

马强, 李青, 郝思佳, 等. 四川汉源“7·20”山洪泥石流灾害复盘分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 204-215. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.015

MA Qiang, LI Qing, HAO Sijia, et al. Review and analysis of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan, Sichuan [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 204-215. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.015

四川汉源“7·20”山洪泥石流灾害复盘分析

马强¹, 李青¹, 郝思佳², 蔡茜媛², 王雪梅¹, 汪杨自远²,
GOURBESVILLE Philippe¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 华北水利水电大学 信息工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】2024年7月20日, 四川省雅安市汉源县马烈乡新华村发生特大山洪泥石流灾害, 造成1500余人受灾, 基础设施损毁严重。通过此次灾害进行复盘分析, 探究本次山洪泥石流复合灾害形成机理, 分析灾害影响范围及程度, 并提出针对性的防灾减灾对策, 为未来类似山洪泥石流灾害的防治工作提供参考与借鉴。【方法】采用了遥感测量、现场调查、数值模拟、设计指标对比等方法及手段, 在模拟分析中分别利用推理公式法、面积比拟法和分布式水文模拟法等技术手段进行多方法对比分析, 综合确定此次洪水重现期。【结果】通过推理公式法计算得出大沟头与马烈沟汇口处30 a一遇设计洪水洪峰为286.00 m³/s; 通过面积比拟法基于调查洪痕计算本次灾害洪峰约为263.00 m³/s; 利用分布式水文模拟计算本次灾害洪峰流量为249.70 m³/s, 经综合分析确定本次洪水重现期约为30 a一遇。【结论】经研究分析, 确定强降雨为诱发本次复合灾害的主要原因。流域内不利的地形、地貌和地质条件加重了灾害的危害性, 桥涵堵塞雍水则进一步扩大了灾害的影响范围。同时灾害应对中预警系统、应急响应机制及风险管理方面的不足也是导致此次灾害损失严重的重要原因。

关键词: 山洪泥石流; 复合灾害; 灾害复盘; 灾害机理; 四川汉源; 风险评估; 洪水; 数值模拟



DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.015

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)08-0204-12

Review and analysis of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan, Sichuan

MA Qiang¹, LI Qing¹, HAO Sijia², CAI Xiyuan², WANG Xuemei¹, WANG Yangziyuan²,
GOURBESVILLE Philippe¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Information Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: [Objective] On July 20th, 2024, a severe flash flood and debris flow disaster occurred in Xinhua Village, Malie Township, Hanyuan County, Ya'an City, Sichuan Province, affecting over 1 500 people and causing severe damage to

收稿日期: 2025-03-02; 修回日期: 2025-05-30; 录用日期: 2025-05-30; 网络出版日期: 2025-07-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3006702); 中国水利水电科学研究院“五大人才”项目(WH0145B062022)

作者简介: 马强(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水信息学、防洪减灾研究。E-mail: maqiang@iwahr.com

通信作者: 郝思佳(1992—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水文模拟、机器学习研究。E-mail: haosijia@ncwu.edu.cn

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

infrastructure. A disaster review and analysis is conducted to investigate the formation mechanism of this compound flash flood and debris flow disaster, analyze the scope and degree of its impact, and propose targeted disaster prevention and mitigation measures, providing references for the prevention and control efforts of similar flash flood and debris flow disasters in the future. [Methods] Remote sensing measurement, field investigation, numerical simulation, and comparison with design indicators were employed. In the simulation analysis, the inferential formula method, area analogy method, and distributed hydrological simulation method were employed for multi-method comparative analysis to comprehensively determine the return period of this flood. [Results] Using the inferential formula method, the peak discharge of a 30-year return period design flood at the confluence of Dagotou and Malie Gully was calculated to be $286.00 \text{ m}^3/\text{s}$. Based on surveyed flood marks, the peak discharge of this disaster was estimated to be approximately $263.00 \text{ m}^3/\text{s}$ using the area analogy method. By applying the distributed hydrological simulation method, the peak discharge of this disaster was calculated to be $249.70 \text{ m}^3/\text{s}$. A comprehensive analysis indicated that the return period of this flood was approximately 30 years. [Conclusion] The analysis confirms that the intense rainfall is the primary triggering factor of this compound disaster. The unfavorable topographic, geomorphic, and geological conditions in the watershed exacerbate the severity of the disaster, while the blockage of bridges and culverts further expands the impact of the disaster. Moreover, deficiencies in early warning systems, emergency response mechanisms, and risk management during disaster response are key factors leading to the severe loss.

Keywords: flash flood and debris flow; compound disasters; disaster review; disaster mechanism; Hanyuan, Sichuan; risk assessment; flood; numerical simulation

0 引言

全球变暖正在逐步加剧气候系统的不稳定性。在山地丘陵地区,山洪泥石流等复合灾害成为地球各圈层相互作用最为激烈的一种表现形式,呈现出多介质、多过程复合叠加的特征^[1]。山洪是在山区丘陵地带溪沟中发生的夹杂泥沙石块等杂质的突发性洪水,具有洪峰流量大、持续时间短、破坏力强等特点。山洪灾害主要由短时高强度降雨、雪崩融水、冰湖溃决等因素触发,在同一地区或区域内具有较强的重复发生性^[2]。泥石流是山洪灾害的主要伴生灾害之一,是一种受流域地貌条件影响的自然灾害,是沟谷或山坡上由暴雨或融雪导致的挟带大量泥沙、石块和巨砾的特殊洪流^[3-4]。通常山洪和泥石流灾害容易造成大量人员伤亡和财产损失^[5]。山洪泥石流是山洪和泥石流相互作用的自然灾害,其发展演变过程中受地形和工程设施影响明显,会挤压主河道甚至阻断河道形成更严重的灾害^[6]。因此,对频繁遭受山洪泥石流影响的地区开展灾害调查及复盘分析,揭示气候变化等因素对该区域地质、水文条件的影响及灾害触发机制,对提升区域防灾减灾能力,推动灾害科学研究和技术创新具有十分重要的意义。

崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害主要分布于我国山地、高原、丘陵地区,尤其在长江上游、黄河中上游及青藏高原南部最为频繁^[7-8]。四川省位于我国三级阶梯的第一、第二级过渡地带,省内降水丰沛、地质条件复杂,新构造活动强烈,是我国山洪泥

石流灾害高发区^[9-10]。自20世纪80年代以来,四川盆地多次出现由夏季暴雨导致的山洪泥石流灾害。其中,汉源县及周边地区荥经县和石棉县频繁遭受泥石流灾害,人员伤亡和财产损失重大^[11]。2013年7月4日汉源县西南侧的石棉县发生了大规模泥石流灾害,导致河流堵塞、沟道侵蚀等问题,对当地的生态环境和基础设施建设造成严重影响,造成了重大经济损失和人员伤亡^[12]。四川汉源县富泉镇西沟为高频泥石流沟,2018年8月6日发生大规模滑坡,特殊的地质条件与前期持续的降雨形成了滑坡—堰塞坝—泥石流灾害链^[13]。汉源县周边的甘洛县在2019年遭遇了群发性山洪泥石流灾害,现场调查结合相关影像和雨情数据表明短期强降雨、丰富的固体物质资源和有利的地形条件等因素对泥石流灾害形成起到了重要促进作用^[14]。近年来,随着四川省山区经济发展,省内山洪泥石流危害逐渐加剧、规模不断增大,并呈现出一定的周期性^[15]。常作为连锁灾害相继发生的山洪与泥石流显著扩大了灾害的影响范围,加剧了破坏程度^[16]。

