

陈鹏帅, 刘荣华, 孙朝兴, 等. 考虑桥梁阻水影响的山洪灾害放大效应模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 38-50. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.004

CHEN Pengshuai, LIU Ronghua, SUN Chaoxing, et al. Simulation study on the amplification effect of water blockage caused by bridges on flash floods[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 38-50. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.004

考虑桥梁阻水影响的山洪灾害放大效应模拟研究

陈鹏帅^{1,2}, 刘荣华^{1,2}, 孙朝兴^{1,2}, 刘子霞³, 刘潇^{1,2}, 程东^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038; 3. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东广州 510642)

摘要:【目的】山洪往往因洪水改道、泥沙淤积、流木堵塞桥孔等原因造成灾害放大, 具有极大的不确定性。使用水文水动力模型可以定量评估桥梁在不同淤堵情景下对山洪灾害带来的放大效应的影响。【方法】以广东省清远市连南瑶族自治县的寨岗河为例, 采用中国山洪水文模型(CNFF-HMS), IFMS水动力模型, 分别用11场和4场暴雨洪水资料对水文模型和水动力模型开展参数率定和结果验证。以2022年“6·21”典型洪水为例, 计算桥梁无淤堵、部分淤堵和全淤堵工况下断面水位和淹没范围变化, 并对桥梁阻水原因进行分析。【结果】结果表明:(1)桥梁淤堵会导致上游水位明显上涨, 全淤堵工况比无淤堵工况水位上涨1.5 m;(2)桥梁淤堵会导致淹没范围明显增加, 全淤堵工况比无淤堵工况淹没面积增大0.99 km², 为无淤堵工况的1.34倍;(3)桥梁淤堵会导致桥梁位置的过流能力减弱, 全淤堵工况下过流面积仅为无淤堵工况的38.4%。【结论】桥梁淤堵对山洪灾害存在放大效应, 桥梁淤堵越严重, 桥梁过流能力越差, 上游水位抬升越明显, 导致洪水极易发生漫溢, 洪水淹没范围增加。初步量化了灾害的放大效应, 为山洪灾害风险早期识别和指导人员避险转移提供了更为科学精准的支撑。

关键词: 山洪灾害; 定量评估; 水文水动力模型; 数值模拟; 暴雨洪水; 桥梁淤堵; 过流能力

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.004

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)06-0038-13



Simulation study on the amplification effect of water blockage caused by bridges on flash floods

CHEN Pengshuai^{1,2}, LIU Ronghua^{1,2}, SUN Chaoxing^{1,2}, LIU Zixia³, LIU Xiao^{1,2}, CHENG Dong^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Flash floods are often exacerbated by factors such as flood diversion, sediment deposition, and debris blocking bridge openings, Resulting in significant uncertainty. Using a hydrologic-hydrodynamic model, the amplification effects

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-05-27; 录用日期: 2024-06-07; 网络出版日期: 2024-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271095)

作者简介: 陈鹏帅(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事山洪灾害防治研究。E-mail: 932013910@qq.com

通信作者: 刘荣华(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事山洪灾害防治、洪水预报预警和水信息学等研究。E-mail: liurh@iwhr.com

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

of bridges under different levels of blockage on flash flood disasters was quantitatively assessed. [Methods] Taking the Zhaigang River in Liannan County, Qingyuan City, Guangdong Province as an example, the China Flash Flood Hydrological Model (CNFF-HMS) as hydrological model and the Integrated Flood Modeling System (IFMS) as hydrodynamic model were employed. Parameter calibration and result validation of the hydrological and hydrodynamic models were conducted using 11 and 4 sets of rainstorm flood data, respectively. Using the typical flood event on June 21, 2022, variations in water levels and inundation extent at the bridge cross section were calculated under three conditions: unblocked, partially blocked, and fully blocked. Contributing factors of water blockage caused by bridges were also analyzed. [Results] The results showed that: (1) bridge blockage caused a significant rise in upstream water level, with a 1.5-meter increase in water level under the fully blocked condition compared to the unblocked condition. (2) Bridge blockage led to a noticeable expansion in the inundation extent. Specifically, the inundation area under the fully blocked condition was 0.99 km^2 larger, or 1.34 times larger than the unblocked condition. (3) Bridge blockage reduced the bridge's conveyance capacity, with the flow area under the fully blocked condition being only 38.4% of that under the unblocked condition. [Conclusion] Bridge blockage has an amplification effect on flash flood disasters. As the severity of bridge blockage increases, the bridge's conveyance capacity weakens, and the upstream water level rises more noticeably. This significantly increases the risk of flooding and expands the inundation extent. In this study, the amplification effect of the disaster has been quantitatively assessed, providing more precise and scientifically grounded support for the early detection of flash flood disaster risks and for guiding evacuation and relocation efforts.

Keywords: flash flood disaster; quantitative assessment; hydrologic-hydrodynamic model; numerical simulation; rainstorm flood; bridge blockage; conveyance capacity

0 引言

山洪灾害是一种常见的自然灾害,具有易频发、破坏性强、突发性高及影响范围广等特点,极易造成大量的人员伤亡和社会经济损失,对人类社会和自然生态系统都造成了巨大的影响^[1-2]。在过去的几十年中,受全球气候变化、山区资源的过度开发利用以及城市化进程加剧等影响,各类自然灾害频发,其中山洪灾害的发生频率和强度也有所增加^[3]。广东省地处我国南部沿海地区,地势复杂,山地分布较广且地势陡峭,同时雷雨天气较为频繁,短时强降雨频发,极易引发山洪灾害^[4]。

随着计算机技术快速发展,数值算法在科学研究和工程技术应用方面也得到了显著发展和提升,在此期间水文模型和水动力模型也得到了广泛应用。现阶段水文和水动力模型可支持较为复杂的数学模型和更大规模的数据计算,可以更全面地考虑地形、土壤质地、水文过程和山洪演进过程之间复杂的相互作用机理。学者们常采用水动力模型开展淹没范围和风险分析计算,可以更好地探究山洪灾害影响区域。张明达等^[5]结合 Flood Area 模型针对山洪沟开展山洪淹没分析,以 2012 年云南省宣威市“7·12”山洪灾害开展淹没模拟,并获取不同临界雨量所对应的山洪灾害等级淹没高度,模拟计算结果较为准确。田福昌等^[6]基于实测河段断面和高精度 DEM 数据,采用 MIKE FLOOD 建立塔洋河下游一二维耦合水动力模

型,计算 50 a 一遇的河道水面线、洪水漫溢演进和淹没风险结果,分析了塔洋河下游的风险分布特征和山洪灾害成灾原因。林志强等^[7]采用水文动力模型 Floodarea 对西藏自治区林芝市山洪沟 2015 年 8 月的山洪过程进行模拟研究,较为准确地重现了山洪灾害过程并确定了山洪临界雨量。潘婧等^[8]基于 InfoWorks 模型计算了 10 a、20 a、50 a 和 100 a 设计降雨重现期下积水的分布,分析出核心区域的内涝点和成因,并依据分析结果提出应对措施。叶陈雷等^[9]同样采用 InfoWorks ICM 软件对福建省福州市开展暴雨洪涝模拟,模型中考虑水闸、水泵、坝等水工建筑物和调度规则等条件,为模型应用研究提供思路。沈豪等^[10]构建长江宜宾河段一、二维水动力学耦合数学模型,同时考虑水库调度影响,探究了在水库调蓄作用下易受洪水淹没影响的村镇分布及各区域防洪标准能力的不足。ZHANG 等^[11]建立广东省罗江(化州段)一、二维水动力模型,模拟了不同重现期下的洪水水深、洪水演进等结果,并提出该流域堤坝存在的隐患位置。HAO 等^[12]为探究山东省日照市岚山区绣针河山洪灾害影响,建立一维水动力模型并采用 D8 算法进行洪水淹没分析,快速准确计算出洪水风险和淹没范围,为科学决策提供依据。PATEL 等^[13]采用 HEC-RAS 对安比察河(Ambica River)不同流量下洪水进行计算,并与历史典型洪水进行对比分析,指出当地易受灾区域应对措施。THOMAS 等^[14]针对 Söller 地区的山洪灾害频发区开展一、二维水动力模型计

