



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406204

引用格式: 巫贵秋, 向灵芝, 雷青青, 等. 基于形变分析的城镇泥石流风险评价: 以立节沟泥石流灾害链为例[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(19): 7963-7977.

Wu Guiqiu, Xiang Lingzhi, Lei Qingqing, et al. Risk assessment of urban debris flow based on deformation analysis: taking Lijiegou Debris Flow Disaster Chain as an Example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 7963-7977.

基于形变分析的城镇泥石流风险评价: 以立节沟泥石流灾害链为例

巫贵秋¹, 向灵芝^{1*}, 雷青青¹, 沈娜¹, 徐伟²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610218)

摘要 西部山区大量城镇处于滑坡-泥石流等灾害链的危害范围内, 因而山区城镇的安全和灾害风险值得重点关注。以甘肃省舟曲县立节镇立节沟滑坡-泥石流灾害链为例, 在实地考察和遥感分析的基础上, 基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术对地表形变进行分析并确定灾害链物源, 利用RAMMS软件进行泥石流过程和危险性分析, 并进一步进行易损性和风险评价。研究表明: ①流域内主要沉降范围位于立节沟上方北山滑坡的古滑坡区边缘及顶部等区域, 形变主要原因为土体的季节性冻融; ②依据形变结果与遥感影像分析, 并利用RAMMS动力模型对立节沟泥石流在1%、2%和5% 3种降雨频率下进行危险性分析, 综合评价结果表明高危险区面积占比为70.51%, 大量分布于北山滑坡松散堆积面、沟道及沟道两岸和沟口堆积扇处; ③基于危险性和易损性评价结果, 立节沟泥石流高风险区面积占比为13.10%, 主要分布于沟口及沟道两旁建筑处; ④立节沟上方滑坡松散堆积体体积庞大, 仍处于持续蠕动-变形-滑动的过程中, 为泥石流的汇流提供大量物源, 不同降雨频率下的风险分区结果为城镇泥石流风险减灾提供参考。

关键词 城镇泥石流; InSAR; 形变趋势; 物源; 风险

中图法分类号 P642.23;

文献标志码 A

Risk Assessment of Urban Debris Flow Based on Deformation Analysis: Taking Lijiegou Debris Flow Disaster Chain as an Example

WU Gui-qiu¹, XIANG Ling-zhi^{1*}, LEI Qing-qing¹, SHEN Na¹, XU Wei²

(1. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610218, China)

[Abstract] A large number of towns in the western mountainous areas are within the hazard range of disaster chains such as landslides and debris flows, making the safety and disaster risk of mountain towns a key focus. The landslide-debris flow disaster chain in Lijie Gully, Lijie Town, Zhouqu County, Gansu Province was taken as a case study. Based on field investigations and remote sensing analysis, surface deformation was analyzed using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology to determine the source of the disaster chain. The RAMMS dynamic model was then employed for the process and risk analysis of debris flows, followed by vulnerability and risk assessment. The research results indicate these as follows. The main subsidence areas within the basin are located at the edge and top of the ancient landslide area above Lijie Gully on the North Mountain, with the main cause of deformation being the seasonal freezing and thawing of soil. Based on the deformation results and remote sensing image analysis, the RAMMS dynamic model is used to conduct risk analysis of the Lijie Gully debris flow under three rainfall frequencies of 1%, 2%, and 5%. The comprehensive evaluation results show that the high-risk area accounts for 70.51%, largely distributed in the loose accumulation surface of the North Mountain landslide, the gully, both banks of the gully, and the accumulation fan at the gully mouth. Based on the risk and vulnerability assessment results, the high-risk area of the Lijie Gully debris flow accounts for 13.10%, mainly distributed in the gully mouth and along both sides of the gully where buildings are located. The large volume of loose accumulation above Lijie Gully is still in a continuous process of creeping-deformation-sliding, providing a large amount of material source for debris flows. The risk zoning results under different rainfall frequencies provide a reference for the disaster reduction of urban debris flows.