降雨强度与地表灾害强度之间的非单调关系导致对单一触发因素(如降雨)开展研究不足以全面反映灾害的复杂性和不确定性^[17]。众多学者开展了大量的山洪泥石流研究,以探索更加有效的防灾减灾策略。采用遥感及地理信息技术通过复原山洪泥石流灾害发生现场,对比灾前灾后区域地形、地貌变化进而反演灾害发生过程是山洪泥石流灾害研究中的常用技术手段。张杰等^[18]通过实地观测、遥感监测等技术

手段获取关键数据,揭示了云南贡山“8·18”山洪泥石流形成机理和致灾特征。丰强等^[19]利用遥感技术研究了四川省汶川震区“8·20”登溪沟山洪泥石流灾害后的区域地形变化,结合现场调查复盘了灾害形成的过程。姚秋玲等^[20]通过实地考察和无人机航拍等手段,研究了陕西省西安市长安区“8·11”山洪泥石流形成的条件变化、势能演变及运动机理,对灾害的特点及影响进行了调查分析。CHONG等^[21]以中国白龙河流域的山洪泥石流灾害链为研究对象,采用遥感方法、地球物理技术、数值模拟和经验公式,构建了一种综合分析方法对该地区灾害链形成机制进行分析。QING等^[22]通过现场调查、遥感反演和数据分析研究了贵州省营盘乡山洪泥石流灾害,探讨了灾害成因和风险,并提出了相应的减灾策略。

自然界的降雨径流过程是山洪泥石流灾害发生的核心驱动力,随着数值模拟技术的发展,越来越多的专家学者采用遵守物理规律的分布式水文模型对山洪泥石流过程开展模拟分析。QIAO等^[23]提出了一种基于降雨-不稳定土壤耦合机制的山洪泥石流分析方法,可以结合降雨与土壤不稳定性对山洪泥石流的形成进行模拟分析。DESTRO等^[24]构建了一个分布式山洪和泥石流耦合模型,可以用于模拟山洪泥石流形成过程,在泥石流触发机制的识别方面具有较高的适用性。郝思佳等^[25]利用水文水动力模型对河南王宗店村“7·20”山洪灾害进行了复盘分析,深入研究了山洪灾害造成洪水淹没范围的时空变化。马强等^[26]提出的时空变源分布式水文模拟方法,通过划分地貌水文响应单元,实现了对流域混合产流模式的精细化模拟,可为泥石流水文过程模拟提供参考。常鸣等^[27]利用FLO-2D模型模拟了四川康定姑咱“8·3”特大山洪泥石流的发展演变过程,复盘了泥石流的影响范围及造成的地形地貌变化。DING等^[28]利用FLO-2D模型系统评估了云龙县泥石流灾害的风险,为山区泥石流灾害防治提供了科学参考。

近年来,随着人工智能技术的兴起,部分学者开始尝试采用人工智能方法对山洪泥石流过程进行研究。JIANG等^[29]提出了一种考虑了相似背景条件下泥石流临界条件的相似性的深度学习模型,用于预测降雨引发泥石流的时空概率。ABBATE等^[30]提出了可以综合模拟水文循环与地质灾害过程的CRHyME模型,模型结果与现场观测高度一致。李莉等^[31]提出了一种基于改进云模型和线性优化算法的山区泥石流危险性评价方法,可以更准确地评估泥石流灾害的

风险。虽然采用人工智能技术的新一代分析模型为山洪泥石流研究提供了新的思路,但是受限于数据与灾害现场复杂条件的影响,目前山洪泥石流研究仍多采用基于少量观测数据的单一过程模拟,对复合灾害链的模拟手段较少,对灾害链的整体演化过程的认识仍存在不足^[32]。

本文以2024年7月20日四川省汉源县马烈沟山洪泥石流灾害为例,基于少量的实测数据,并结合部分遥感数据,分别采用公式推理法、面积比拟法及分布式水文模拟等多种方法对汉源“7·20”山洪泥石流灾害进行综合分析,探究灾害发生、发展机制,评估灾害影响范围及程度,并针对此次灾害应对中暴露出的不足提出对策建议,弥补工程措施在极端气候灾害中的不足,为未来类似山洪泥石流灾害的防治提供参考与借鉴。

1 研究区概况

四川省拥有特殊的地理环境、复杂的地质构造和独特的气候条件,是我国山洪泥石流等自然灾害的高发区^[15]。汉源县位于四川省雅安市西南部,横断山脉北段东缘,处于川西高原与四川盆地的过渡区域。汉源县东西延伸71 km,南北宽70 km,总面积达到2 382 km²,年均降雨量742 mm,南部和东南部降雨较多,北部和西北部降雨较少,山区降雨量高于河谷坝区。在汉源县内,流域面积超过50 km²的河流有14条、河沟94条、冲沟1 753条,主要过境河流包括流沙河、宰骡河、白岩河、西街河、鲁布沟和深溪沟等(见图1)。

汉源“7·20”山洪泥石流灾害发生于县内马烈乡新华村大渡河支流白岩河左岸支流的马烈沟。马烈沟流域面积82 km²,沟长21 km,平均比降约为113‰。成灾点新华村3组断面以上的流域面积约为49 km²,由主沟新合沟(流域面积约40 km²,比降约114‰)和右岸支沟大沟头(又称烂泥湾沟,流域面积约9 km²,比降约169‰)汇合组成。根据2022年遥感影像,大沟头沟和马烈沟均为典型泥石流沟,沟内块石砾石等物源丰富。汉源县马烈沟区域位于龙门山断裂带南段与鲜水河断裂带东缘的交汇区,地质构造复杂,受新华系铅锌厂断裂(北东40°走向,沿马烈河谷展布)与北西向“歹”字形构造体系复合控制,岩体破碎,新构造运动强烈^[33-34]。区域内出露二叠系玄武岩及灰岩等地层,风化强烈,第四系松散堆积物广泛分布。多期次构造运动叠加导致岩体破碎,风化强烈,形成大量松散堆积物^[35]。具体表现