算, 探究了当地集水区分布, 提出了当地山洪灾害成因和规律。ROCA 等^[15]采用 InfoWorks 研究瓦伦西河 (Valency River) 2004 年极端降雨下泛洪区流量和水位分布, 并考虑了结构物坍塌和河道冲刷对洪水带来的影响, 探究了山洪暴发期间的风险因素。

部分学者为考虑降雨影响, 采用水文和水动力耦合模型对山洪灾害过程进行研究。郝思佳等^[16]以河南“7·20”山洪灾害为例, 基于水文、水动力模型, 结合激光点云测量技术对“7·20”山洪灾害进行复盘重演, 提出了山洪灾害快速复盘模拟策略, 分析山洪来水和模拟洪水过程, 发现王宗店村产生较大灾害和人员伤亡的原因, 为灾后重建提供技术支撑。王旭滢等^[17]针对浦阳江流域构建新安江水文模型和 IFMS 一、二维水动力学模型, 开展降雨汇流过程和洪水演进计算分析, 结合致灾因子和水利工程变化工况下洪水淹没面积和水深的计算结果, 分析了该流域隐患位置和未来的防洪规划。王协康等^[18]采用水文水动力模型对江西省靖安县吕阳洞 2019 年 7 月 21 日山洪事件开展反演, 分析了洪水致灾原因、淹没范围及洪水上涨特性, 揭示了山洪灾害事件发生因素, 并依据 5 a、20 a 和 100 a 一遇设计洪水下淹没深度划分风险等级, 为旅游山区山洪灾害防治提供依据。韩超等^[19]将 SCS 水文模型和 MIKE11 模型进行耦合设置, 对嘉兴市河网的洪水过程进行研究, 为嘉兴地区防洪排涝工作提供参考。SEGURA 等^[20]采用 TETIS 水文模型和 RiverFlow2D 水动力模型, 对 2007 年 10 月发生于西班牙吉罗纳河 (Girona River) 的山洪灾害开展洪水过程分析, 并基于地貌特征开展山洪成因分析, 为风险预防提供有力支撑。周琳等^[21]以柳林镇“8·12”山洪灾害为例构建灾害情景, 并耦合“水文-水动力”模型推演山洪全过程, 评估了本次山洪灾害人员伤亡原因。PAPAIOANNOU 等^[22]选取希腊沃洛斯的典型山洪事件开展气象-水文-水动力耦合模型分析, 较为准确地模拟出严重受灾区域, 为洪水风险管理提供支撑。ZHONG 等^[23]采用新安江水文模型和 IFMS 一、二维耦合模型针对蒲阳河 (Puyang River) 开展不同场景洪水模拟, 分析了流域危险因素并提出了防洪管理措施。JHA 等^[24]利用 SWAT 水文模型和 HEC-RAS 水动力模型开展美国密苏里州蓝河 (Blue River) 模型模拟, 确定出研究区洪水风险区和受威胁的基础设施, 并评估了灾害影响程度。LI 等^[25]以濠江为研究对象, 采用 TOPMPDEL 水文模型和 MIKE FLOOD 水动力耦合模型模拟了洪水淹没范围和洪水深度, 利用社会经济和历史洪水灾害数据提

出了山洪灾害高风险区, 并进行山洪脆弱性和敏感性分析。

目前大多数水文水动力模型应用多是关注降雨、下垫面等基础数据对山洪的影响过程, 或对典型山洪灾害事件进行复盘和分析, 探究灾害成因及提出防御措施, 极少关注山洪灾害发生过程中小型水利工程对山洪灾害带来的不确定性和突发性影响, 水利工程水毁、林木堵塞桥梁等事件在暴雨山洪过程中时有发生, 极大程度放大了山洪灾害风险和危害。

本研究通过构建寨岗河流域的水文水动力模型, 同时考虑桥梁工程作用, 探究了模型在寨岗河流域的适用性; 将构建的水文水动力模型应用于桥梁不同阻水效果下的山洪演进计算, 分析了桥梁阻水对山洪灾害带来的影响, 为山洪灾害影响范围及影响程度的准确评估和应急响应提供有力支持。

1 研究区域概况

1.1 流域概况

寨岗河流域位于广东省清远市连南瑶族自治县, 主要河流为寨岗河, 又称同灌水, 发源于县境内白芒黄连坳顶和牛岗顶附近, 属于北江水系。流域面积 409.4 km², 河流水系总长 136 km, 流域主要支流有白芒河、称架河。寨岗河流域属于亚热带季风性气候, 年均降水量较丰富。夏季气温高, 多降雨, 有时会出现强降雨天气, 降雨主要集中在 5—10 月。寨岗河流域地形分布复杂, 主要为山地和丘陵。流域分布情况与寨岗镇位置如图 1 所示, 流域内站点分布如图 2 所示。

1.2 灾害调查

2022 年 5 月“龙舟水”期间, 广东省多地受到山洪灾害影响, 其中寨岗镇辖区出现极端强降雨天气, 河道水位暴涨, 洪水漫灌, 防汛形势严峻。6 月 20 日 20:00—21:00, 寨岗镇最大 1 h 累计降雨 64 mm, 超 5 a 一遇; 6 月 20 日 19:00—22:00, 最大 3 h 累计降雨 155 mm, 超 100 a 一遇; 6 月 20 日 19:00—21 日 1:00 最大 6 h 累计降雨 175 mm, 超 50 a 一遇, 暴雨致使山洪暴发, 河道水位暴涨, 引发了山洪灾害。其中寨岗镇受灾尤为严重, 20 日 23:00 左右, 寨岗河水位开始明显上涨, 21 日 13:00 路面进水, 路面水深最高约 1.5 m。强降雨造成河道淤积, 0.67 km² 农田受淹, 15 座房屋倒塌, 340 多户房屋受淹, 公路受淹约 5 km, 10 处塌方, 2 座桥梁被冲毁, 多地学校进水, 生活、生产受到严重影响。



图1 流域概况

Fig. 1 Watershed overview

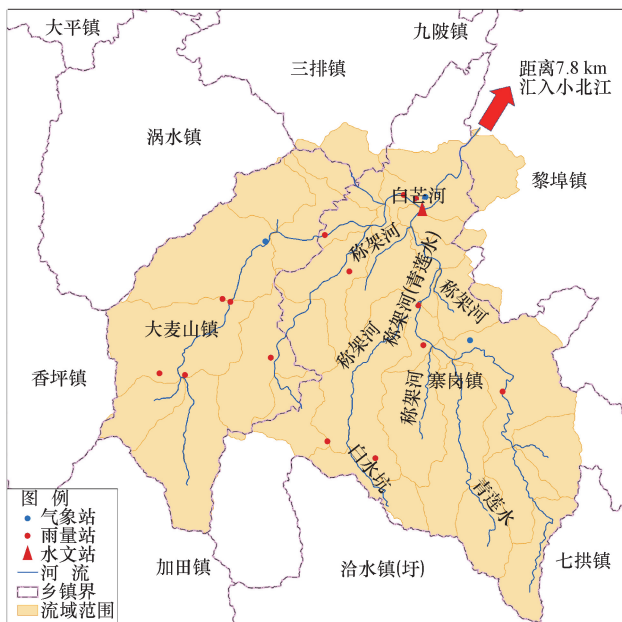


图2 流域站点分布

Fig. 2 Distribution of watershed stations

2 研究方法

2.1 数据来源

研究以广东省 2022 年“6·21”寨岗河受灾事件为对象, 利用水文水动力模型对寨岗河流域开展桥梁阻水对山洪灾害放大效应分析, 其中需要数据包括: (1) 水系、小流域、土地利用矢量数据及 1:50 000 流域 DEM 数据, 来源于中国水利水电科