[Keywords] urban debris flow; InSAR; deformation trend; provenance; risk

收稿日期: 2024-08-19 修订日期: 2024-12-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0902)

第一作者: 巫贵秋(1999—), 男, 汉族, 四川泸州人, 硕士研究生。研究方向: 地质灾害监测与预警。E-mail: 837143353@qq.com。

* 通信作者: 向灵芝(1980—), 女, 汉族, 重庆人, 博士, 副教授。研究方向: 地质灾害风险。E-mail: xlz1223xlz@sina.com。

受青藏高原构造抬升以及向周边挤压、应力扩散的影响,其周边山地的地形地貌、地质构造随之产生持续变形,进而造成滑坡、泥石流等重力地貌链生灾害广泛发育的现象。同时受山区地形条件限制,大量的城镇位于河谷两岸的河流阶地、冲积扇、洪积扇及老滑坡前缘堆积区、泥石流堆积扇等地貌单元内,山区城镇的安全问题和灾害风险研究是值得关注的重要问题。特别是近 20 年来,区域气候条件产生较明显的变化,不同地貌区的孕灾条件也随之产生变化,叠加极端降雨、地震灾害事件的影响,使得山区城镇的地质安全受到极大的威胁^[14]。白龙江流域位于青藏高原东北缘,是四川盆地、黄土高原和青藏高原 3 个大型地貌单元的交汇过渡区,在气候、构造、地貌多种因素持续作用和变化的过程中,滑坡、泥石流等灾害发生频率和强度呈增加趋势。典型的灾害事件如 2010 年 8·8 舟曲县城关镇三眼峪、罗家峪特大泥石流灾害,2013 年、2020 年强降雨引发群发性泥石流灾害等^[5-7]。以甘肃省甘南藏族自治州舟曲县立节镇立节沟泥石流为例,每年夏季强降雨都会暴发不同规模的泥石流,并冲出沟道汇入主河白龙江,造成不同程度的堵河。立节沟泥石流近些年最大爆发于 2019 年 6 月,沟道内泥石流冲高达到 7.5 m,50 m 宽的白龙江河道被堵塞 2/3,严重威胁沟口立节镇的道路、桥涵和房屋建筑以及堵塞白龙江形成回水范围内的上游城镇。开展泥石流灾害的风险评价不仅对当地经济建设和土地利用有着重要意义,而且面向城镇安全的泥石流风险评价可为后续防灾减灾提供可靠的理论基础。

城镇泥石流危险性评价研究主要集中在对威胁城镇范围内的单沟泥石流进行评价^[8]和对区域内泥石流进行整体评价^[9]两个大类。无论是针对单沟还是区域,其通常采用的方法基本为影响因子结合数理模型计算以及数值模拟。例如,王术桁^[10]通过对云南省金源乡研究区内 11 条泥石流沟进行实地调分析提取影响因子进行定量评价,得出研究区泥石流危险性评价结果。吴庆安等^[11]以舟曲罗家峪单沟泥石流为研究对象,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对所选取的影响因子进行综合分析,完成单沟泥石流的危险性评价。随着对城镇泥石流风险评价的研究深入,很多学者为了提高泥石流动力过程和危害范围的准确性,引入数值模拟的方法。数值模拟结果的精确性和可操作性是各种模型能被广泛采用的基础。目前较成熟的泥石流数值模拟模型及软件平台主要有 FLO-2D^[12]、Massflow^[13]、RAMMS^[14]、ANSYS_CFX^[15]、

HEC-RAS^[16]等软件。大量研究分析了各种动力模型在不同的地质环境背景区域应用的效果,进而提出其优缺点和改进方向。如王毅等^[17]对汶川县城南沟单沟泥石流选用 FLO-2D 数值模拟技术对不同降雨频率下泥石流分别进行风险区划。刘府生等^[18]通过 RAMMS 软件对冰湖溃决型泥石流进行模拟分析,得到了泥石流的平均泥深以及最大流量和流速,所得结果可以用于泥石流的危险性研究。种艳等^[19]通过对北山沟滑坡区设置电阻层析成像仪,利用电阻率层析成像(electrical resistivity tomography, ERT)确定滑动面深度,利用 Massflow 和 BASEMENT 综合数值建模方法分析泥石流危险性。城镇泥石流的易损性^[20]评价采用的方法为通过承灾体提取,确定易损性分级体系,进行易损度计算。如潘梦宇等^[21]利用数值模拟和遥感技术构建了长江流域砌体结构建筑的易损性评价曲线,完成了承灾体的综合易损性分区。对于城镇泥石流的风险研究,目前绝大多数学者采用的是 1992 年联合国发布的灾害风险计算公式:风险度 = 危险度 × 易损度进行计算^[22]。然而,在滑坡-泥石流灾害链研究方面,其物源量化的相关研究相对薄弱。特别是泥石流数值模拟方法中关于泥石流的物源供给区域界限的明确较模糊。因此以立节沟滑坡-泥石流灾害链为例,基于实地调查和遥感分析,对其孕灾条件和活动特征分析的基础上,初步圈定其滑坡物源区、流通区和堆积区。利用合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR),结合地表形变分析对泥石流物源量化进行改进。在 1%、2% 和 5% 3 种降雨频率下进行危险性分析,并结合现场勘测和遥感影像完成易损性和风险评价。

