引文格式:尹道龙,常鸣,陈明,等.四川汉源小沟山洪泥石流侵蚀沉积特征及动力演进过程分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(6):1242-1252.DOI:10.13203/j.whugis20250026

Citation: YIN Daolong, CHANG Ming, CHEN Ming, et al. Analysis of the Erosion-Sedimentation Characteristics and Dynamic Evolution Process of Mountain Flood Debris Flows in Xiaogou, Hanyuan, Sichuan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(6):1242-1252.DOI:10.13203/j.whugis20250026

四川汉源小沟山洪泥石流侵蚀沉积特征及动力演进过程分析

尹道龙[1] 常 鸣[1] 陈 明[1] 周康驰[1] 张 宁[1]
马彦飞[1] 李林泽[1] 李宏杰[1]

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川 成都,610059

摘 要:中国四川省雅安市汉源县"7·20"暴雨事件引发的山洪泥石流灾害,是典型的暴雨诱发的山洪泥石流灾害。该地区地形复杂、降雨集中且强度大,极易发生山洪泥石流灾害,给当地生态环境和人民生活带来了严重影响。以小沟暴发的山洪泥石流为研究对象,利用小基线集合成孔径雷达干涉测量技术与OpenLISEM数值模型,结合无人机航摄影像和地面观测数据,对小沟流域的山洪泥石流的侵蚀沉积特征及动力演进过程进行分析。结果表明,小沟流域平均侵蚀速率为2 588 $m^3/(km^2 \cdot a)$,年均侵蚀量为1.63×10^4 m^3/a;在20年、50年、100年一遇的降雨频率下,小沟山洪泥石流的最大流速分别为18.00 m/s、17.78 m/s、17.64 m/s,最大泥深分别为6.38 m、6.69 m、6.89 m;在50年、100年一遇的降雨频率下,小沟冲出的固体物质较多,对沟口建筑物造成了较大影响,部分物质冲出沟口流入河道,可能抬高河床,造成白岩河半堵的情况,从而对下游工业园区带来较大威胁。该研究成果有助于提升西南山区山洪泥石流的预警能力,也可为灾后应急抢险和防灾减灾提供更科学的决策依据。

关键词:山洪泥石流;SBAS-InSAR;OpenLISEM;侵蚀沉积;演进致灾

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-04-15

DOI:10.13203/j.whugis20250026 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1242-11

Analysis of the Erosion-Sedimentation Characteristics and Dynamic Evolution Process of Mountain Flood Debris Flows in Xiaogou, Hanyuan, Sichuan

YIN Daolong[1] *CHANG Ming*[1] *CHEN Ming*[1] *ZHOU Kangchi*[1] *ZHANG Ning*[1]
MA Yanfei[1] *LI Linze*[1] *LI Hongjie*[1]

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: **Objectives**: On July 20, 2024, an extreme rainstorm struck Hanyuan County, Ya'an City, Sichuan Province, China, delivering a peak hourly rainfall intensity of 53.8 mm and a cumulative precipitation of 107.5 mm within 12 hours. This event triggered a large-scale mountain flood debris flow in the Xiaogou watershed. The disaster filled and broke three check dams. Downstream drainage channels, bridges, houses, and infrastructure were severely damaged. Local residents' lives and property faced major threats. **Methods**: To reveal the erosion-sedimentation characteristics and dynamic evolution of this debris flow, the Xiaogou watershed is taken as the research object. The small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technique and the OpenLISEM numerical model are used. Unmanned aerial

基金项目:国家科技重大专项(2026ZD1217400);四川省科技赋能防灾减灾救灾"揭榜挂帅"项目(25JBGSEBSB0201);国家自然科学基金(42477173,42401081)。

第一作者:尹道龙,硕士生,主要从事遥感及地质灾害风险评价研究。2743449539@qq.com

通信作者:常鸣,博士,教授。changmxq@126.com。

vehicle (UAV) aerial images, high-resolution remote sensing interpretations, and field survey data are also combined. First, 22 Sentinel-1A ascending images and 24 descending images from 2022 to 2024 are processed. The SBAS-InSAR technique provides time-series surface deformation information. Erosion and accumulation areas are identified. A coherence-point statistical method is used to estimate the erosion rate and annual erosion volume. Second, UAV aerial photography and field surveys identify detailed sediment source distribution. The total volume of loose deposits is calculated as 1.26×10^6 m^3. Key sediment parameters are obtained through laboratory grain-size and mechanical tests. The OpenLISEM model, which couples rainfall, surface runoff, debris flow initiation, erosion, transport, and deposition processes within a physically based framework, is then applied to simulate the entire dynamic evolution. The model's accuracy is validated against the measured deposition footprint and accumulation volume of the "7·20" event, achieving an overlapping accuracy coefficient Ω of 1.80, indicative of high reliability. Simulations are subsequently performed for rainfall return periods of 20, 50, and 100 a. **Results:** The average erosion rate in the Xiaogou watershed is 2 588 $m^3/(km^2\cdot a)$, with an annual erosion volume of 1.63×10^4 m^3/a. Under rainfall frequencies with return periods of 20, 50, and 100 a, the maximum flow velocities of the mountain flood debris flow in Xiaogou are 18.00 m/s, 17.78 m/s, and 17.64 m/s, respectively, while the maximum sediment depths are 6.38 m, 6.69 m, and 6.89 m, respectively. Under the 50 a and 100 a return periods, a significant amount of solid material is discharged, causing substantial impacts on the structures at the mouth of the gully. Part of the solid material rushes out of the gully into the river channel. It could raise the riverbed and cause semi-blockage of the Baiyan River. Consequently, a significant threat is posed to the downstream industrial park. **Conclusions:** The integration of SBAS-InSAR for pre-disaster erosion-sedimentation characterization and the OpenLISEM model for multi-process dynamic simulation provides a robust technical pathway for analyzing debris flow evolution from source to deposition. The results help improve the early warning capability of mountain flood debris flow in the southwestern mountainous regions and offer a sound scientific foundation for post-disaster emergency response and disaster prevention strategies.