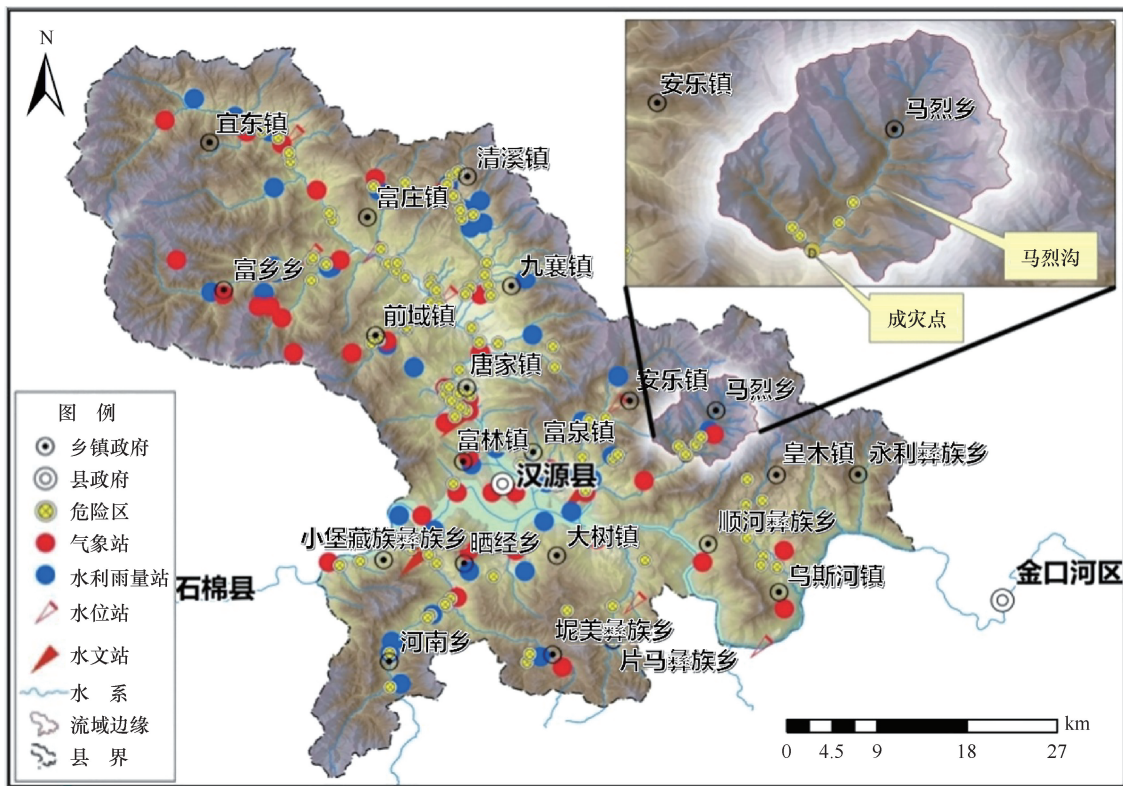


图1 汉源县马烈沟流域地形

Fig. 1 Topography of Maliegou watershed, Hanyuan County

为断层(裂), 褶皱构造发育, 岩体破碎程度较高、坡残积物普遍发育, 为地质灾害的孕育提供了条件。受多期次构造叠加影响, 该区域斜坡稳定性差, 地质灾害(如滑坡、崩塌)高风险区集中于断裂交汇带及陡坡地段, 强降雨与地震活动为主要诱发因素^[36]。

2 研究方法

2.1 研究思路

降雨是诱发山洪泥石流的关键因素之一^[37]。本研究首先通过对汉源县流域内站点实测雨量进行分析, 确定暴雨落区及量级; 其次, 基于应急监测数据与暴雨图集资料, 采用推理公式法计算新华村3组断面不同重现期设计洪水, 通过与面积比拟法和分布式水文模拟计算洪峰进行对比分析, 确定此次灾害洪水重现期; 最后, 通过现场实地调查, 溯源泥石流灾害形成、发展与演变特征, 复盘此次灾害的应对过程, 找寻防御薄弱环节, 为未来该区域山洪泥石流复核灾害的应急处置提供科学建议。本研究整体技术路线如图2所示。

2.2 模型工具

SKY-HydroSAT 分布式水文模型是中国水利水电

科学研究院专为应对中小流域产汇流机制的复杂性与多变性而设计的新一代分布式水文模型。其核心在于“时空变源”概念的提出, 即土壤含水量在外界因素(降雨入渗、蒸发等)与内在因素(重力、基质吸力等)共同作用下发生的时空动态变化。这种动态变化通过参数化体系实现量化表征, 其中土壤水力参数采用 Van Genuchten 模型标定, 植被截留能力基于全国植被类型数据库率定, 洼地蓄水量则通过 LiDAR 地形扫描数据反演获取。从而使得流域产流模式在时间和空间上展现出超渗与蓄满两种机制的动态组合^[38]。该模型首先依据流域下垫面条件, 将模拟区域精细划分为多个地貌水文响应单元, 综合考虑土壤饱和和导水率和土地利用类型等指标进行划分, 每个单元依据其独特的下垫面特征确定初始主要产流模式。在每个响应单元内部, 构建了三层垂向混合产流模型, 该模型从平面、垂向及时段三个维度进行模拟计算, 旨在精确捕捉并模拟小流域洪水在时间和空间上的复杂变化。相比之下, 传统的水文模型往往过于依赖基于经验的产流系数或简化的 Green-Ampt 方程进行模拟, 从而导致模拟精度受限^[39]。SKY-HydroSAT 分布式水文模型采用了 GARTO 一维非饱和下渗计算方法, 通过离散化包气带土壤含水量为具有恒定含水量的

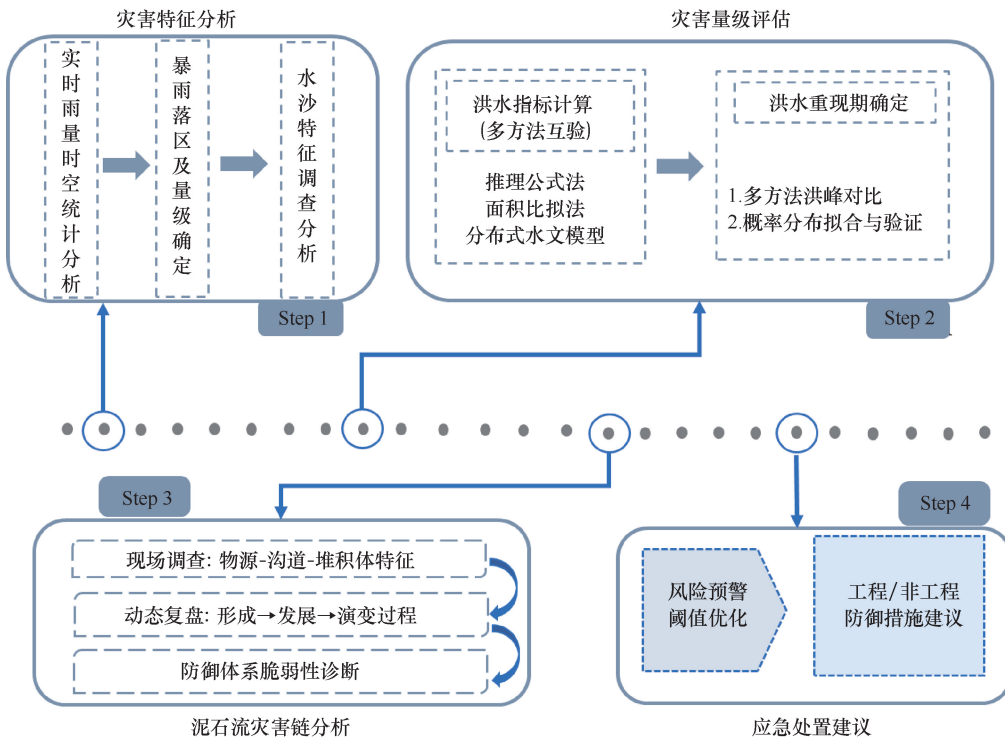


图2 汉源“7·20”山洪泥石流灾害复盘技术路线
Fig. 2 Technical roadmap for review of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

区间, 并求解一维入渗方程, 高效地模拟了响应单元表层土壤下渗率的变化, 实现了对湿润锋垂向位移的快速而准确的计算。此外, 在计算土壤水分再分配时, GARTO 算法还充分考虑了不同含水量区间内吸力的影响, 进一步提升了模拟的精确度。这一方法的应用, 使得该模型在模拟中小流域洪水过程时表现出更高的准确性和可靠性^[40-41]。模型结构如图 3 所示, 主要参数如表 1 所列。