学研究院; (2) 气象和水文数据, 场次逐小时降雨和洪水过程数据, 来源于广东省防汛保障与农村水利中心; (3) 河道水底断面数据和现场受灾调查等数据均通过现场测量和调查得到。

2.2 水文水动力模型

水文水动力模型主要包括水文模型和水动力模型, 通过将实测降雨输入水文模型计算流量过程, 为水动力模型提供边界条件, 完成从降雨到淹没演进全过程的模型计算和分析。

2.2.1 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 (China Flash Flood Hydrological Model, CNFF), 该模型采用 7 类水文元素概化流域, 包括小流域、河段、节点、分水、水源、洼地和水库等, 通过对小流域、河段等建立拓扑关系, 完成流域分布式水文模型构建。中国山洪水文模型耦合了降水、蒸散发、产流、汇流、河道演进、水库调蓄等 6 种水文计算过程^[26-27]。CNFF 可通过可视化界面进行建模, 操作简单, 已成功应用于广东、福建、吉林等地山洪灾害预警预报平台^[28-30]。

2.2.2 水动力模型

水动力模型采用 IFMS 模型软件 (Integrated Flood Modeling System, IFMS), 该软件是中国水利水电科学研究院自主研发的一、二维高性能水动力学洪水分析计算软件^[31-32]。IFMS 模型软件可进行一、二维水动力和一、二维耦合等模型构建和计算, 可添加桥梁、堰、涵洞等水工建筑物, 支持 GPU 并行加速计算, 能够高效进行洪水淹没演进过程计算。

2.2.3 水文水动力模型耦合

根据水动力模型建模区域, 可确定水动力模型边界条件与水文计算的流量过程 (包括河段、小流域和节点) 的对应关系, 根据对应关系在水动力模型中添加边界条件设置于对应的断面, 实现水文水动力模型耦合。

2.3 模型构建

利用河段、小流域、河道断面和 DEM 等数据构建水文水动力模型, 通过输入实测降雨数据驱动模型计算和分析。

2.3.1 水文模型构建

寨岗河流域共划分 29 个小流域, 小流域面积为 1.1~29.8 km², 应用 1:50 000 DEM、2.5 m 土地利用和植被类型信息数据等高精度地形地貌数据, 提取小流域关键属性信息。经统计, 寨岗河流域土地利用类型以砂黏土 (174.3 km²) 和砂壤土 (107 km²) 为主,

分别占总面积的 43% 和 26%; 土壤质地以林地 (358.4 km²) 和耕地 (48.7 km²) 为主, 分别占总面积的 88% 和 12%。寨岗河流域单元划分、土地利用和土壤质地如图 3 所示。

利用提取的小流域属性信息, 充分考虑流域内地形、植被等空间分布异质性, 采用 CNFF 模型构建寨岗河流域分布式水文模型, 利用泰森多边形算法对实测站点降雨数据插值, 计算流域面雨量过程, 选择三

水源蓄满产流法进行产流计算, 选择分布式时变单位线汇流算法, 开展寨岗河流域暴雨洪水过程模拟计算。

2.3.2 水动力模型建模

水动力模型采用一、二维耦合模型, 包括一维水动力模型、二维水动力模型以及一、二维耦合设置。其中一维水动力模型使用 26 个现场测量横断面, 一维河道建模长度 16.8 km, 计算河段如图 4 所示。二

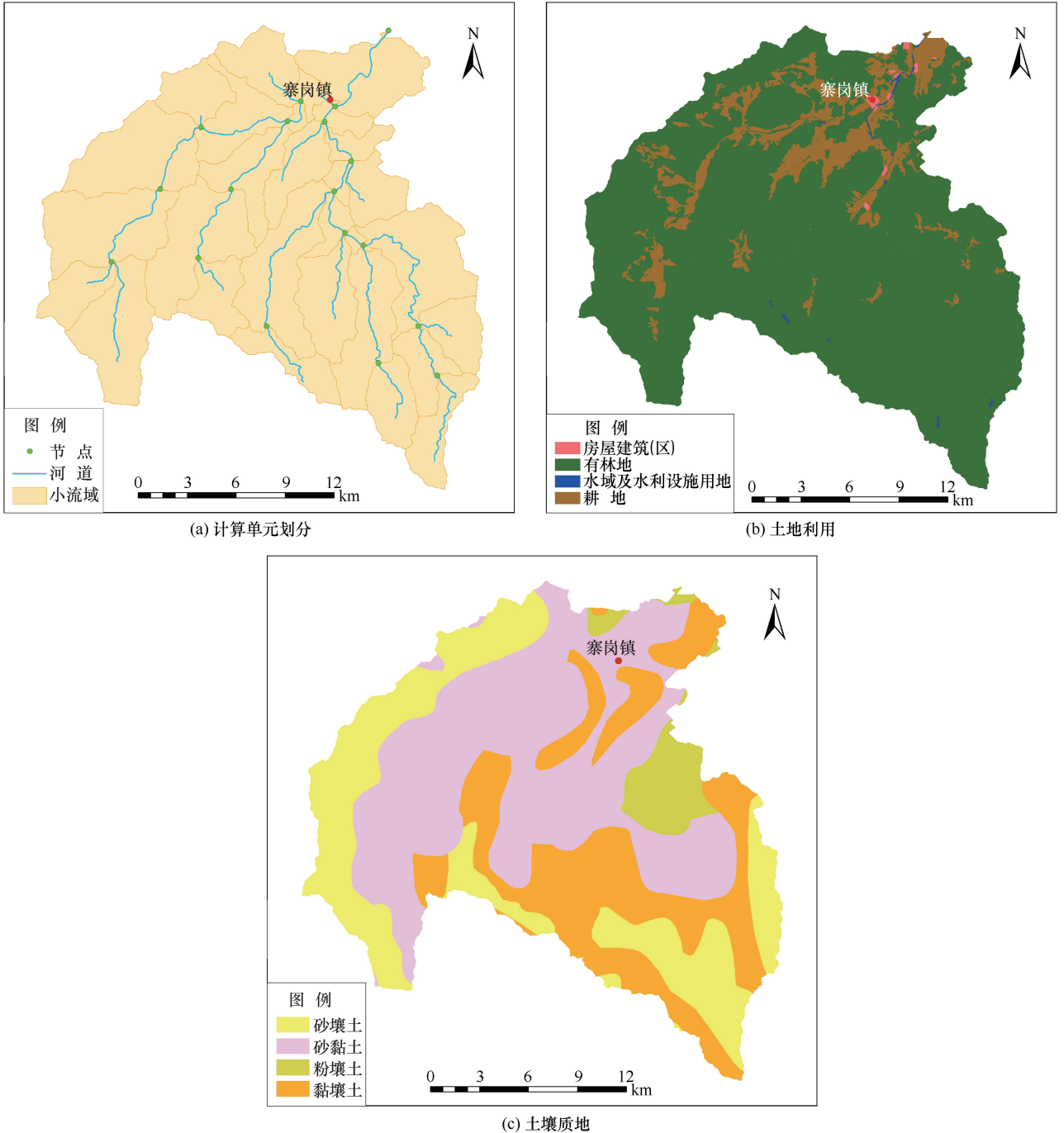


图 3 流域提取图层

Fig. 3 Watershed delineation layers

维水动力模型导入划分的非结构化网格, 共计 7.2 万个网格单元, 利用 DEM 数据和土地利用数据分别进行网格单元高程赋值和糙率赋值。一、二维耦合设置通过一维河道与二维边界空间位置连接, 用以模拟洪水漫出河道后, 在二维平面的演进过程, 共连接 26 个断面与 1 098 个边元(边元: 网格单元各个网格边)。