Key words: mountain flood debris flow; SBAS-InSAR; OpenLISEM; erosion-sedimentation; evolution-induced hazards

2024年7月20日凌晨,中国四川省雅安市汉源县马烈乡新华村突发暴雨泥石流灾害,与此同时,与马烈乡相邻的小沟也爆发了严重的山洪泥石流灾害,3道拦沙坝淤满并且冲出,坝下的建筑、基础设施以及排导槽等遭遇不同程度的损毁。山洪泥石流是由极端降水或冰雪融水触发的固液两相流复合灾害,其致灾过程具有突发性、链生性与强破坏性[1-2]。青藏高原东缘过渡带作为典型的孕灾区,受控于鲜水河断裂带、陡峭地形及高密度松散物源耦合作用[3]。2023年汶川板子沟泥石流引发河道堵塞,形成0.4 km^2的堰塞湖[4],同年,金阳县芦稿林河山洪灾害事件造成52人重大伤亡[5]。正是由于山洪泥石流具有突发性和极高破坏性,对其孕育、形成和爆发过程的研究显得尤为重要,探究其形变特征和动力演进过程对防灾减灾具有深远意义。

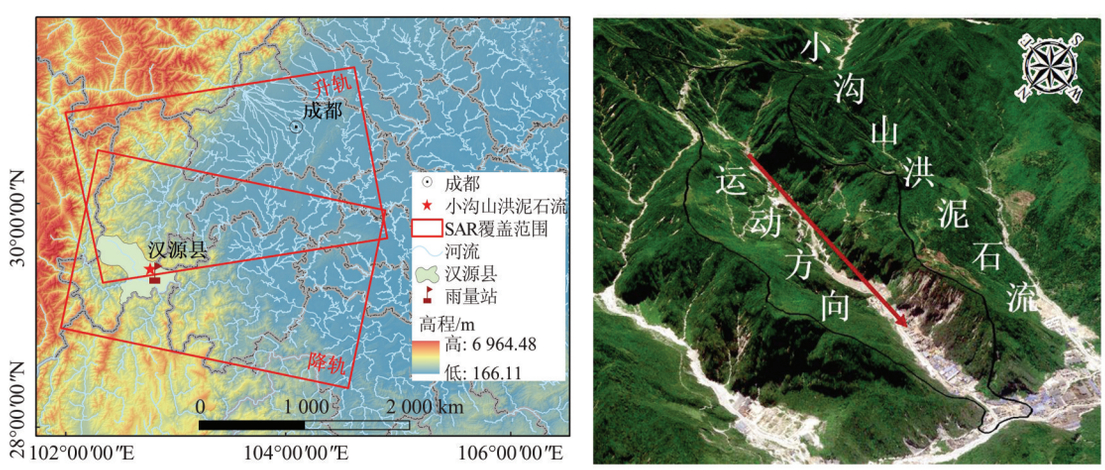
为了更好地研究山洪泥石流的演变过程和灾变趋势,近年来合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术已广泛应用于地质灾害的监测与预警[6-10]。其中,小基线集InSAR(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术作为一种基于InSAR的地表形变监测方法,利用多时相雷达影像,结合小基线子集技术,有效降低了大气干扰和轨道误差的影响,从而提高了地表形变监测的精度。与传统监测手段相比,SBAS-InSAR不受天气条件限制,具有较大的时间和空间优势,尤其在灾后无法开展地面调查的地区,能够迅速提供详细的地表形变信息。该技术在山洪泥石流监测中的应用至关重要,可实时监测灾源区的地质灾害前兆,分析山洪泥石流的侵蚀沉积特征,并为灾前形变过程的反演与灾变趋势预测提供重要支撑[11-12]。地表覆盖变化或植被动态会导致SBAS-InSAR信号失相干,尤其在湿润或植被茂密的区域难以获取稳定相位。所以,在西南山区植被覆盖较密的地区,该技术存在局限性。随着计算机技术和数值模拟平台的迅速发展,数值模拟已成为研究山洪泥石流的核心技术之一。近年来,研究人员通过建立数值模型,综

合考虑地形、降水、土壤性质等因素,模拟了山洪泥石流的形成、流动、堆积及其对环境的影响,这不仅提高了泥石流预测的精确度,也为灾害防控提供了科学依据。目前,国内主流的数值仿真模型,如FLO-2D、FLO-3D、RAMMS、VolcFlow、PFC等,虽能模拟泥石流的流深和流速,但大多数模型侧重于单一的冲出过程仿真,缺乏对降雨、启动、侵蚀、运移及堆积等多个过程的有效耦合[13-15]。因此,本文选用基于能量守恒和质量守恒原理的OpenLISEM模型,结合浅水波方程、圣维南原理、两相流运动方程、无限边坡理论以及侵蚀模型等,集成降雨、径流、泥石流启动、侵蚀、运移和堆积等多重过程,提供更为全面的山洪泥石流演变过程仿真[16-17]。

本文以四川省汉源县小沟山洪泥石流为研究对象,利用SBAS-InSAR分析"7·20"小沟山洪泥石流灾前的侵蚀沉积特征,运用OpenLISEM模型对此次小沟山洪泥石流灾害事件的动力致灾演进过程进行重现,并在经过现场实测数据验证后,对不同降雨频率的山洪泥石流进行预测,增强了山洪泥石流灾害的预警、应急响应以及防灾减灾能力。

1 研究区概况

小沟流域位于四川省汉源县万里乡建坪村,研究区概况及合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)覆盖情况如图1所示,底图来源于天地图,行政界线未修改。小沟地处横断山脉北段东缘,地貌形态主要以中高山沟谷底地带为主,研究区周围山峦起伏,地形陡峭,沟壑交错。小沟流域内存在五仙庙断层,该断层主要展布于流域东北部,并穿过小沟流通区,研究区内地层主要为震旦系观音崖组灰色块状白云岩、震旦系灯影组灰色块状白云岩、第四系全新统崩坡积层、残坡积层、泥石流堆积层及冲洪积层。研究区属川西南山地亚热带半湿润气候区,加之四周环山,高地寒冷,河谷炎热,雨量不均,气候垂直变化较为显著。此次"7·20"事件降雨量激增,导致山洪爆发,洪水经过沟道侵蚀、运移形成泥石流灾害,裹挟大量松散固体物质,导致多处排导槽、护堤、桥梁和房屋建筑损毁。此外,小沟流域内已建成的拦挡坝工程在此次灾害中因淤满而丧失了拦挡功能,难以在下次山洪泥石流灾害暴发时发挥拦挡功能,"7·20"小沟山洪泥石流受灾情况如图2所示。



(a) 研究区地理位置与SAR数据覆盖情况 (b) 小沟流域山洪泥石流全貌

图1 研究区概况及SAR覆盖情况

Fig. 1 Overview of the Study Area and SAR Coverage Status

1.1 地形条件

小沟流域呈叶状展布,面积为6.28 km^2,主沟长4.90 km,平均纵比降为235‰,呈现陡峭的沟道特征。小沟流域地形高差显著,最高山峰海拔达2 792 m,最低海拔为1 610 m,高差达到1 182 m。沟道区狭长且横断面呈V形,沟壁坡度陡峭,约79%的流域其坡度分布在30°~50°之间,显著提高了地表径流的汇集效率,增强了松散固体物质的迁移能力。该地形具备显著的山洪泥石流孕灾条件,在暴雨条件下能实现水动力聚集与物源快速输移,尤其在极端天气下,极易引发大规模地质灾害。