3 灾害特征分析

3.1 灾害过程

2024 年 7 月 19 日 23 时, 四川省汉源县马烈沟小流域迎来了强降雨, 20 日 0 时至 3 时, 降雨强度达到了顶峰。此次短时强降雨主要集中在马烈沟流域上游, 强降雨引发的山洪对马烈沟沟道及两岸的沉积物层造成严重冲刷, 导致山洪泥石流复合灾害的发生。裹挟着大量泥沙的山洪对沟道两岸的居民房屋进行了猛烈冲击, 大量房屋被损毁、埋没。马烈沟下游新华村 5 个自然村不同程度受灾(见图 4)。马烈沟上游干、支流汇合形成的水石洪流, 冲毁新华村 5 组多处房屋。水流中夹带的泥沙、树木和其他杂物在新华村 3 组村头的人行桥涵洞内形成了堵塞, 导致洪流改道

入村破坏房屋。此次灾害共对新华村 35 户造成严重影响, 致使 1 500 余名群众受灾, 40 余处房屋、3 座桥梁及 60 余 km 道路损毁, 呈现出以泥石流为主的典型泥石流灾害破坏能力强大的特征^[42]。

3.2 降雨特征

本次汉源县山洪泥石流灾害的降雨过程从 2024 年 7 月 19 日 8 时开始, 至 20 日 8 时结束。流域内新合站 20 日 2 时最大小时雨量达到 55.60 mm, 最大 3 h(20 日 0 时至 3 时) 累积降雨量达 86.50 mm[见图 5(a)]。根据事后调查反演的降雨时空分布图, 此次降雨过程呈现较高的空间不均匀性, 汉源县 7 月 19 日至

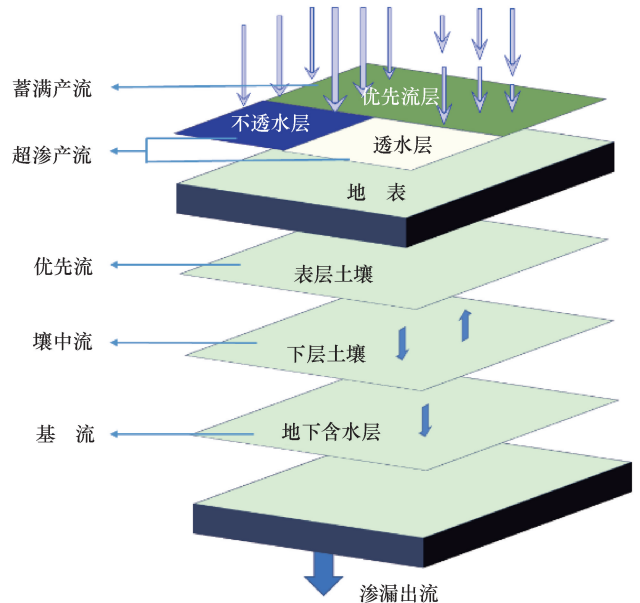


图3 时空变源分布式水文模型结构
Fig. 3 Structure of SKY-HydroSAT model

20 日累积降雨主要位于马烈沟上游, 日累积雨量超过 100 mm[见图 5(b)]。

3.3 水沙特征

汉源县位于大渡河中游, 大渡河横穿东西, 流沙

表 1 时空变源分布式水文模型主要参数

Table 1 Key parameters of SKY-HydroSAT Model

参数	含义	单位	取值	参数	含义	单位	取值
K_e	植被蒸发折算系数		0.85	K_{s2g}	土壤向地下水渗漏系数	m/d	0.22
I_c^s	夏季主要植被类型的载流能力	mm	16.53	P_{erip}	不透水面积百分比	%	0.00~1.00
per_{fd}	洼地面积所占流域百分比	%	0.15	P_{erp}	优先流面积百分比	%	0.05~0.09
W_{fd}	洼地平均蓄水量	mm	7.53	K_{p1}	优先流出流线性系数		0.00~1.00
K_s	非采矿影响区饱和土壤导水率	m/s	$4 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-6}$	K_{p2}	优先流出流非线性系数		0.00~1.00
θ_e	孔隙率		0.43	K_{i1}	壤中流出流线性系数		0.00~1.00
θ_r	残余含水率		0.078	K_{i2}	壤中流出流非线性系数		0.00~1.00
α	VG 模型参数		0.04	K_g	基流出流系数		0.00~0.01
n	VG 模型参数		1.56	K^g	地下水水库渗漏系数		0.01
H_l	上层土壤厚度	m	0.00~0.50	α_{ofp}	坡面透水区域的运动波参数		0.00~100.00
H	土壤厚度	m	0.50~2.00	n_{ofp}	坡面透水区域的运动波参数		0.50~3.00
θ_i	土壤初始含水率		0.1~0.4	α_{chanp}	运动波河道汇流参数		0.001~100
θ_{fc}	田间持水率		0.4	n_{chan}	运动波河道汇流参数		0.5~3

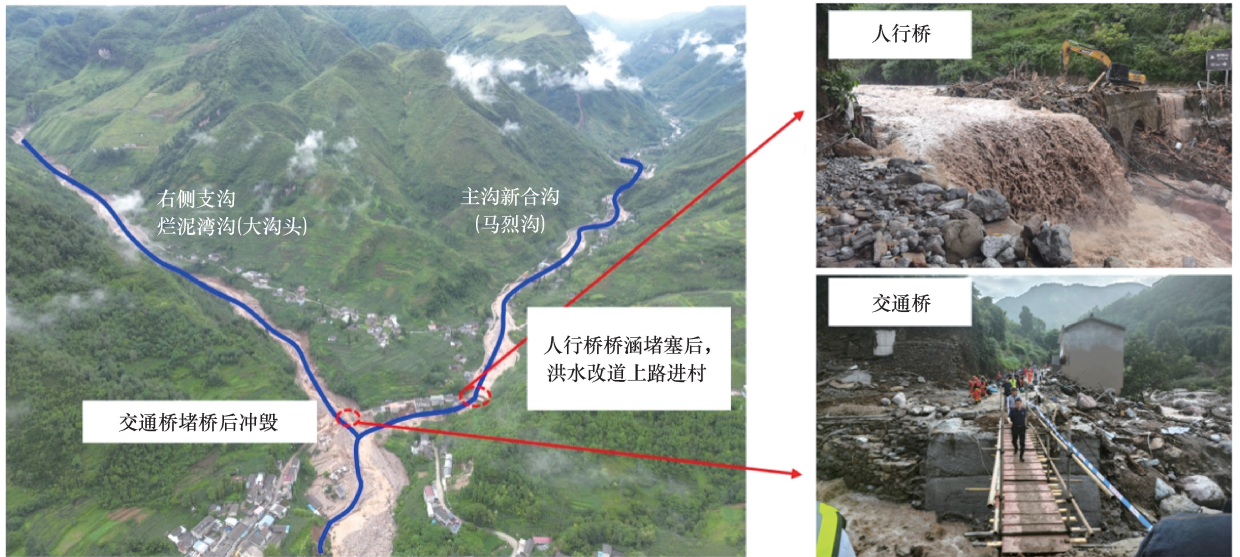
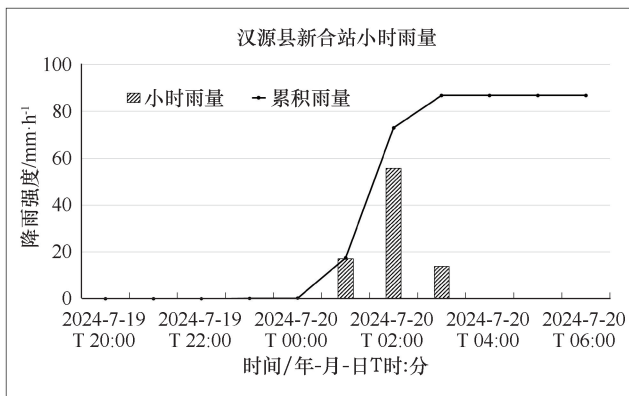
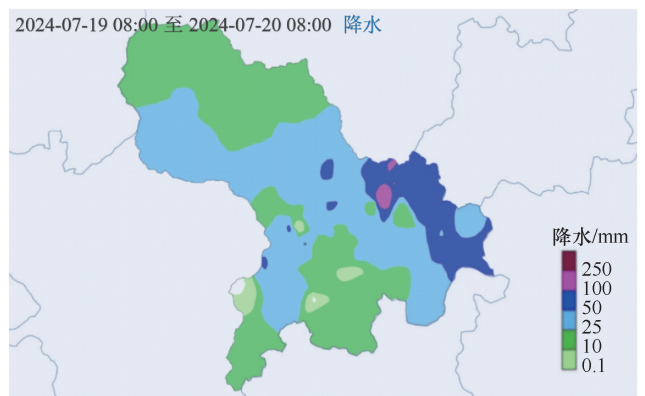