1 立节沟滑坡-泥石流灾害链孕灾条件及特征

立节沟位于甘肃省甘南藏族自治州舟曲县立节镇,是白龙江干流左岸的一条高频泥石流沟(图 1),流域地理坐标范围为 104°06'92"E ~ 104°06'38"E,33°91'36"N ~ 33°89'89"N。据实地调查,立节沟泥石流第一次爆发形成至今超过五十年,每年雨季 6—8 月发规模最大。近几年最大规模两次分别在 2019 年 6 月和 2020 年 6 月,泥石流冲刷最高处接近 7 m。立节沟泥石流排导槽修建于 2012 年,每次泥石流爆发后,当地政府会及时清理沟道残留堆积体,因此排导槽内较为干净。2023 年 7 月 25 日短时强降雨造成泥石流灾害形成堆积扇,现场实测堆积扇的尺寸为:前缘宽度约 110 m(沿白龙江流向方



图1 立节沟泥石流堆积扇实测图

Fig. 1 Measured map of debris flow accumulation fan in Lijie (扇顶至扇缘(白龙江冲刷后的)距离约45 m,堰塞体淤堵白龙江宽度约20 m,堆积扇的坡度约为 3° ,厚度约1.4 m(图1)。

1.1 地形地貌及泥石流物源

立节沟流域面积 1.417 km^2 ,横穿立节镇西部农田和建筑,在经过五条支沟汇水后,主沟汇入白龙江。该泥石流沟可分为形成区、流通区和堆积区三部分,各要素如图2所示。

立节沟地形上主要呈北高南低,形成区较为陡峭,表现为北山滑坡体压顶堆积。流域主沟长714 m,形成区后缘和沟口高程差达1 025 m,主沟纵坡比降达 1.436% 。立节泥石流沟的主要物源由其形成区内北山滑坡群所提供。如图2所示,北山滑坡群(L1~L7)位于舟曲县西部的白龙江上游左岸立节镇北侧山体,滑坡体平面形态呈圈椅状。北山滑坡群的后缘高程为2 582 m,前缘高程为1 833 m,滑坡体相对高差为749 m,整体的坡度约为 40° 。滑坡群宽度约570 m,平面长约1 100 m,滑坡范围为 $104^\circ 07' 09'' \text{E} \sim 104^\circ 06' 77'' \text{E}, 33^\circ 91' 12'' \text{N} \sim 33^\circ 90' 16'' \text{N}$ 。滑坡厚度约为25 m,滑坡体体积约为 $1.567 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。沿主沟沟口往上游将立节沟支沟依次分为支沟一至支沟五(图2中ZG1~ZG5)。由于形成区的北山滑坡群主要位于支沟三和支沟四的流域范围内,因此这两条支沟提供了汇入主沟的主要物源量,发育规模较大,其他三条支沟规模较小。各条支沟沟道的沟壁处坡度较大且不稳定,也为泥石流提供部分物源。由于在北山滑坡的堆积平均坡度大于 30° 的地形下,遇强降雨时松散物质极易被从坡面剥蚀带下以及整体崩滑,主沟以及支沟沟道两侧岩土体在降雨作用下滑落向下堆积,且动能充足,支沟内降水汇集快,二者共同的作用常使得固体物质发生急速搬运,破坏力强,且冲出量较大,极易在立节镇沟口处冲入白龙江形成堵江危害。