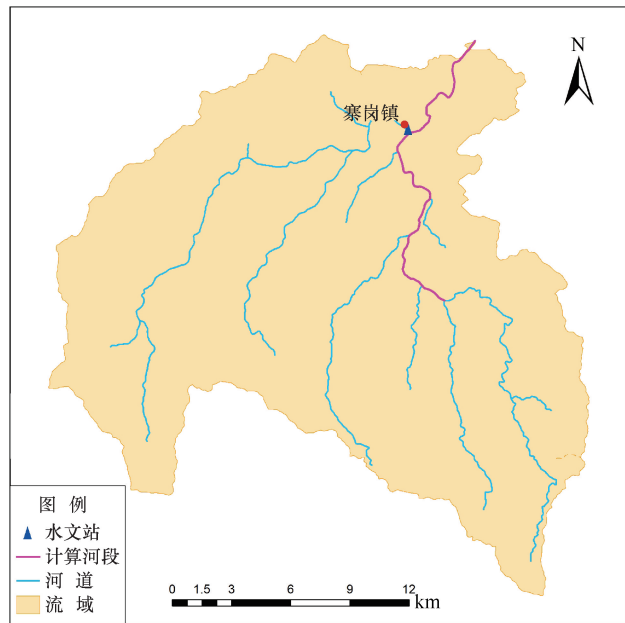


图 4 计算河段示意

Fig. 4 Schematic diagram of river segments for calculation

2.3.3 水动力模型桥梁设置

桥梁堵塞可导致河道水位上涨, 从而漫溢河道。根据现场调研情况, 以桥梁高度、桥墩宽度、现场居民反映情况等为依据, 在建模河段范围内共选取 4 座对山洪灾害影响较大的桥梁开展外业测量工作, 测量内容包括桥梁高、桥墩间距、桥墩形状及尺寸等桥梁典型参数, 桥梁分布如图 5 所示。根据现场测量参数信息, 在一维水动力模型河道中添加桥梁概化要素, 通过两个水工建筑物概化桥梁阻水效果, 分析桥墩与桥板对洪水演进带来的影响。

桥墩对洪水演进有一定阻碍作用, 因此根据桥洞过水的特性, 概化为水工建筑物涵洞, 并根据实际情况采用宽顶堰公式或者闸孔出流公式进行计算。桥面的桥板对洪水也存在一定阻水效果, 因此桥面桥板以上部分可以概化为水工建筑物堰, 采用宽顶堰公式进行过流计算。实际计算过程中, 根据实际水位与桥面或者桥洞位置关系, 进行过流计算, 计算规则如下。

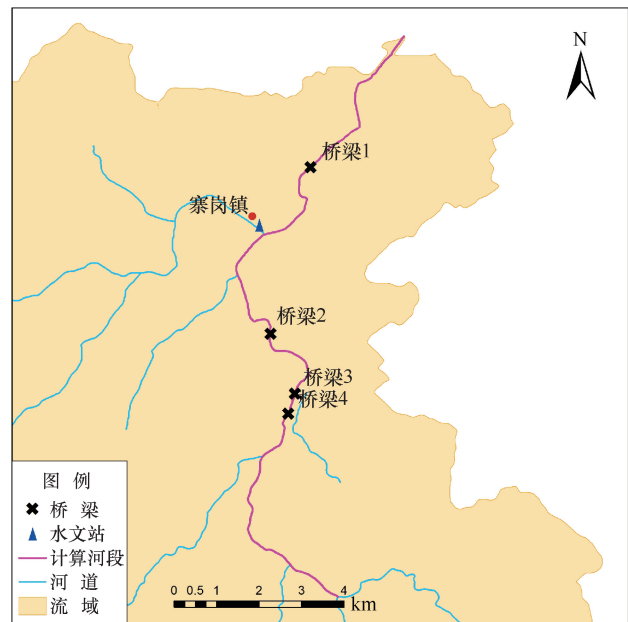


图 5 桥梁分布

Fig. 5 Bridge distribution

(1) 当水位小于涵洞顶高时, 仅采用宽顶堰公式进行过流计算。

(2) 当水位大于涵洞顶高且小于桥面桥板高度时, 仅采用闸孔出流公式进行过流计算。

(3) 当水位大于桥面桥板高度时, 采用闸孔出流公式和宽顶堰公式共同进行过流计算。

2.4 模型率定与验证

根据寨岗河流域站点资料, 选取不同场次开展水文模型和水动力模型率定和验证。

2.4.1 水文模型率定与验证

选取 11 场次典型暴雨山洪过程进行水文模型率定和验证, 以 2019 年 2 月—2022 年 2 月的 8 场雨洪过程进行模型率定, 以 2022 年 6 月—2022 年 7 月的 3 场雨洪过程进行模型验证。选取径流深相对误差 (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) 4 个指标作为评估水文模型计算效果的依据。其中 ReR 、 ReQ 和 TP 数值越接近于 0, NSE 数值越接近于 1, 表示计算结果越精确。各指标计算公式为

$$ReR = \frac{\overline{R_o - R_s}}{\overline{R_o}} \quad (1)$$

$$ReQ = \frac{Q_{o, P} - Q_{s, P}}{Q_{o, P}} \quad (2)$$

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

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

式中, \bar{R}_o 和 \bar{R}_s 分别为实测和模拟计算的平均径流深 (mm); $Q_{o,p}$ 和 $Q_{s,p}$ 分别为实测和模拟计算的洪峰流量 (m^3/s); $T_{o,p}$ 和 $T_{s,p}$ 分别为实测和模拟计算的峰现时间 (h); $Q_{o,i}$ 和 $Q_{s,i}$ 分别为第 i 时刻实测和模拟计算的流量值; \bar{Q}_o 为实测平均流量 (m^3/s); N 为流量序列长度。

对寨岗河流域所选取的 11 个场次山洪过程进行分布式水文模型模拟, 率定期和验证期各指标评估结果如表 1 所列, 部分场次洪水过程如图 6 所示, 率定期和验证期的径流深相对误差绝对值分别为 4.18% 和 4.17%, 洪峰流量相对误差绝对值为 12.11% 和 7.70%, 峰现时间误差绝对值均为 1.0 h, 平均 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.77 和 0.79, CNFF 模型能够较好地模拟流域洪水过程, 具有很好的适用性, 可进一步开展水动力分析。

表 1 水文模拟情况

Table 1 Hydrological simulation results

场次	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时间误差/h	Nash-Sutcliffe 效率系数
2019-02-21	-4.0	-4.8	3	0.80
2019-05-05	-4.8	10.3	-1	0.76
2019-06-13	1.4	11.5	1	0.66
2019-07-08	-3.1	9.4	-1	0.78
2020-06-07	0.8	12.2	-1	0.81
2020-06-09	11.6	19.3	0	0.75
2021-05-20	-1.1	-13.6	0	0.94
2022-02-20	-6.6	15.8	1	0.62
2022-06-13	0.2	0.3	1	0.86
2022-06-21	7.4	19.3	0	0.86
2022-07-04	4.9	-3.5	2	0.64

2.4.2 一维水动力模型率定与验证

选取 4 场次典型暴雨山洪过程进行一维水动力模型率定和验证, 分别为 2020-06-07 场次、2020-06-09 场次、2022-06-21 场次、2022-07-04 场次。其中 2020-06-07 和 2020-06-09 场次为率定期, 2022-06-21 场次和 2022-07-04 场次为验证期。