图 4 汉源“7·20”山洪泥石流灾害现场情况

Fig. 4 On-site conditions of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan



(a) “7·20”降雨时间分布



(b) “7·20”降雨空间分布

图 5 汉源“7·20”山洪泥石流灾害降雨时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of rainfall during “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

河纵贯南北,形成了四周高山环绕,中部河谷低平的地势。境内自然灾害主要有山洪(溪河洪水)、崩塌、滑坡、泥石流等,属山洪和地质灾害高发区。近年来城乡经济建设发展迅速,阻水兴工、乱倾乱倒、挤占河道现象与日俱增,造成河道行洪不畅,加深了山洪灾害危害。

2024年7月20日14时,雅安市水文中心在此次灾害成灾点之一新华村5组开展洪水应急调查。经现场实测,过流水面宽约24.40m,水面流速约为2.89m/s,取水面流速系数0.85,糙率0.14,依据测量洪痕确定洪峰水位1733.21m。在洪水的冲击下,马烈沟小流域沟道两岸冲刷严重,为水石流(泥石流的一个类别)的形成提供了丰富的固体物源。特别是烂泥湾沟、瓦板山支流为典型泥石流沟道,沟道砂石沉积物厚而松散,沟道纵比降大,在山洪作用下沟道及两岸严重冲刷,高速水流挟带大量泥沙向下游输送,并在大部分河段和沿河房屋内造成严重的泥沙淤积(见图6),灾后调查还原分析,此次灾害的泥沙淤积量约为20万~30万m³。

4 灾害复盘分析

4.1 设计洪水计算

依据四川省年最大雨量等直线分布图,对马烈沟小流域不同重现期下的1h、3h(线性内插)及6h设计暴雨进行计算(见表2),对比汉源县新合站最大1h时雨量55.60mm,最大3h雨量86.50mm,确定此次汉源“7·20”山洪泥石流灾害1h降雨重现期约10~20a一遇,3h降雨重现期约20~50a一遇。

采用《四川省水文手册》中的推理公式^[43]为

$$Q_p = 0.278 \times \Psi \times \frac{S}{\tau^n} \times F \quad (1)$$

式中, Q_p 为设计洪峰流量(m³/s); S 为设计频率下的小时降雨量(mm/h); τ 为汇流时间(h); μ 为流域平均损失率; Ψ 为洪峰径流系数; n 为暴雨衰减数; F 为流域面积(km²)。

基于全国山洪灾害调查分析评价数据集中的汉源县马烈乡小流域数据及设计暴雨数据,计算该流域不同重现期的设计洪水洪峰(见表3)。按照雨洪同频原则,本次洪水频率按30a一遇推算。采用推理公



(a) 泥石流淤积冲毁房屋



(b) 小水电站位置河道严重淤积

图6 汉源“7·20”山洪泥石流灾害泥沙淤积情况

Fig.6 Sediment accumulation of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

表2 汉源“7·20”山洪泥石流灾害降雨重现期计算结果

Table 2 Calculation results of rainfall return period for “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

时段	观测值/mm	多年均值/mm	C_v	C_s/C_v	不同重现期设计暴雨/mm			
					$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$
1 h	55.6	34.00	0.45	3.50	85.70	76.50	63.90	54.40
3 h	86.5	—	—	—	106.00	94.20	78.20	65.80
6 h	86.8	50.00	0.50	3.50	137.00	121.00	99.50	83.00

表3 汉源县马烈沟小流域设计洪水计算结果

Table 3 Calculation results of design flood for Maliegou small watershed in Hanyuan

重现期/%	24h 降雨量/mm	n	S	τ_0	μ	Ψ	τ	洪峰/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	180.90	0.79	90.30	3.45	4.01	0.88	3.60	401.00
2	158.90	0.80	80.00	3.59	3.84	0.86	3.76	334.00
3.33	142.70	0.80	72.30	3.71	3.72	0.85	3.91	286.00
5	129.70	0.81	66.20	3.82	3.61	0.83	4.05	249.00
10	107.50	0.81	55.70	4.05	3.41	0.80	4.35	188.00
20	85.20	0.82	45.10	4.35	3.20	0.76	4.74	133.00
50	55.30	0.85	30.50	4.98	2.81	0.72	5.54	71.30

式法, 30 a 一遇设计洪水洪峰流量为 $286 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

根据雅安市水文中心 7 月 23 日下午在新华村 5 组(大沟头汇合口上游顺河距离约 480 m, 集水面积约 35 km^2)的洪痕调查, 反算出该处洪峰流量为 $168 \text{ m}^3/\text{s}$, 再按面积比拟到大沟头与马烈沟汇口处, 其洪峰流量约 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ 。结合推理公式法推算的设计洪峰 $286 \text{ m}^3/\text{s}$, 估算本次大沟头与马烈沟汇口处洪峰约 $263 \text{ m}^3/\text{s}$, 重现期约 30 a 一遇。

4.2 分布式水文模拟

基于全国山洪灾害调查分析评价数据集及主要站点降雨数据, 提取汉源县马烈乡小流域地形、土壤及土地利用数据(见图 7), 采用 SKY-HydroSAT 模型软件, 构建以 $10 \sim 30 \text{ km}^2$ 为最小计算单元的分布式水文模型。

利用 SKY-HydroSAT 分布式水文模型对汉源县马烈沟小流域中烂泥湾沟、马烈沟和新华村 3 组断面(与雅安水文局测验断面同位置)进行洪水过程分析。模型模拟结果显示新华村 3 组断面处的模拟洪峰流量为 $249.70 \text{ m}^3/\text{s}$ (见图 8)。水文模拟结果与灾后调查估算结果($263 \text{ m}^3/\text{s}$)基本一致, 相对模拟洪峰误差为 -5% , 验证了模拟结果的准确性。表明水文模型计算结果可以复盘此次山洪灾害洪水过程, 支撑对山洪灾害成因的分析。

将模拟洪峰与计算获得的不同重现期设计洪水洪峰进行对比, 确定此次造成汉源“7·20”山洪泥石流的洪水量级约为 30 a 一遇。从模型模拟结果可知, 新华村 3 组断面处上游马烈沟断面的模拟洪峰流量为 $230 \text{ m}^3/\text{s}$, 烂泥湾沟断面的模拟洪峰流量为 $18.40 \text{ m}^3/\text{s}$, 判断此次汉源“7·20”山洪泥石流灾害中, 新华村 3 组断面处洪水主要来源为马烈沟小流域暴雨导致的山洪。