1.2 物源条件

小沟流域的物源分布较为零散,主要来自沟道物源,集中在主沟中游。沟道下游存在一个小型滑坡,坡面冲沟未见明显发育,且岸坡的稳定

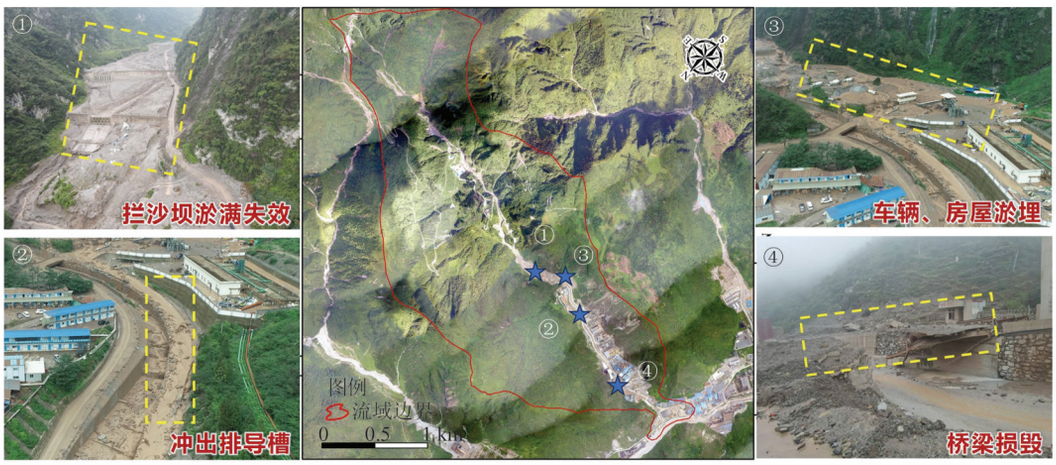


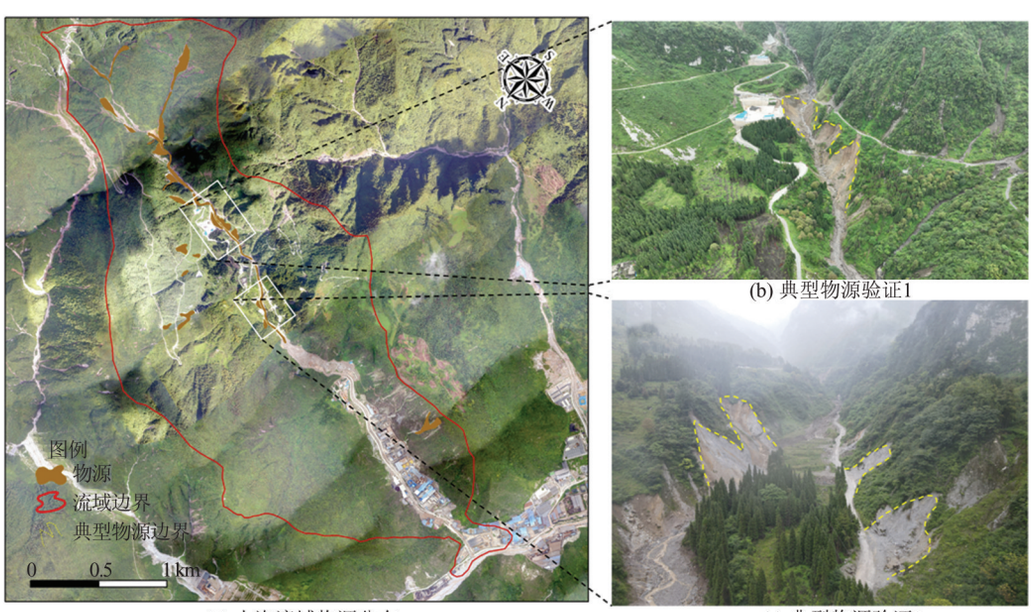
图 2　“7·20”小沟山洪泥石流受灾情况

Fig. 2　Damage Situation of the “7·20” Flash Flood and Debris Flow in Xiaogou

性较好,流域内植被覆盖较为丰富,整体覆盖率达 80%。利用高精度无人机航拍技术、遥感影像解译和现场调查,精确识别了流域内的物源分布,如图 3 所示。小沟流域的物源面积为 9.46×10^4 m^2,研究区位于“9·5”泸定震区,借鉴文献[18]提出的公式计算松散堆积物的体积,计算公式为:

$$V=1.315\times A^{1.2018} \tag{1}$$

式中,V 为物源体积,单位为 m^3;A 为物源面积,单位为 m^2。依据式(1)计算出小沟流域松散堆积物的体积为 1.26×10^6 m^3。



(a) 小沟流域物源分布　(b) 典型物源验证1　(c) 典型物源验证2

图 3　高精度无人机航拍的小沟流域物源分布与典型物源验证

Fig. 3　Material Source Distribution and Typical Source Verification of Xiaogou Watershed Based on High-Precision Unmanned Aerial Vehicle Aerial Photography

1.3　水源条件

2024 年 7 月 20 日凌晨,汉源县马烈乡新华村附近突遭局部强降雨,降雨强度极大,单小时降雨量最大达到 53.8 mm,7 月 19 日 20 时至 20 日 8 时的累积降雨量已达 107.5 mm[19]。该流域本身水资源匮乏,主要水源为小型溪流,此次强降雨为泥石流的发生提供了关键水源补给,显著加剧了泥石流灾害风险。

2　地表形变监测与动力数值模拟数据及方法

2.1　基于 SBAS-InSAR 技术的侵蚀沉积研究

SBAS-InSAR 技术通过对多个 SAR 影像进行配准,生成基线对,并采用奇异值分解算法联

合求解,进而获取特定时间段的地表时序形变信息。该技术能够准确反映地表形变的时空演变特征,并计算出平均形变速率。通过选择合适的小基线对,SBAS-InSAR可以有效减少大气干扰和轨道误差,提升监测精度与稳定性,可广泛应用于地质灾害监测和城市变形等领域[20-23]。

哨兵(Sentinel)1A是欧洲航天局在哥白尼计划框架下发射的首颗SAR卫星,主要用于环境监测、灾害管理和地表形变监测等任务。该卫星于2014年4月3日发射,搭载了C波段雷达系统,具备全天候、全天时获取地球表面影像的能力,不受天气和光照条件的限制。本文收集了2022-01-05—2024-04-24共计22景Sentinel-1A升轨卫星数据和2023-09-04—2024-06-18共计24景Sentinel-1A降轨卫星数据,数据具体参数信息如表1所示。此外,本文还利用精密轨道数据对轨道误差进行精细化修正,并结合由航天飞机雷达地形测绘任务获取的30 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM),以消除地形相位带来的影响[24]。

表1 Sentinel-1A数据的基本参数

Table 1 Basic Parameters of Sentinel-1A Data

参数类别	波长/cm	波段	轨道方向	重访周期/d	入射角/(°)	成像模式	极化方式	影像数量/景	监测时间
Sentinel-1A	5.6	C波段	升轨	12	33.9	干涉宽幅	VV	22	2022-01-05—2024-04-24
			降轨		42.8			24	2023-09-04—2024-06-18