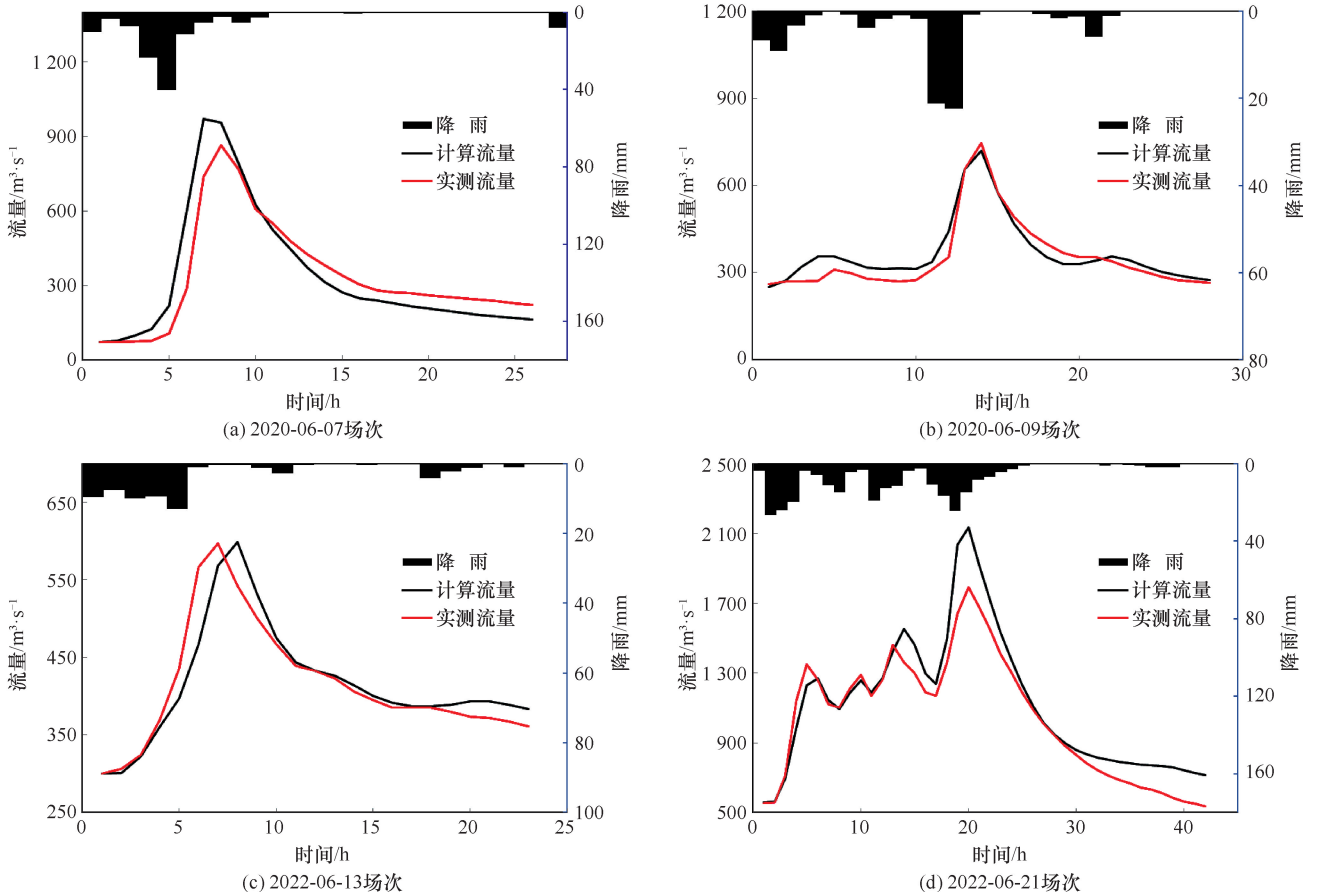


图 6 水文模型模拟效果

Fig. 6 Hydrological model simulation performance

利用 CNFF 模型计算的逐小时洪水流量过程, 驱动一、二维水动力模型计算, 模拟和分析寨岗河 4 个场次洪水演进过程, 模拟统计结果如表 2 所列, 率定期和验证期平均峰现时间差约为 37 min, 峰值流量平均相对误差约为 13.2%, 峰值水位平均相对误差约为 0.3%, 模拟对比结果如图 7—图 10 所示。IFMS 模型较好地模拟了河道水位过程变化, 可为洪水漫溢河道提供准确结果。

2.4.3 二维水动力模型率定

针对寨岗河 2022 年“6·21”场次洪水, 开展

现场调研, 在主要受灾区寨岗镇开展了洪痕位置和洪痕高程测量工作。因此选用“6·21”场次典型暴雨山洪过程进行二维水动力模型率定。

现场共测量寨岗镇范围内三处洪痕点位(见图 11), 其中万角村进水点路面水深为 1.5 m; 万角中学进水点路面进水约为 0.45 m; 寨岗镇进水点路面进水约为 0.8 m; IFMS 模型二维计算结果对比如表 3 所列, 万角村进水点计算最大水深与测量洪痕高程差值最大为 0.17 m, 相对误差为 11.3%, 万角中学进水点和寨岗镇进水点差值分别为 0.08 和 0.03, 相对

表 2 一维水动力模型模拟结果

Table 2 Simulation results of one-dimensional hydrodynamic model

场次	实测峰现时间 /年-月-日 T 时:分	计算洪峰时间 /年-月-日 T 时:分	站点峰值流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	计算峰值流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	站点峰值 水位/m	计算峰值 水位/m
2020-06-07	2020-06-07 T 06:00	2020-06-07 T 05:45	865	842.55	114.51	114.66
2020-06-09	2020-06-09 T 07:00	2020-06-09 T 06:50	747	836.07	113.43	113.76
2022-06-21	2022-06-21 T 14:00	2022-06-21 T 13:25	1 790	1 454.56	115.76	115.68
2022-07-05	2022-07-04 T 18:00	2022-07-04 T 18:30	792	637.01	113.54	112.99

