated hydrological and hydraulic modelling approach for flash flood hazard assessment in eastern Makkah city, Saudi Arabia [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2022, 34(4): 102045.
- [27] LI W, LIN K, ZHAO T, et al. Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 108-120.
- [28] ZEIGER S J, HUBBART J A. Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112125.
- [29] 翟晓燕, 郭良, 刘荣华, 等. 中国山洪水文模型研制与应用: 以安徽省中小流域为例[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(5): 1018-1036.  
ZHAI Xiaoyan, GUO Liang, LIU Ronghua, et al. Development and application of China flash flood hydrological model: Case study in

- small and medium-sized catchments of Anhui Province[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(5): 1018-1036.
- [30] 马建明, 喻海军. 洪水分析软件 IFMS/Urban 特点及应用[J]. *中国水利*, 2017(5): 74-75.  
MA Jianming, YU Haijun. Features and applications of the flood analysis software IFMS/Urban [J]. *China Water Resources*, 2017 (5): 74-75.
- [31] 钱王骋. 《广东省暴雨径流查算图表》介绍[J]. *广东水电科技*, 1992(3): 38-42.  
QIAN Wangcheng. Introduction to the chart of stormwater runoff in Guangdong province [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 1992(3): 38-42.
- [32] 吴滨滨, 喻海军, 马建明, 等. 基于水动力学模型的城区防洪能力评估研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(1): 1-14.  
WU Binbin, YU Haijun, MA Jianming, et al. Evaluation of urban flood control capacity based on hydrodynamic model[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(1): 1-14.
- [33] CHEN Y H. Investigation of Groundwater Depletion and Level Underseepage with Unstructured-grid Modeling Approach[M]. Baton Rouge; Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2022.
- [34] HU R, FANG F, SALINAS P, et al. Unstructured mesh adaptivity for urban flooding modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 354-363.
- [35] 胡靖宇, 樊梦洒, 冀荣贤, 等. 大型输水渠跨渠桥梁墩柱导流罩及现场试验研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1194-1203.  
HU J Y, FAN M S, JI R X, et al. Study on flow-deflector of cross bridge pier and field test in large transmission channel[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21 (6): 1194-1203.
- [36] INOUE T, MISHRA J, KATO K, et al. Supplied sediment tracking for bridge collapse with large-scale channel migration[J]. *Water*, 2020, 12(7): 1881.
- [37] LI X, LIN J, ZHAO W, et al. Approximate calculation of flash flood maximum inundation extent in small catchment with large elevation difference[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125195.
- [38] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(2): 13-20.  
TANG QiuHong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(2): 13-20.
- [39] 史瑞琴, 刘宁, 李兰, 等. 暴雨洪涝淹没模型在洪灾损失评估中的应用[J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(4): 379-384.  
SHI Ruiqin, LIU Ning, LI Lan, et al. Application of rainstorm and flood inundation model in flood disaster economic loss evaluation[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2013, 32(4): 379-384.
- [40] CHENG T, WANG J, CHEN P, et al. Simulation of ice accumulation around bridge piers during river breakup periods using a discrete element model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34 (1): 94-105.
- [41] KABIR S M I, AHMARI H, DEAN M. Contribution of debris and substructures to hydrodynamic forces on bridges [J]. *Engineering Structures*, 2023, 283: 115878.

(责任编辑 王海锋)