根据研究区的雷达数据及地形特征,主要的数据处理步骤包括单视复数影像(single look complex, SLC)数据转换、影像配准、裁剪、干涉图生成、自适应滤波、相位解缠、轨道精化与水平效应修正、反演与地理编码,数据处理流程如图4(a)所示。首先,经过分析,升轨、降轨数据的空间基线阈值分别设定为5%和2%,时间基线阈值分别为120 d和180 d,超级主影像日期分别为2023-02-05和2024-01-26,图4(b)、4(c)分别展现了升轨、降轨数据的时空基线情况。然后,对干涉对进行差分解缠,利用最小二乘法获得各个集合的地表形变序列;为提高数据的采样分辨率,将各个小基线数据集连接起来,利用奇异值分解法求得形变值[25]。最后,通过时空滤波估计与大气延迟相位去除处理,获取了地形高程误差与形变序列信息,进而得到了最终的形变结果。

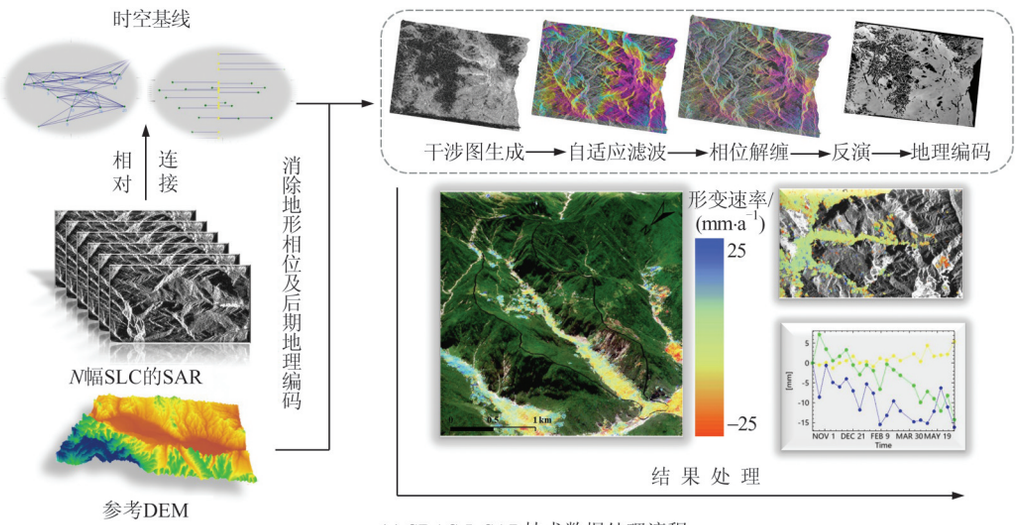
2.2 基于OpenLISEM模型的动力演进模拟

OpenLISEM是一种基于地理信息系统(geographic information system, GIS)模拟水土流失的模型,能够准确评估坡面水土流失的风险。该模型通过整合降雨、地表径流、土壤类型、植被覆盖等多种因素,可以模拟水文过程和侵蚀机制,进而预测不同条件下的土壤流失量。其核心原理是基于降水强度与土壤侵蚀之间的动态关系,采用水力学和土壤侵蚀公式,并结合流域特征进行精细化模拟。

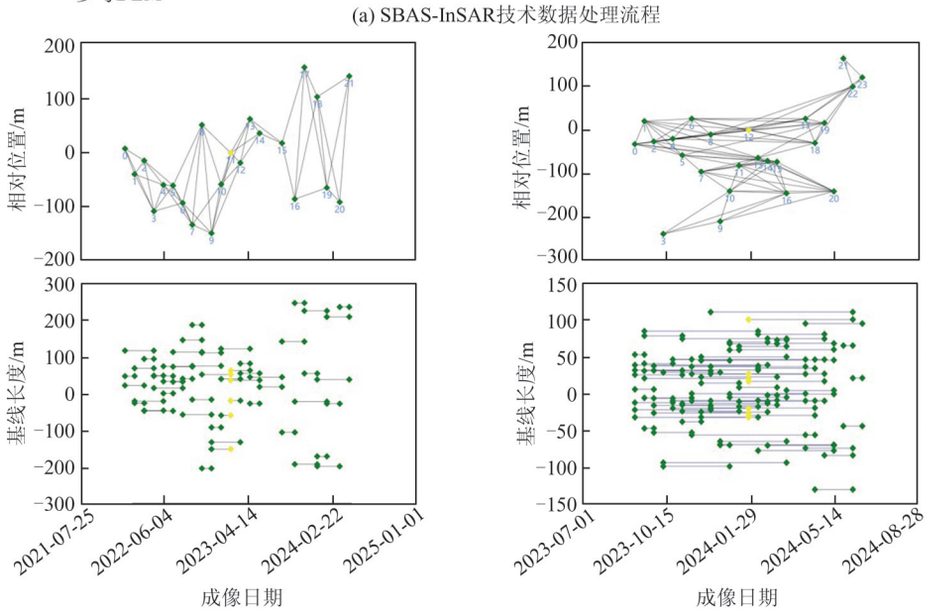
模拟所需数据主要包括物源数据、地形数据和降雨数据。地形数据通过QGIS平台的转换功能,将小沟流域无人机航摄获得的5 m数字表面模型转换成所需的map格式文件,降雨数据中的小时雨强参考《四川省中小流域暴雨洪水计算手册(1984)》[26]进行计算,计算出20年、50年、100年一遇降雨频率的暴雨雨力分别为57.3 mm/h、67.1 mm/h、74.3 mm/h。经调查,2024年"7·20"山洪泥石流事件触发时,其小时雨强为53.8 mm,故该次事件为20年一遇降雨频率。物源数据通过遥感解译及现场调查获得,松散堆积物的体积为1.26×10^6 m^3,通过野外取样进行室内颗分实验与力学实验,最终得到小沟的物源力学参数与级配曲线,如图5所示。进而得到中值粒径值与限值粒径值,即累积通过百分数为50%时所对应的粒径值D_{50}与累积通过百分数为90%时所对应的粒径值D_{90},研究区物源参数具体取值见表2。将上述数据通过QGIS平台和PCRaster软件处理后,生成map格式的地形数据文件、rain格式的降雨数据文件以及模拟运行的命令流run文件,时间步长设置为10 s,将这些文件输入到OpenLISEM模型中,用于模拟山洪泥石流的动力演进过程。

3 侵蚀沉积特征分析

本文利用Sentinel-1A SAR升轨、降轨数据,通过SBAS-InSAR技术获取小沟流域的形变信息,结果如图6和表3所示,图6中,NDVI(normalized difference vegetation index)表示归一化植被指数。SBAS-InSAR形变数据的相干点主要分布于主支沟交汇处下游的沟道两岸,这是由于非物源区植被较为发育,其茂盛的枝叶会吸收和