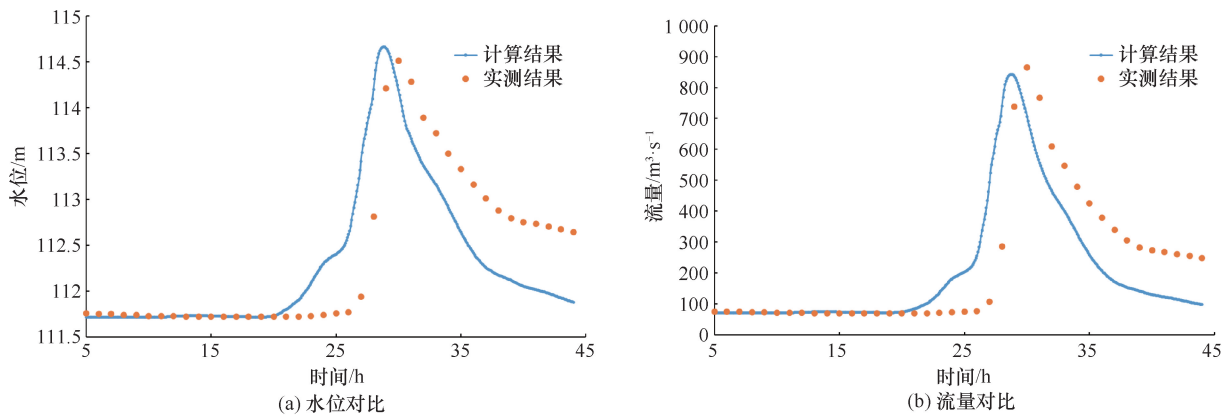


图 7 2020-06-07 场次水动力模型模拟效果

Fig. 7 Hydrodynamic model simulation performance for the event on June 7, 2020

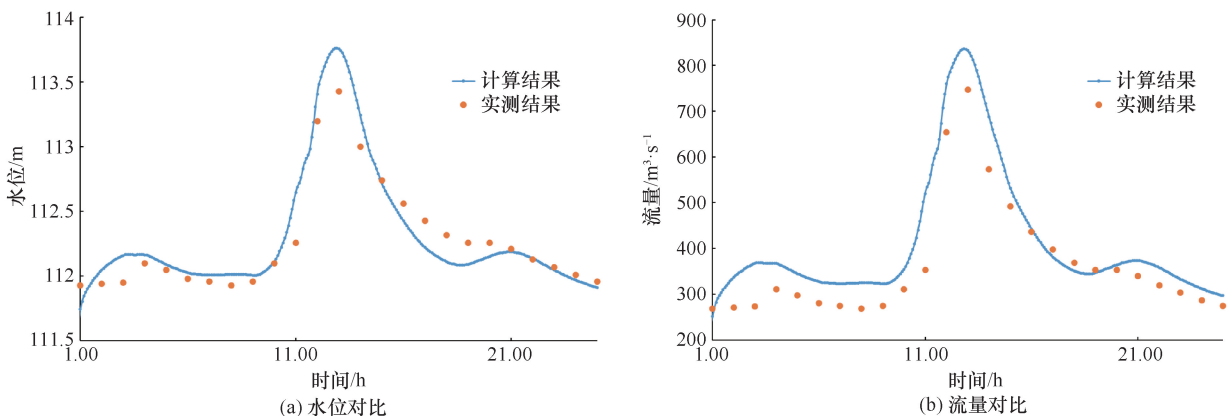


图 8 2020-06-09 场次水动力模型模拟效果

Fig. 8 Hydrodynamic model simulation performance for the event on June 9, 2020

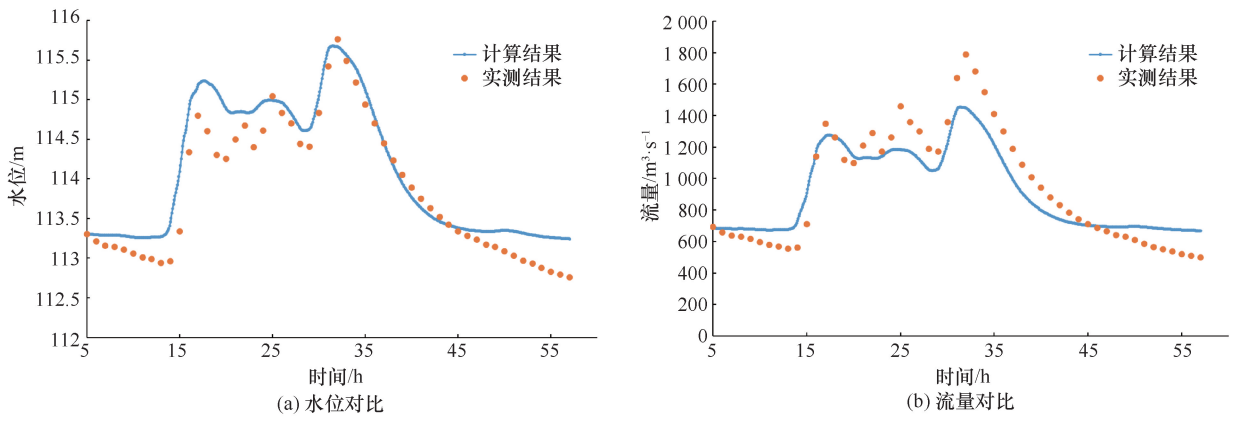


图 9 2022-06-21 场次水动力模型模拟效果

Fig. 9 Hydrodynamic model simulation performance for the event on June 21, 2022

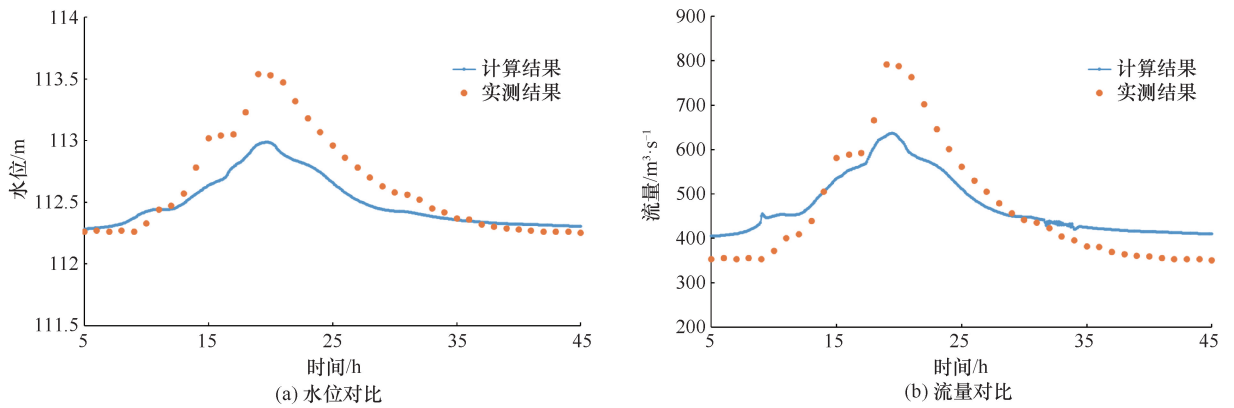


图 10 2022-07-05 场次水动力模型模拟效果

Fig. 10 Hydrodynamic model simulation performance for the event on July 5, 2022

表 3 二维水动力模型模拟结果

Table 3 Simulation results of two-dimensional hydrodynamic model

点位名称	测量洪痕 高程/m	计算最大 水深/m	高程差值 /m	相对 误差/%
万角村进水点	1.50	1.67	0.17	11.30
万角中学进水点	0.45	0.53	0.08	17.80
寨岗镇进水点	0.80	0.83	0.03	3.75

误差分别为 17.8% 和 3.75%。IFMS 模型可较好地模拟研究区洪水淹没过程, 为分析桥梁阻水影响提供较为准确的依据。

3 桥梁阻水分析

根据现场调查结果, 在所测量的 4 座桥梁中, 桥梁 4 (见图 5) 由于桥墩个数较多、间距较小、高度较低, 属于易发生阻水的桥梁工程。同时考虑到桥梁 4 两侧存在较多居民地, 选取桥梁 4 作为桥梁阻水影响分析对象, 采用水文水动力模型模拟 2022 年“6·21”场次桥梁半淤堵和全淤堵工况下山洪灾害影响。

3.1 桥梁参数设置

桥梁 4 根据实际情况进行堰和涵洞参数设置, 其中桥梁长度为 36.33 m, 桥洞高为 3.35 m, 存在两个宽度均为 0.80 m 的桥墩, 桥板厚为 0.80 m, 该桥梁护栏无明显阻水效果, 模型中不考虑。桥面桥板以上概化为水工建筑物堰, 堰顶高程即为桥面高程, 设置为 123.90 m, 堰宽即为桥梁长度, 设置为 36.33 m; 桥洞部分概化为水工建筑物涵洞, 涵洞底高程为河道深泓点高程, 设置为 119.75 m, 涵洞顶高程为底高程与桥洞高之和, 设置为 123.10 m, 涵洞宽为桥梁长度减去桥墩宽度, 设置为 34.73 m。模型参数设置如表 4 所列。

表 4 桥梁模型参数设置

Table 4 Bridge model parameter settings

序号	水工建筑物	宽度/m	顶高程/m	底高程/m
1	堰(桥面)	36.33	123.90	—
2	涵洞(桥洞)	34.73	123.10	119.75

当考虑桥梁不同淤堵情况时,在桥洞概化的水工建筑物涵洞中引入开度用以控制桥洞过水断面面积,模拟不同的桥梁淤堵工况,具体设置如下。

(1)当开度为 0 时,桥梁为全淤堵工况。

(2)当开度为 0.5 时,桥梁为部分淤堵工况。

(3)当开度为 1.0 时,桥梁为无淤堵工况。

3.2 断面水位分析

基于水文水动力模型计算寨岗河流域桥梁无淤堵、部分淤堵、全淤堵三种工况,选择桥梁 4 上游的横断面进行不同工况下水位过程计算(见图 12)。其中桥梁无淤堵工况的峰值水位为 126.5 m;部分淤堵工况的峰值水位为 127.4 m,较无淤堵工况下水位增高 0.9 m;全淤堵工况的峰值水位为 128.0 m,较无淤堵工况下水位增高 1.5 m。桥梁淤堵对河道洪水水位有明显影响,桥梁淤堵程度越严重,洪水水位越高。