4.3 灾害成因分析

由山洪引发的泥石流灾害通常由极端的降雨和充足的松散土石物质积累导致^[44]。综合现场调查与模拟分析, 本次汉源“7·20”山洪泥石流灾害成因

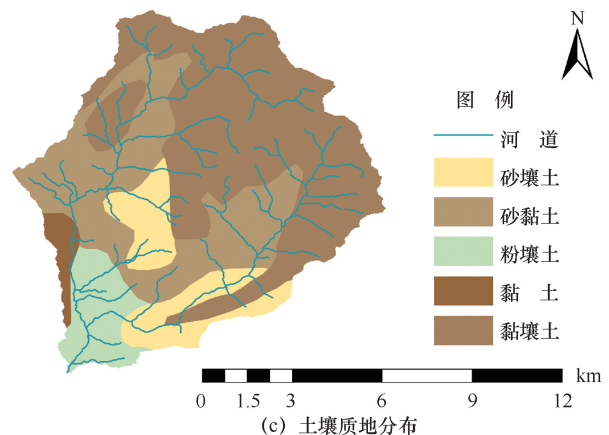
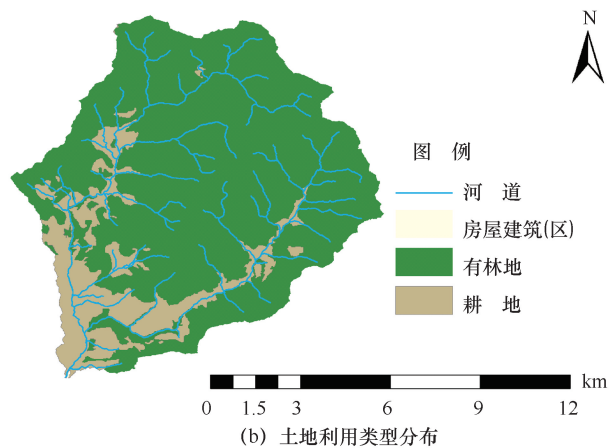
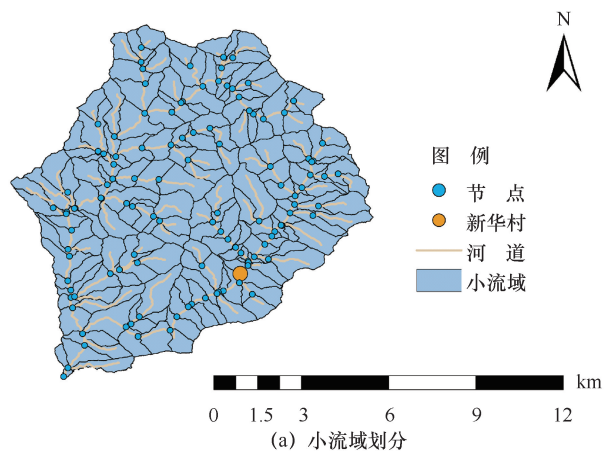


图7 汉源“7·20”山洪泥石流灾害建模数据
Fig. 7 Data used for modelling “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

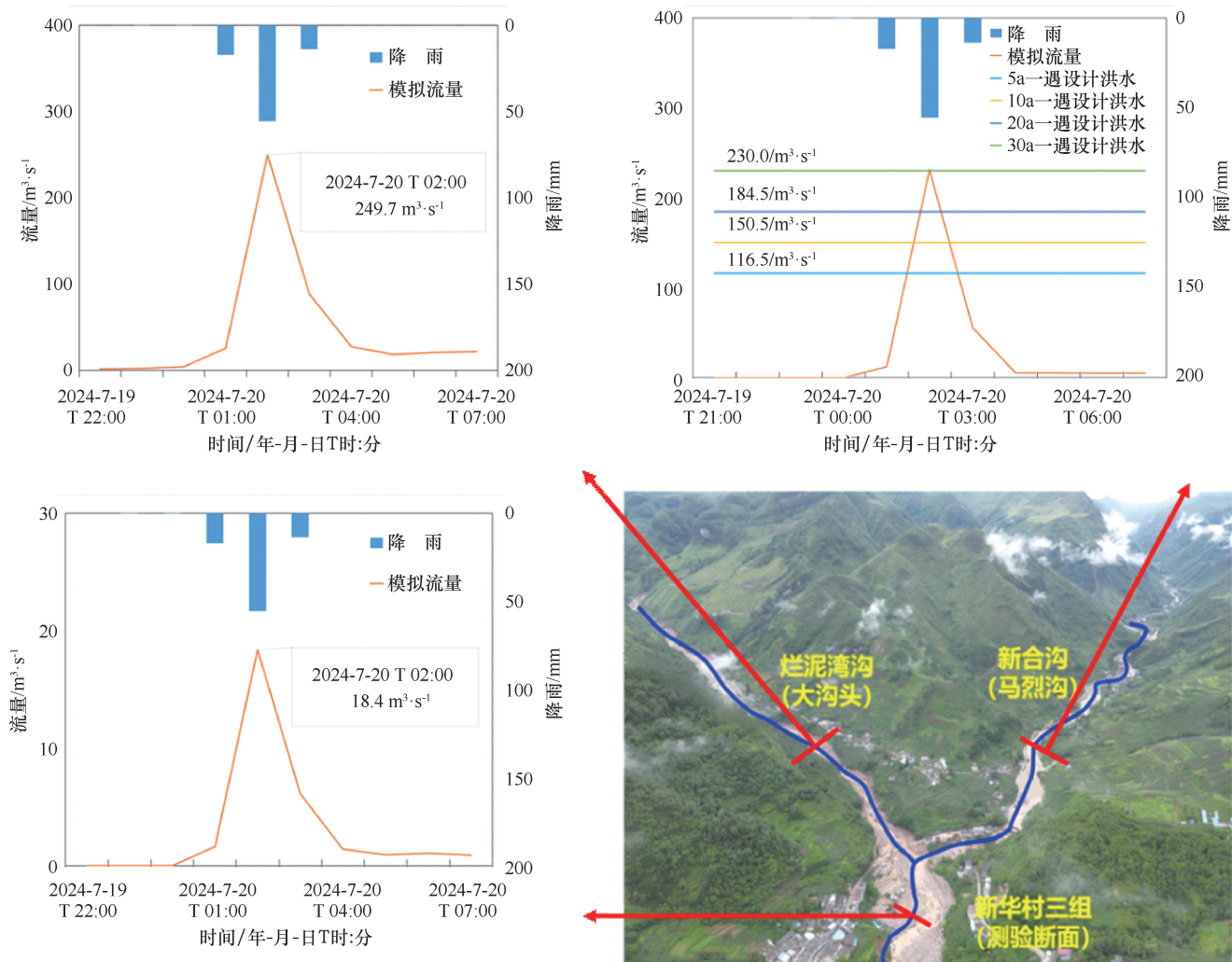


图8 汉源“7·20”山洪泥石流灾害模拟结果

Fig. 8 Simulation results of “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

可以归纳为以下四点：

(1)强降雨是诱发此次山洪泥石流灾害的主要原因。2024年7月19日至20日，汉源县马烈沟流域遭受较强降雨过程，最大1h、3h、6h累积降雨量分别为55.60mm、86.50mm和86.80mm。最大3小时降雨量超30a一遇，强降雨导致马烈沟发生30a一遇洪水。

(2)不利地形地貌和地质条件加重了灾害的危害。据灾害现场实地考察，马烈沟小流域沟道砂砾石含量高，山高坡陡，沟道比降大，沟道蜿蜒曲折，特殊地形地貌导致汇流快，洪水流速大，对河床砂石冲刷侵蚀作用强，为山洪泥石流灾害带来丰富物源，导致下游部分河段河道被淤平。若无泥石流及其淤积造成的水位异常抬高和水流改道影响，本次灾情严重程度将明显降低。