(a) SBAS-InSAR技术数据处理流程



(b) 升轨数据时空基线图　　(c) 降轨数据时空基线图

图 4　SBAS-InSAR 数据处理流程及升轨、降轨时空基线

Fig. 4　SBAS-InSAR Data Processing Workflow and Spatiotemporal Baselines of Ascending and Descending Orbits

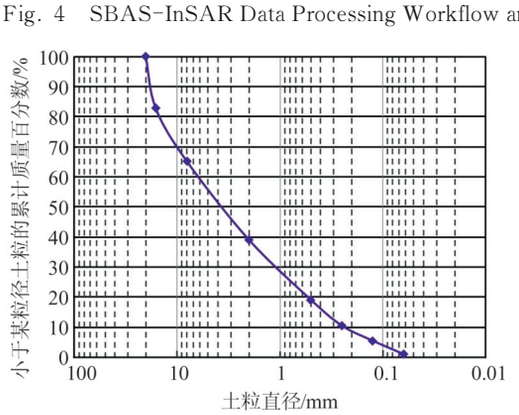


图 5　小沟松散堆积物颗粒级配曲线

Fig. 5　Grain Size Distribution Curve of Loose Deposits in Xiaogou

散射高频电磁波,影响雷达信号的传播和接收,干涉图像噪声增加,对形变相位计算的影响较大。图 6(a)、6(c)中红色的负速度相干点表示形变点发生了远离雷达方向的位移,说明该处地表以侵蚀变形为主;黄色相干点表示该处地表形变速度较小;蓝色的正形变速度相干点表示形变点发生了靠近雷达方向的位移,说明该处地表发生堆积抬升。获取了 2024 年 4 月 13 日的 Sentinel-2 数据,首先在 Sen2Cor 处理器中对 Sentinel-2 数据进行大气校正,然后在 ENVI 软件中进行数据处理,最后得到流域 NDVI 数据,该数据能够表征流域内的植被发育情况。对比分析图 6(b)、6(d)可以明显看出,相干点形变速率的分布与 NDVI 值的大小呈负相关关系。NDVI 值的计算公式为:

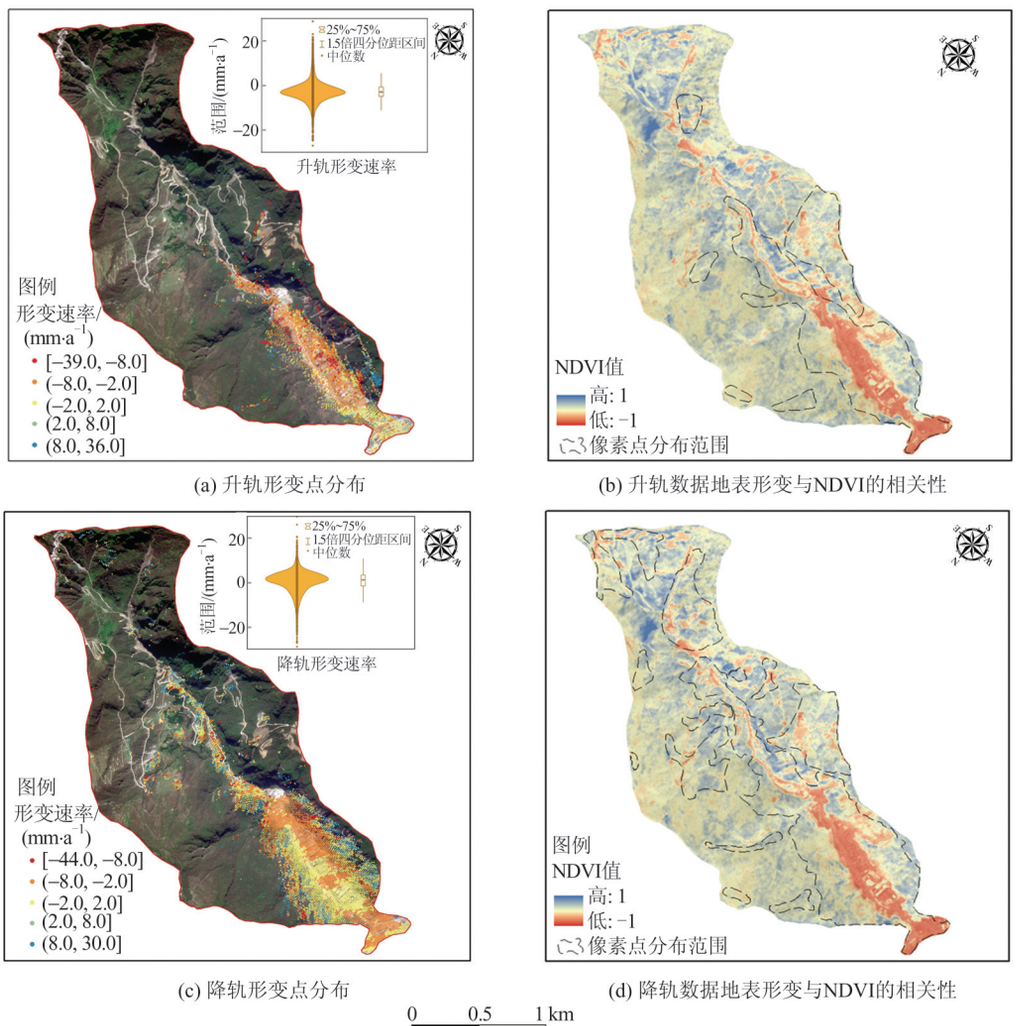
$$Z_{\mathrm{NDVI}}=\frac{Z_{\mathrm{NIR}}-Z_{\mathrm{Red}}}{Z_{\mathrm{NIR}}+Z_{\mathrm{Red}}} \tag{2}$$

式中,Z_{NIR} 代表近红外(near infrared, NIR)波段的反射值;Z_{Red} 代表红光波段的反射值。

表2 物源参数指标及取值

Table 2 Provenance Parameter Indicators and Value Assignment

D_{50}/mm	D_{90}/mm	内摩擦角/(°)	初始含水率/%	孔隙度/%	粘聚力/kPa
3.8	17	18	6.2	39.6	7.89



(a) 升轨形变点分布 (b) 升轨数据地表形变与NDVI的相关性

(c) 降轨形变点分布 (d) 降轨数据地表形变与NDVI的相关性

图6 小沟流域侵蚀沉积地形变化

Fig. 6 Topographic Changes of Erosion and Deposition in Xiaogou Watershed

表3 SBAS-InSAR地表变形结果统计

Table 3 Statistical Results of Surface Deformation Derived from SBAS-InSAR

数据类型	相干点总数/个	正速度相干点个数/个	正速度相干点占比/%	负速度相干点个数/个	负速度相干点占比/%	正速度最大值/(mm·a^{-1})	正速度平均值/(mm·a^{-1})	负速度最大值/(mm·a^{-1})	负速度平均值/(mm·a^{-1})
升轨数据	3 949	769	19.47	3 180	80.53	35.256	4.8	38.382	4.4
降轨数据	7 437	4 796	64.49	2 641	35.51	29.880	3.3	43.769	4.6