3.3 淹没范围分析

以桥梁 4 局部地区为研究区,淹没范围模拟结果如图 13 所示,分析统计各工况淹没面积结果。其中工况为桥梁无淤堵时,洪水淹没面积为 0.74 km²;工况为部分淤堵时,洪水淹没面积为 0.81 km²,相对于无淤堵工况淹没面积增大 9.5%,为无淤堵工况淹没面积的 1.1 倍;工况为全淤堵时,洪水淹没面积为 0.99 km²,相对于无淤堵工况淹没面积增大 33.5%,为无淤堵工况淹没面积的 1.34 倍。洪水淹没面积与桥梁淤堵程度呈正相关变化,桥梁淤堵越严重,即桥梁阻水效果越明显,洪水淹没范围越大。

3.4 桥梁阻水原因分析

分析桥梁在无淤堵、部分淤堵、全淤堵三种工况下的过流能力变化,其中桥梁无淤堵工况下过流面积为 208.47 m²,部分淤堵工况下过流面积为



图 11 2022 年 6 月场次洪痕点位

Fig. 11 Flood mark points of events in June 2022

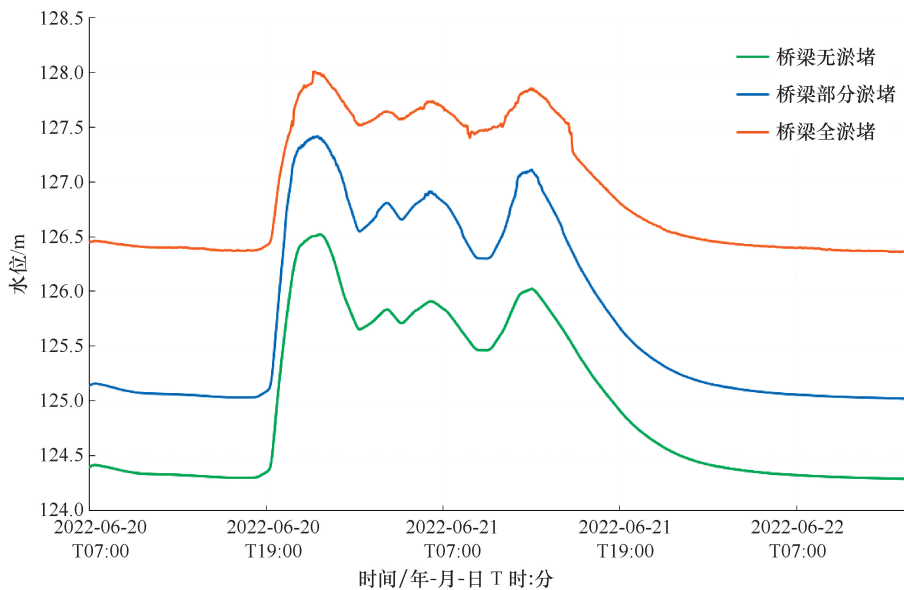


图 12 桥梁 4 所在横断面水位过程对比

Fig. 12 Comparison of water level variation at cross section of bridge 4

118.62 m²,全淤堵工况下过流面积为 80.04 m²。部分淤堵工况下过流面积为无淤堵工况的 56.9%,全淤堵工况下过流面积仅为无淤堵工况的 38.4%。桥梁发生淤堵时,随着淤堵程度越大,过流面积越小,过流能力也越差,导致桥梁上游的水位升高,极易发生洪水漫溢。

4 结果讨论

采用水文水动力模型定量分析桥梁阻水对山洪灾害带来的放大效应,利用概化的水工建筑物模拟桥梁

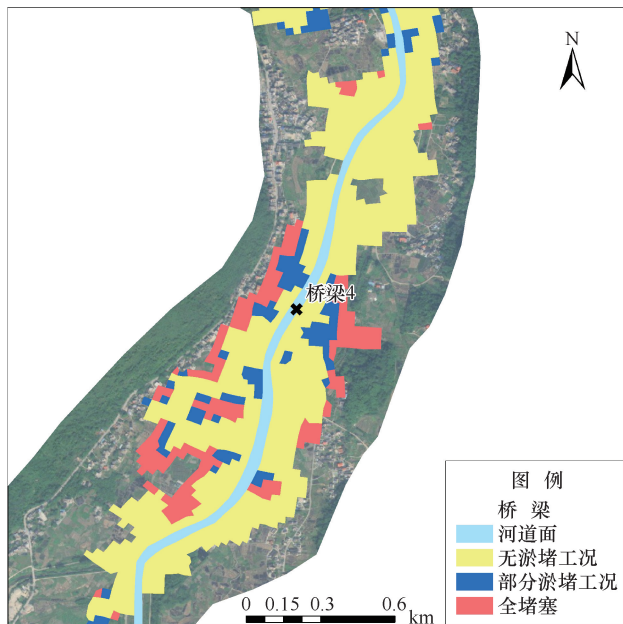


图 13 不同阻水工况下淹没范围

Fig. 13 Inundation extent under different water blocking conditions

阻水对水动力模型带来的影响, 为山洪灾害演进过程的不确定性分析提供了思路。本文研究桥梁淤堵设置仅考虑在相同场次洪水下自定义桥梁不淤堵、部分淤堵和全淤堵, 对于桥梁淤堵的设置考虑尚不全面, 主要有以下几个方面。

(1) 不同频率和洪水量级下, 桥梁淤堵程度实际是不同的, 降雨量越大, 淤堵程度越高。降雨量和淤堵程度之间的量化关系以及淤堵的可能性还需要探索分析。

(2) 河道桥梁的个数、桥梁淤堵的开始时间、持续时间以及淤堵程度变化过程在本文中尚未考虑和量化分析。

(3) 桥梁形状、净高、河道宽度、桥墩形状等对淤堵程度的影响尚未考虑。

同时本文只针对寨岗河流域开展了桥梁淤堵对山洪灾害放大效应的探索性研究, 后期选择多个流域开展研究工作, 以更好地探究桥梁淤堵导致山洪灾害放大效应量化规律是否符合, 加强山洪灾害放大效应的应用分析, 提高山洪不确定性研究方法准确性、全面性和适用性。

5 结论

对寨岗河流域建立水文水动力模型对 2022 年“6·21”场次山洪灾害桥梁阻水效应进行分析, 模型计算考虑了桥梁工程作用。开展了桥梁阻水分析,

通过桥梁无淤堵、部分淤堵及全淤堵工况下水位、淹没面积等水力参数结果对比, 可以得到以下结论:

(1) 基于考虑桥梁工程影响的水文水动力模型, 完成了寨岗河流域山洪过程分析, 水文模型率定期和验证期径流深误差绝对值均在 5% 以内, 洪峰流量误差绝对值均在 13% 以内, 平均峰现时间误差绝对值均为 1 h, 平均 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.77 和 0.79; 一维水动力模型率定期和验证期峰值流量平均误差为 13%, 峰值水位平均相对误差在 0.3% 左右。二维水动力模型洪痕点位与计算最大水深差值为 0.17 m, 最大相对误差为 17.8%。基于水文水动力模型的山洪模拟过程能够较好地反映寨岗河流域洪水演进特征, 计算的洪水水位、淹没面积等水力参数的精度可满足山洪灾害影响范围和程度分析需要。