(3)桥涵堵塞壅水导致水流改道扩大了影响范围。马烈沟主沟人行桥采用双拱涵洞结构型式，本次山洪泥石流挟带的漂石砾石和树木杂物等堵塞泄洪涵洞，导致阻水壅水[见图9(a)]，水位异常抬高[见图9(b)]。高含砂洪水改道进入新华村3组居民区，造成桥头和部分低洼处房屋损毁，致使非危险区居民受灾。

(4)据现场实地调查得知，该地区居民风险隐患识别和警觉性不足也是造成转移避险不及时的原因之一。沿岸居民临水而居，长期未遭遇大洪水，对山洪、泥石流叠加、沟道冲刷淤积、桥涵阻水壅水的极端危害性认识不足；此次灾害发生在凌晨2时30分左右，村民正在酣睡、警觉性不足；灾害发生后，区域内断网、断电、断路，给转移救灾造成严重困难，因此导致部分群众未能及时避险。



(a) 7月21日早9时人行桥现场



(b) 7月23日早9时人行桥现场

图9 汉源“7·20”山洪泥石流灾害桥梁堵塞现场

Fig. 9 On-site conditions of blocked bridge during “7·20” flash flood and debris flow disaster in Hanyuan

5 结论建议

本研究以汉源“7·20”山洪泥石流灾害为例,采用实地调查结合数值模拟的方法,基于有限的调查资料对由极端暴雨引发的山洪泥石流复合灾害进行复盘分析。通过反演模拟,理清了洪水量级,分析了灾害成因,并针对调查中暴露的山洪泥石流防御薄弱环节提出了措施建议。

(1)汉源“7·20”山洪泥石流灾害洪水量级为30 a一遇。造成此次灾害的主要自然因素为强降雨叠加流域内特殊的地形地貌及地质条件,而桥涵堵塞壅高导致主流改道及群众对灾害的警觉性不足等人为因素则进一步放大灾害的影响,最终导致1 500余人受灾及多处基础设施损毁严重。

(2)通过对灾害进行调查及复盘分析,本次灾害暴露出省内自然资源等部门协同联动不够、风险隐患排查成果运用不够、社会宣传不够、科技化手段运用不够、隐患排查和风险管理不到位等几大问题。

(3)建议当地相关部门一方面应强化“三道防线”建设、山洪地质灾害风险管理与预报预警预演预案“四预”能力建设,构建多灾种联防联控机制;另一方面持续强化群测群防和灾害科普教育。通过工程与非工程措施相结合的方式,提升灾害应对能力。

参考文献(References):

- [1] 王岩,王昊,崔鹏,等. 气候变化的灾害效应与科学挑战[J]. 科学通报, 2024, 69(2): 286-300.
WANG Y, WANG H, CUI P, et al. Disaster effects of climate change and the associated scientific challenges[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(2): 286-300.
- [2] 刘传正. 如何区分山洪灾害和泥石流灾害[J]. 中国减灾, 2023

(20): 34-35.

LIU C Z. How to distinguish between flash flood disasters and debris flow disasters [J]. China Disaster Reduction, 2023(20): 34-35.

- [3] 王丽娟. 泥石流的形态特征和危险性经验模型:以甘肃天水南部娘娘坝为例[D]. 北京:北京林业大学, 2021.

WANG L J. Morphological Characteristics and Risk Empirical Model of Debris Flow[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

- [4] 张璇钰,刘桂卫,孙琪皓,等. 综合遥感技术在山区铁路泥石流勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2024, 50(1): 16-22.

ZHANG X Y, LIU G W, SUN Q H, et al. Application of comprehensive remote sensing technology in mountain railway debris flow survey[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(1): 16-22.

- [5] 陈宁生,刘美,刘丽红. 关于山洪与泥石流灾害及其流域性质判别的讨论[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 39-43.

CHEN N S, LIU M, LIU L H. A discussion on how to discriminate the hazard and watershed properties of mountain torrent and debris flow[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 39-43.

- [6] 田壮显,孙东亚,王协康,等. 四川省北川县正河流域山洪泥石流危险性分析[J/OL]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025: 1-11. (2025-04-22). <https://link.cnki.net/doi/10.13244/j.cnki.jiwhr.20240219>.

TIAN Z X, SUN D Y, WANG X K, et al. Risk analysis of flood and debris flow in the Zhenghe River Basin of Beichuan County in Sichuan Province[J/OL]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025: 1-11. (2025-04-22). <https://link.cnki.net/doi/10.13244/j.cnki.jiwhr.20240219>.

- [7] 刘仁志,倪晋仁. 中国暴雨泥石流危险性区划[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(4): 346-360.

LIU R Z, NI J R. Rapid assessment of rainstorm debris flow hazard in China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(4): 346-360.

- [8] 张国平,许凤雯,赵琳娜. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010, 36(2): 81-86.