考虑到卫星雷达通过侧视获取影像,会产生前视短缩、叠掩和阴影效应,导致无法监测到流域内的部分区域形变数据。本文借鉴文献[27]提出的流域侵蚀量估算方法,计算公式为:

$$V'=\frac{N_n}{N}\times A\times \bar{v}\times T \tag{3}$$

式中,V'为流域侵蚀量估算值,单位为m^3;N_n为负速度相干点数量;N为相干点总数;A为流域面积,单位为m^2;$\bar{v}$为负相干点的平均速度,单位为mm/a;T为计算周期,单位为a。估算得到小沟流域的平均侵蚀速率为2 588 m^3/(km^2·a),年均侵蚀量为1.63×10^4 m^3/a。

4　动力演进过程分析

利用Ω模拟精度验证模型,对20年一遇降雨频率模拟数据与"7·20"实际山洪泥石流暴发数据进行精度验证,模拟结果与野外实测结果对比如图7所示,相关数据的计算公式分别为:

$$\begin{cases}\alpha=\dfrac{A_X}{A_{\text{observed}}}\\ \varepsilon=\dfrac{V_{AX}}{V_{\text{observed}}}\\ \beta=\dfrac{A_Y}{A_{\text{observed}}}\\ \gamma=\dfrac{A_Z}{A_{\text{observed}}}\\ \Omega=\alpha-\beta-\gamma+\varepsilon\end{cases}\tag{4}$$

式中,α为正面积精度;A_X为正判区面积;A_{observed}为实际堆积区面积;ε为正体积精度;V_{AX}为正判区堆积体积;V_{observed}为实际堆积体积;β为负面积精度;A_Y为误判区面积;γ为缺失面积精度;A_Z为漏判区面积;Ω为模拟值和实测值的重叠程度,取值范围为[−2,2],Ω值越大表示模拟精度越高,模拟结果与实际越吻合。经计算,A_X=1 582 m^2,A_Y=82 m^2,A_Z=220 m^2,A_{observed}=1 802 m^2,V_{observed}=739 m^3,V_{AX}=807 m^3,Ω=1.80,满足数值模拟的精度要求。

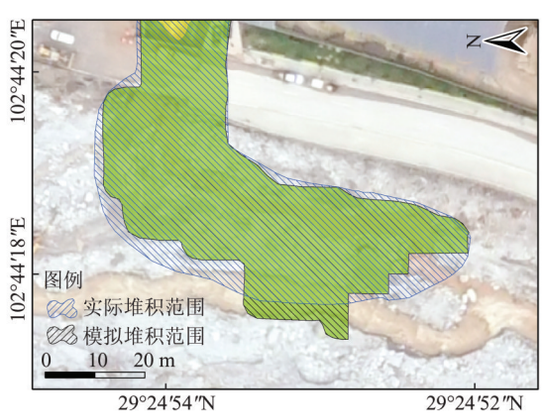


图7　模拟结果与野外实测结果对比

Fig. 7　Comparison Between Simulation Results and Field Measured Results

20年、50年、100年一遇降雨频率下模拟的最大泥深和流速如图8所示,小沟山洪泥石流的最大流速分别为18.00 m/s、17.78 m/s、17.64 m/s,最大泥深分别为6.38 m、6.69 m、6.89 m。由图8(a)、8(c)、8(e)可知,小沟山洪泥石流固体物质大多堆积在流通区,淤满3道拦沙坝,极可能掩埋排导槽两侧的建筑和公路;由图8(b)、8(d)、8(f)可知,最大流速主要出现在沟道流通区,流速较大的区域通常伴随较大的地形起伏。在拐弯处,由于弯道超高效应,山洪泥石流的流速降低,导致沟道内淤积了较多的固体物质。在50年、100年一遇降雨频率下,冲出固体物质较多,对沟口建筑影响较大,部分物质冲出沟口流入河道,可能抬高河床造成白岩河半堵的情况,对下游工业园区具有较大威胁。小沟山洪泥石流泥沙运移时空演化如图9所示。泥沙运移的空间变化过程随着时间的增加表现为松散物源逐步从小沟上游形成区向沟口堆积区移动,在T=100 s时,物源开始运移至沟道;在T=1 000 s时,泥沙淤满3道拦沙坝并开始冲出;最终在T=2 500 s时,泥沙冲出排导槽并在沟口堆积。