(2) 寨岗河流域“6·21”场次洪水桥梁阻水分析结果表明, 桥梁阻水对山洪灾害有一定放大效应: 桥梁阻水越明显, 上游水位抬升越高, 洪水淹没面积越大, 受灾影响范围越大。桥梁全淤堵和部分淤堵相对于桥梁无淤堵情况上游水位分别抬升 0.9 m 和 1.5 m, 淹没面积分别为无淤堵工况的 1.34 倍和 1.10 倍。

(3) 桥梁阻水对山洪灾害具有明显放大效应, 主要是由于桥梁发生阻水时, 桥梁位置过流能力减弱, 导致寨岗河流域“6·21”场次全淤堵和部分淤堵工况在桥梁位置过流能力仅为无淤堵工况的 38.4% 和 56.9%。

参考文献 (References):

- [1] DOTTORI F, SALAMON P, BIANCHI A, et al. Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 87-102.
- [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] BORGA M, ANAGNOSTOU E N, BLÖSCHL G, et al. Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project [J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(7): 834-844.
- [4] 褚明华, 杜晓鹤, 何秉顺. 我国水旱灾害防御应对 [J]. *水利发展研究*, 2024, 24(8): 1-8.
CHU Minghua, DU Xiaohu, HE Bingshun. China's prevention and response to flood and drought disasters [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(8): 1-8.
- [5] 张明达, 李蒙, 戴丛蕊, 等. 基于 FloodArea 模型的云南山洪淹没模拟研究 [J]. *灾害学*, 2016, 31(1): 78-82.
ZHANG M D, LI M, DAI C R, et al. Simulation study of flood in

- Yunnan based on the flood area model [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(1): 78-82.
- [6] 田福昌, 赵胤懋, 苑希民. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的塔洋河下游洪水演进分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 16-20.
TIAN Fuchang, ZHAO Yinmao, YUAN Ximin. Flood routing analysis of lower reaches of Tayang river based on MIKE FLOOD[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(5): 16-20.
- [7] 林志强, 尼玛吉, 黄志诚. 西藏东南部山洪灾害过程水文动力模拟和临界雨量[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 183-187.
LIN Z Q, NI M J, HUANG Z C. Hydrological dynamics simulation and critical rainfall for flash flood in southeastern Tibet[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 183-187.
- [8] 潘婧, 陈燕, 唐伟, 等. 基于 InfoWorks ICM 的临安亚运场馆暴雨内涝模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 12-21.
PAN Jing, CHEN Yan, TANG Wei, et al. InfoWorks ICM-based simulative study on rainstorm waterlogging for Asian Games venues in Lin'an District[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(6): 12-21.
- [9] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks 的城市水系水文水力过程耦合模拟: 以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 609-616.
YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks: Case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(5): 609-616.
- [10] 沈豪, 曹大岭, 万洪涛, 等. 基于一二维耦合模型和水库调度的长江宜宾河段洪水遭遇与淹没分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 1-21.
SHEN Hao, CAO Daling, WAN Hongtao, et al. 1-D and 2-D coupling model and reservoir regulation-based analysis on flood encounter and inundation of Yibin Reach of Yangtze River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(4): 1-21.
- [11] ZHANG W T, ZHANG X N, LIU Y Z, et al. Assessment of flood inundation by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case study in mountainous watersheds along the coast of southeast China [J]. *Water*, 2020, 12(3): 822.
- [12] HAO Z Z, SANG G Q, LI T L. Inundation analysis of Xiuzhen River based on one-dimensional hydrodynamic model [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2271(1): 012003.
- [13] PATEL S B, MEHTA D J, YADAV S M. One dimensional hydrodynamic flood modeling for Ambica River, South Gujarat [J]. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2018, 5(4): 595-601.
- [14] THOMAS C, STAMATAKI I, ROSSELLÓ-GELI J. Reconstruction of the 1974 flash flood in Sóller (Mallorca) using a hydraulic 1D/2D model [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2023, 71(1): 49-63.
- [15] ROCA M, DAVISON M. Two dimensional model analysis of flash-flood processes: application to the Boscastle event [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2010, 3(1): 63-71.
- [16] 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.
- [17] 王旭滢, 阮跟军, 马婷, 等. 基于水文水动力模型的浦阳江流域洪水情景模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2): 113-118.
WANG X Y, RUAN G J, MA T, et al. Flood scenario simulation based on hydrologic-hydrodynamic integrating model in Puyang River Catchment [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(2): 113-118.
- [18] 王协康, 雷声, 王小笑, 等. 江西省靖安县“7·21”旅游景区山洪灾害成因及风险分析 [C]//中国力学学会. 第三十三届全国水动力学研讨会论文集. 重庆: 《水动力学研究与进展》杂志社, 2022: 1102-1108.
WANG Xiekang, LEI Sheng, WANG Xiaoxiao, et al. Causes and risk analysis of flash flood disasters in “7·21” tourist attractions in Jing'an County, Jiangxi Province [C]//The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. The 33rd National Conference on Hydrodynamics. Chongqing: Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022: 1102-1108.
- [19] 韩超, 梅青, 刘曙光, 等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2014, 29(6): 706-712.
HAN C, MEI Q, LIU S G, et al. Research and application on a coupled hydrological and hydrodynamic model in plain tidal river network [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(6): 706-712.
- [20] SEGURA-BELTRÁN F, SANCHIS-IBOR C, MORALES-HERNÁNDEZ M, et al. Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The flash flood of the Girona River (Spain) in 2007 [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 310-329.
- [21] 周琳, 邹振华, 章光, 等. 基于“情景-应对”的随县柳林镇“8·12”山洪灾害推演[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 14-23.
ZHOU L, ZOU Z H, ZHANG G, et al. Scenario response-based deduction of “8·12” torrential flood disaster in Liulin Town of Suixian County [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(1): 14-23.
- [22] PAPAIOANNOU G, VARLAS G, TERTI G, et al. Flood inundation mapping at ungauged basins using coupled hydrometeorological-hydraulic modelling: the catastrophic case of the 2006 flash flood in Volos City, Greece [J]. *Water*, 2019, 11(11): 2328.
- [23] ZHONG H, ZHANG B, MA T, et al. Flood scenario simulation, based on the hydrological and hydrodynamic model in the Puyang River Catchment [J]. *Water*, 2022, 14(23): 3873.

- [24] JHA M, AFREEN S. Flooding urban landscapes: analysis using combined hydrodynamic and hydrologic modeling approaches [J]. *Water*, 2020, 12(7): 1986.
- [25] LI W J, LIN K R, 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.
- [26] 刘荣华, 孙朝兴, 田济扬, 等. 山洪灾害监测预报预警云平台及应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(1): 63-69.
LIU R H, SUN C X, TIAN J Y, et al. Cloud platform and application for flash flood monitoring, prediction and early warning [J]. *China Flood & Drought Management*, 2022, 32(1): 63-69.
- [27] 翟晓燕, 郭良, 刘荣华, 等. 前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估[J]. *地理研究*, 2019, 38(12): 2957-2965.
ZHAI X Y, GUO L, LIU R H, et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rainfall variability on flash flood warning index at catchment scale [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(12): 2957-2965.
- [28] 施志群, 梁立峰, 毕青云, 等. 福建省山洪灾害预警预报系统及其试点建设[J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(6): 39-46.
SHI Z Q, LIANG L F, BI Q Y, et al. Flash flood forecasting and warning system and pilot application in Fujian Province [J]. *China Flood & Drought Management*, 2017, 27(6): 39-46.
- [29] BORGA M, ANAGOSTOU E N, BLÖSCHL G, et al. Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project [J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(7): 834-844.
- [30] 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 X Y, GUO L, LIU R H, 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.
- [31] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(4): 262-270.
LIU C J, WEN L, ZHOU J, et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(4): 262-270.
- [32] 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, ZHANG Dawei, et al. Adoption of evaluation software in flood risk map drawing [J]. *China Water Resources*, 2017(5): 17-20.

(责任编辑 王璐)