ZHANG G P, XU F W, ZHAO L N. Review of the study of rainfall-

- triggered debris flows[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(2): 81-86.
- [9] 杨红娟, 韦方强, 马振峰, 等. 四川省泥石流灾害的时空分布规律和降水特征[J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 102-107.
YANG H J, WEI F Q, MA Z F, et al. Spatial-temporal distribution of debris flows in Sichuan Province in China and the corresponding rainfall characteristics [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 102-107.
- [10] 邓国卫, 孙俊, 郭海燕, 等. 四川泥石流灾害分区及其与诱发降水关系[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 95-102.
DENG G W, SUN J, GUO H Y, et al. Zoning of debris flow hazards in Sichuan Province and their relationship with inducing precipitation [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(1): 95-102.
- [11] 李鑫杨, 刘庆生, 白淑英. 四川省雅安市泥石流灾害危险性评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 278-283.
LI X Y, LIU Q S, BAI S Y. Evaluation of debris flow hazard in Ya'an City of Sichuan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 278-283.
- [12] 屈永平. 四川省石棉县2013年“7·4”泥石流沟道侵蚀特征调查及研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(5): 55-61.
QU Y P. Investigation on characteristics of gully erosion caused by the July 4, 2013 co-seismic debris flows in Shimian County, Sichuan Province [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(5): 55-61.
- [13] 王涛, 王嘉昆, 潘冬. 四川汉源康家坡滑坡形成机理与滑坡—堰塞坝—泥石流灾害链分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(1): 1-7.
WANG T, WANG J K, PAN D. Analysis on mechanism of Kangjiapo Landslide and consequent debris flow in Hanyuan County of Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(1): 1-7.
- [14] 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 281-287.
LI Y, GAN B R, WANG X K, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 281-287.
- [15] 钟燕川, 郭海燕, 徐金霞, 等. 四川省泥石流活动与降水因子特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 390-396.
ZHONG Y C, GUO H Y, XU J X, et al. Characteristics of debris flow and precipitation in Sichuan Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 390-396.
- [16] TALCHABHADEL R, MASKEY S, GOULI M R, et al. Multimodal multiscale characterization of cascading hazard on mountain terrain [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1): 2162443.
- [17] VAN DEN BOUT B, VAN WESTEN C J, JETTEN V G. Non-monotonic relationships between return periods of precipitation surface hazard intensity [J]. *Water*, 2022, 14(9): 1348.
- [18] 张杰, 李世凯, 甘云兰, 等. 云南贡山8·18特大泥石流灾害调查分析与启示[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(3): 373-382.
ZHANG J, LI S K, GAN Y L, et al. Analysis and revelation of giant debris flow hazards of August 18, 2010 in Gongshan county, Yunnan Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(3): 373-382.
- [19] 丰强, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区绵鹿镇“8·20”登溪沟泥石流灾害调查与分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(1): 51-59.
FENG Q, TANG C, CHEN M, et al. Field investigation and research on debris flow on August 20, 2019 in Mianshi Town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 51-59.
- [20] 姚秋玲, 何秉顺, 涂勇, 等. 陕西西安长安区“2023.8.11”蒿沟泥石流灾害调查分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(10): 45-48.
YAO Q L, HE B S, TU Y, et al. Investigation and analysis of the “2023.8.11” Haogou mudflow disaster in Chang'an District of Xi'an City of Shaanxi Province [J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(10): 45-48.
- [21] CHONG Y, CHEN G, MENG X M, et al. Formation mechanism and quantitative risk analysis of the landslide-induced hazard chain by an integrated approach for emergency management: A case study in the Bailong River basin, China [J]. *Catena*, 2023, 233: 107522.
- [22] LI Q M, ZHAO J J, ZUO J, et al. Investigation of the slope-type debris flow disaster chain triggered by a landslide-induced road blockage in Yingpan Township, Shuicheng, Guizhou, on July 27, 2023 [J]. *Landslides*, 2024, 21(8): 1899-1913.
- [23] QIAO S S, QIN S W, CHEN J J, et al. The application of a three-dimensional deterministic model in the study of debris flow prediction based on the rainfall-unstable soil coupling mechanism [J]. *Processes*, 2019, 7(2): 99.
- [24] DESTRO E, AMPONSAH W, NIKOLOPOULOS E I, et al. Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 225-237.
- [25] 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 S J, WANG W C, MA Q, 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.
- [26] 马强, 王莹, 魏琳, 等. 基于分布式模型的流域洪水时空特征分析方法[J]. *水科学进展*, 2024, 35(5): 726-737.
MA Q, WANG Y, WEI L, et al. A modelling-based assessment approach of basin flood spatiotemporal characteristics [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(5): 726-737.
- [27] 常鸣, 许强, 王运生, 等. 四川康定姑咱“8·3”特大山洪泥石流发育特征及孕灾成因研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(11): 2136-2144.
CHANG M, XU Q, WANG Y S, et al. Development characteristics and disaster-causing mechanisms of the “8·3” catastrophic flash

- flood and debris flow in guzan, Kangding, Sichuan Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49 (11): 2136-2144.
- [28] DING X Y, HU W J, LIU F, et al. Risk assessment of debris flow disaster in mountainous area of northern Yunnan Province based on FLO-2D under the influence of extreme rainfall [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1252206.
- [29] JIANG H, ZOU Q, ZHU Y Q, et al. Deep learning prediction of rainfall-driven debris flows considering the similar critical thresholds within comparable background conditions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 179: 106130.
- [30] ABBATE A, MANCUSI L, APADULA F, et al. CRHyME (Climatic Rainfall Hydrogeological Modelling Experiment): A new model for geo-hydrological hazard assessment at the basin scale [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2024, 24(2): 501-537.
- [31] 李莉, 倪波, 强跃, 等. 基于改进云模型和线性规划优化算法的山区泥石流危险性评价[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(7): 34-43.
- LI L, NI B, QIANG Y, et al. Risk assessment of mountain debris flows based on improved cloud model and linear programming optimization algorithm [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2024, 43(7): 34-43.
- [32] CHEN H Y, RUAN H C, CHEN J G, et al. Review of investigations on hazard chains triggered by river-blocking debris flows and dam-break floods [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 830044.
- [33] 汉源县志编纂委员会. 汉源县志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- Hanyuan County Chronicles Compilation Committee. *Hanyuan County Annals* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994.
- [34] 孙东, 覃亮, 蒙明辉, 等. 2022年6月10日四川马尔康MS6.0震群同震地质灾害发育特征及其控制因素分析 [J]. *地质力学学报*, 2024, 30(3): 443-461.
- SUN D, QIN L, MENG M H, et al. Analysis of the development characteristics of co-seismic geological hazards and their controlling factors in the Maerkang MS 6.0 earthquake swarm, Sichuan, on June 10, 2022 [J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(3): 443-461.
- [35] 谭春洪, 朱志铭, 周凯睿, 等. GIS在滑坡稳定性评价中的应用: 以汉源县二蛮山为例 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19(3): 295-303.
- TAN C H, ZHU Z M, ZHOU K R, et al. Application of GIS in landslide stability evaluation: A case study for ermanshan landslide [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(3): 295-303.
- [36] 叶敏. 汉源县地质构造与地质灾害发育关系浅析 [J]. *黑龙江科技信息*, 2016(10): 147-148.
- YE M. A preliminary analysis of the relationship between geological structure and geological hazard development in Hanyuan County [J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2016(10): 147-148.
- [37] 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 降雨特征与泥石流总量的关系分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 77-83.
- ZHUANG J Q, CUI P, GE Y G, et al. Relationship between rainfall characteristics and total amount of debris flow [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 77-83.
- [38] 白亚军, 任建民, 田敏, 等. 基于改进 Mein-Larson 降雨入渗模型的黄土边坡稳定性分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 131-139.
- BAI Yajun, REN Jianmin, TIAN Min, et al. Improved Mein-Larson rainfall infiltration model-based stability analysis of loess slope [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(4): 131-139.
- [39] 庞超, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于 GPU 加速的分布式水文模型并行计算性能 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 33-38.
- PANG C, ZHOU Z H, LIU J J, et al. Parallel computing performance of distributed hydrological model accelerated by GPU [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 33-38.
- [40] 马强, 李郑森, 董芳睿, 等. 流域数字孪生防洪模型的构建: 以子牙河“23·7”大洪水复盘为例 [J]. *水利学报*, 2025, 56(1): 73-84.
- MA Q, LI Z M, DONG F R, et al. Flood modeling developed for digital twin watershed: A case study of “23·7” great flood assessment in Ziya River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(1): 73-84.
- [41] 马强, 王浩雯, 张珂健, 等. 数字孪生流域防洪模型构建: 以“23·7”永定河特大洪水为例 [J/OL]. *水资源保护*, 1-14 [2025-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20241224.0843.004.html>.
- MA Q, WANG H W, ZHANG K J, et al. Construction of flood control model of digital twin basin: A case study of the “23·7” Yongding River flood [J/OL]. *Water Resources Protection*, 1-14 [2025-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20241224.0843.004.html>.
- [42] 马俊学, 高会然, 许冲. 北京市昌平区韩台村“23·7”暴雨山洪泥石流灾害特征分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(7): 1-18.
- MA J X, GAO H R, XU C. Characteristics of flash flood-debris flow disaster induced by the ‘23·7’ rainstorm in Hantai Village, Changping District, Beijing [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(7): 1-18.
- [43] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册 [M]. 成都: 四川省水利电力厅, 1984.
- Sichuan Provincial Department of Water Resources and Electric Power. *Rainstorm flood calculation manual for small and medium basins in Sichuan Province* [M]. Chengdu: Sichuan Provincial Department of Water Resources and Hydropower, 1984.
- [44] 刘传正, 王建新. 降雨型山洪泥石流灾害成因及实证分析 [J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(5): 8-16.
- LIU C Z, WANG J X. Empirical analysis of causes of rainfall-triggered mountain torrential floods and debris flow disasters [J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(5): 8-16.

(责任编辑 王海锋)