5　结　语

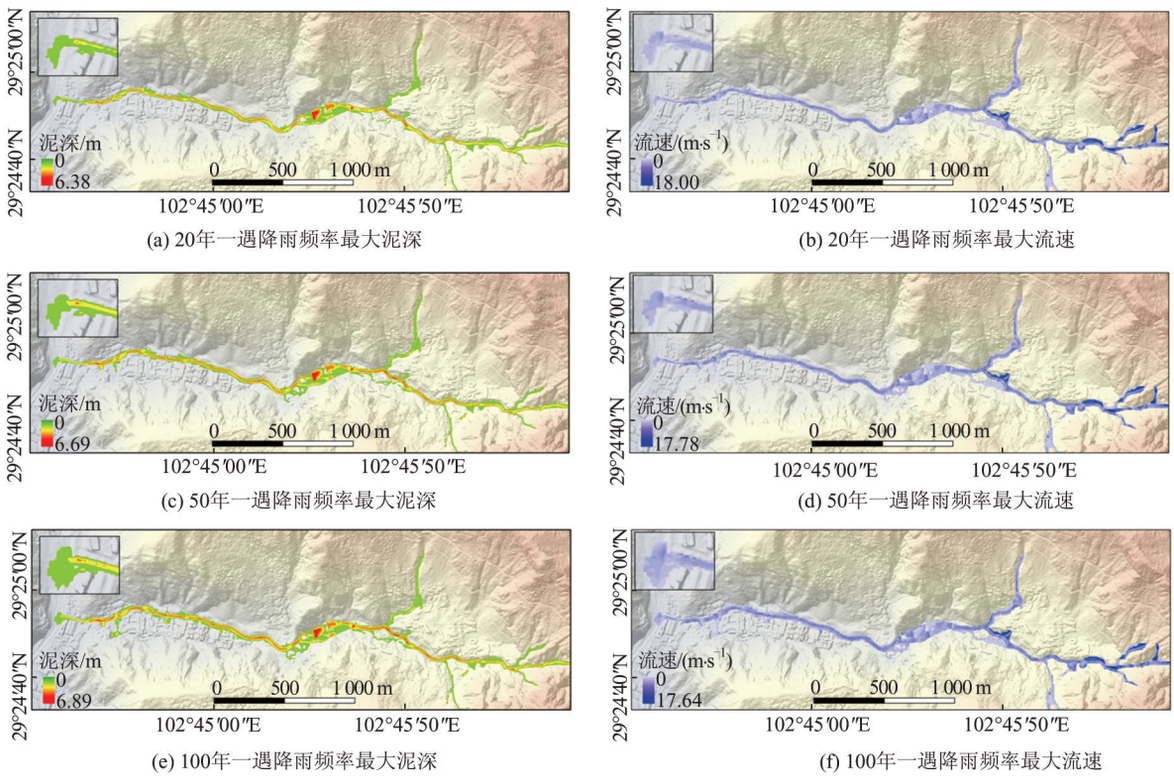
5.1　结论

受"7·20"暴雨的影响,小沟暴发山洪泥石流灾害,3道拦沙坝淤满并漫坝冲出,坝下的建筑、基础设施及排导槽等遭遇不同程度的损毁,造成了巨大的财产损失。本文通过遥感解译、无人机航拍及现场调查,结合SBAS-InSAR技术与OpenLISEM模型方法,对小沟流域的山洪泥石流侵蚀沉积特征及动力演进过程进行分析,得到以下结论:

1)通过现场调查和无人机航拍获取高分辨率影像数据,对小沟流域内的物源进行了详细的遥感解译,并采用经验公式进行物源量化计算。结果表明,小沟流域物源面积为9.46×10^4 m^2,松散堆积物的总体积为1.26×10^6 m^3。

2)利用Sentinel-1A卫星数据与SBAS-InSAR技术,对小沟流域的地表形变进行监测,进而估算了流域内的侵蚀速率及年侵蚀量,计算得到小沟流域平均侵蚀速率为2 588 m^3/(km^2·a),年均侵蚀量为1.63×10^4 m^3/a。

3)基于OpenLISEM模型,结合三维地形、精细物源以及20年、50年、100年一遇降雨频率,对小沟山洪泥石流进行动力演进致灾模拟,得到小沟山洪泥石流的最大流速分别为18.00 m/s、17.78 m/s、17.64 m/s,最大泥深分别为6.38 m、6.69 m、6.89 m。进一步分析表明,在50年及100年一遇的降雨频率下,冲出固体物质较多,对沟口建筑影响严重,部分物质冲出沟口并流入白岩河,可能抬高河床造成河道半堵,对下游工业园区构成较大威胁。



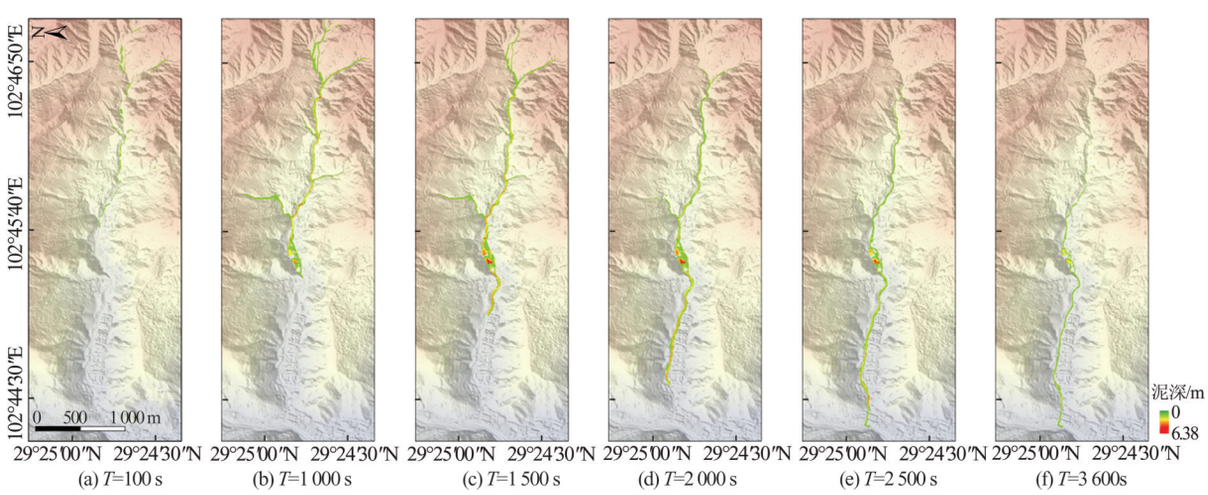
(a) 20年一遇降雨频率最大泥深 (b) 20年一遇降雨频率最大流速

(c) 50年一遇降雨频率最大泥深 (d) 50年一遇降雨频率最大流速

(e) 100年一遇降雨频率最大泥深 (f) 100年一遇降雨频率最大流速

图8 小沟山洪泥石流在20年、50年、100年一遇降雨频率下模拟的最大泥深与最大流速

Fig. 8 Maximum Mud Depth and Maximum Flow Velocity of Flash Flood and Debris Flow in Xiaogou Under Rainfall Return Periods of 20, 50, and 100 Years



(a) T=100 s (b) T=1 000 s (c) T=1 500 s (d) T=2 000 s (e) T=2 500 s (f) T=3 600s

图9 小沟山洪泥石流泥沙运移时空演化

Fig. 9 Spatiotemporal Evolution of Sediment Transport of Flash Flood and Debris Flow in Xiaogou

5.2 讨论

本文通过历史侵蚀沉积解析-动力过程反演-演化趋势预测的技术路径,系统分析了"7·20"小沟山洪泥石流事件的演变过程,并预测了其发展趋势。采用SBAS-InSAR技术与OpenLISEM模型,分析了山洪泥石流侵蚀沉积特征及动力演进过程。结果表明,SBAS-InSAR技术在山洪泥石流灾害监测中具有显著优势,长期、持续的卫星数据监测能够在灾后短时间内获取高分辨率的形变信息,有效弥补了传统地面调查手段的不足。然而,该技术也存在一定局限性,尤其是在植被密集的区域,雷达信号受植被反射干扰较大,可能导致形变信息的缺失或误差。此外,OpenLISEM模型虽然能够较好地模拟泥石流的动力演进过程,但其结果仍受输入数据精度的影响,尤其是物源量、降雨强度等参数的准确性,是模型成功模拟的关键。尽管本文模拟了不同降雨频率下泥石流的演变过程,但考虑到山区泥石

流灾害的复杂性,未来研究应进一步优化模拟方法,并探索更高效的灾害评估与预警系统。山洪泥石流的动态监测与预警仍是一个复杂的多因素问题,需要跨学科的协同研究和技术融合,才能更有效地实现灾害防控。

参考文献

[1] 崔鹏,邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展,2016,35(2):137-147.
CUI Peng, ZOU Qiang. Theory and Method of Risk Assessment and Risk Management of Debris Flows and Flash Floods[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137-147.

[2] 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 Ming, XU Qiang, WANG Yunsheng, 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.

[3] 李怡帆,张晨笛,张国涛. 横断山区暴雨型山洪灾害发育特征与形成模式[J]. 地理学报,2024,79(3):600-616.
LI Yifan, ZHANG Chendi, ZHANG Guotao. The Development Characteristics and Formation Modes of Rainstorm-Triggered Flash Flood Disasters in the Hengduan Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(3): 600-616.

[4] 张宪政,铁永波,宁志杰,等. 四川汶川县板子沟"6·26"特大型泥石流成因特征与活动性研究[J]. 水文地质工程地质,2023,50(5):134-145.
ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, et al. Characteristics and Activity Analysis of the Catastrophic "6·26" Debris Flow in the Banzi Catchment, Wenchuan County of Sichuan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 134-145.

[5] 黄尔,覃光华,赵国茂,等. 四川金阳县2023年"8·21"山洪泥石流灾害成因分析[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(7):1-5.
HUANG Er, QIN Guanghua, ZHAO Guomao, et al. Analysis of the Causes of the "8·21" Flash Flood and Debris Flow Disaster in 2023 in Jinyang County of Sichuan Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(7): 1-5.

[6] 陆会燕,李为乐,许强,等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1342-1354.
LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354.

[7] 罗军尧,朱国金,冯业林,等. 基于SBAS-InSAR技术的澜沧江哑贡倾倒体变形演化特征[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(12):3018-3031.
LUO Junyao, ZHU Guojin, FENG Yelin, et al. Deformation Evolution Characteristics of the Yagong Toppling Body in the Lancang River Based on SBAS-InSAR Technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(12): 3018-3031.

[8] 闫怡秋,郭长宝,钟宁,等. 基于InSAR形变监测的四川甲居古滑坡变形特征[J]. 地球科学,2022,47(12):4681-4697.
YAN Yiqiu, GUO Changbao, ZHONG Ning, et al. Deformation Characteristics of Jiaju Ancient Landslide Based on InSAR Monitoring Method, Sichuan, China[J]. *Earth Science*, 2022, 47(12): 4681-4697.

[9] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.

[10] CASAGLI N, INTRIERI E, TOFANI V, et al. Landslide Detection, Monitoring and Prediction with Remote-Sensing Techniques[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(1): 51-64.

[11] 宋天昊. 突泉县泥石流物源侵蚀特征与动力学分析[D]. 长春:吉林大学,2024.
SONG Tianhao. Analysis of the Debris Flow's Material Erosion and Dynamics Characteristics in Tuquan County[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[12] 王毅,李天斌,李升甫,等. 山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):224-235.
WANG Yi, LI Tianbin, LI Shengfu, et al. Multi-method Early Identification and Route Optimization of Vulnerable Geological Environment Hazards on Mountainous Highways[J]. *Geomatics and Informa-*

tion Science of Wuhan University, 2026, 51(2): 224-235.

[13] CHANG M, TANG C, VAN ASCH T W J, et al. Hazard Assessment of Debris Flows in the Wenchuan Earthquake-Stricken Area, South West China[J]. *Landslides*, 2017, 14(5): 1783-1792.

[14] 聂一品, 兰玲, 王协康. 高山峡谷区山洪沟口泥沙堆积特征数值试验[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(1): 237-244.
NIE Yipin, LAN Ling, WANG Xiekang. Numerical Experiment on Sediment Accumulation Characteristics at the Mouth of Flash Flood Gully in Alpine Canyon Area[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(1): 237-244.

[15] 田述军, 程小松, 邓志银. 基于泥石流危险性的拦挡坝减灾效益评价方法[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(2): 46-53.
TIAN Shujun, CHENG Xiaosong, DENG Zhiyin. Evaluation Method of Disaster Reduction Benefit of Retaining Dam Based on Debris Flow Hazard[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(2): 46-53.

[16] 李林泽, 常鸣, 李宏杰, 等. "9·5"泸定震后落井沟泥石流灾变过程预测分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1116-1124.
LI Linze, CHANG Ming, LI Hongjie, et al. Prediction of the Catastrophe Process of the Debris Flow in Luojing Gully After the "9·5" Luding Earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(5): 1116-1124.

[17] 陈明, 唐川, 王飞龙, 等. 基于OpenLISEM模型的泥石流启动冲出预测[J]. 泥沙研究, 2020, 45(4): 59-65.
CHEN Ming, TANG Chuan, WANG Feilong, et al. Modeling of Debris Flow Incipient and Run-out Zone Based on OpenLISEM[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(4): 59-65.

[18] XU C, XU X W, SHEN L L, et al. Optimized Volume Models of Earthquake-Triggered Landslides[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29797.

[19] 张旭东, 吴光于, 王曦. 不遗余力抢救生命: 雅安汉源县山洪泥石流灾害救援现场直击[EB/OL]. [2024-10-16]. https://news.qq.com/rain/a/20240721A0747W00.
ZHANG Xudong, WU Guangyu, WANG Xi. Spare No Effort to Save Lives: On-Site Report of the Flash Flood and Debris Flow Rescue in Hanyuan County, Ya'an[EB/OL]. [2024-10-16]. https://news.qq.com/rain/a/20240721A0747W00.

[20] REN K Y, YAO X, LI R J, et al. 3D Displacement and Deformation Mechanism of Deep-Seated Gravitational Slope Deformation Revealed by InSAR: A Case Study in Wudongde Reservoir, Jinsha River[J]. *Landslides*, 2022, 19(9): 2159-2175.

[21] YAO J M, LAN H X, LI L P, et al. Characteristics of a Rapid Landsliding Area Along Jinsha River Revealed by Multi-temporal Remote Sensing and Its Risks to Sichuan-Xizang Railway[J]. *Landslides*, 2022, 19(3): 703-718.

[22] AIMAITI Y, YAMAZAKI F, LIU W. Multi-sensor InSAR Analysis of Progressive Land Subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1304.

[23] SHI X G, YANG C, ZHANG L, et al. Mapping and Characterizing Displacements of Active Loess Slopes Along the Upstream Yellow River with Multi-temporal InSAR Datasets[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 200-210.

[24] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.

[25] 刘沛源, 常鸣, 武彬彬, 等. 基于SBAS-InSAR技术的成汶高速汶川段滑坡易发区选线研究[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 2048-2057.
LIU Peiyuan, CHANG Ming, WU Binbin, et al. Route Selection of Landslide Prone Area in Wenchuan Section of Chengdu-Wenchuan Expressway Based on SBAS-InSAR[J]. *Earth Science*, 2022, 47(6): 2048-2057.

[26] 四川水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川水利电力厅, 1984.
Sichuan Provincial Department of Water Resources and Electric Power. Handbook of Rainstorm and Flood Calculation for Small and Medium-Sized Basins in Sichuan Province[M]. Chengdu: Sichuan Provincial Department of Water Resources and Electric Power, 1984.

[27] CAO C, ZHANG W, CHEN J P, et al. Quantitative Estimation of Debris Flow Source Materials by Integrating Multi-source Data: A Case Study[J]. *Engineering Geology*, 2021, 291: 106222.