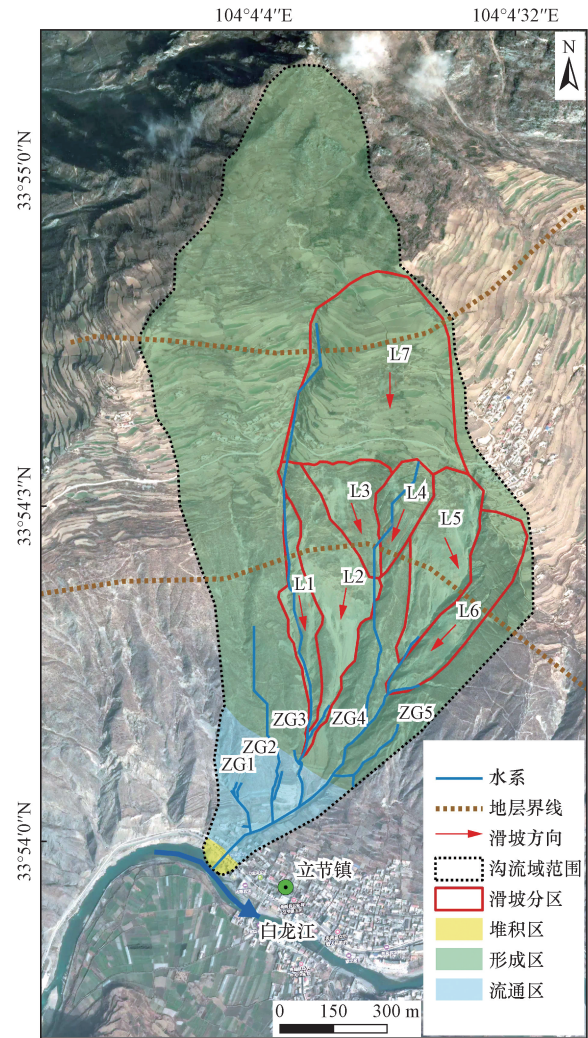


图2 立节沟和北山滑坡群分布情况

Fig. 2 Distribution of Lijie gou and landslide groups in and Beishan

1.2 地层岩性

地层岩性影响岩土体的强度特性,是控制滑坡泥石流形成演化的物质基础。根据1:250 000地质图(图3),立节沟流域上部北山滑坡的古滑坡区所属地层为泥盆系中统古道岭组(D_2g),下部为含铁砂岩、页岩、千枚岩、板岩,夹中薄层泥砂质灰岩,上部为中薄层-厚层块状泥砂;流域中部地层为第四系中上更新统(Q_2),以粉砂土、黄土状亚黏土,偶夹砾石和碎岩块为主;流域下部为志留系中上统(S_{2+3})白龙江群的千枚岩、板岩等浅变质岩。强降雨条件下,北山滑坡堆积体滑落堆积沟内,堆积物黄土以坡面流及滑坡的形式混杂砾石和碎岩块冲入支沟;水流混合土体、碎块石从各条支沟汇入主沟,形成泥石流。在其物源组成中,黄土混杂砾石和碎岩块占了重要部分,滑坡堆积物和沟内没有发现较大粒径的岩石块体。

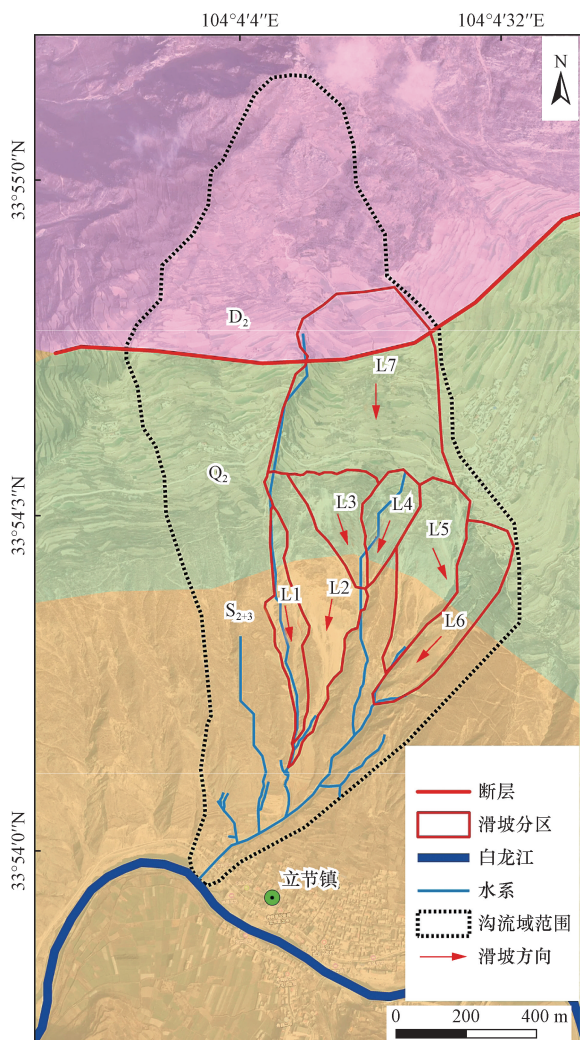


图3 研究区地层分布

Fig. 3 Stratigraphic distribution in the study area

1.3 气候条件

立节沟流域属北亚热带向北温带的过渡区,受大气环流和地形影响,具有垂直气候分带明显和干湿季分明两大特点。降水少而不均匀,冬春干燥,夏秋多雨,雨季降水主要集中在5—9月。流域内多年平均降水量为483.79 mm,日最大降雨量为60.10 mm,最大一小时降雨量为43.71 mm。降雨对泥石流的发育主要影响为提供水源,以及起到启动诱因的作用。立节沟多沟汇水,降雨在支沟内的补给速度较快,并且支沟具有较大的坡降为汇集后的水流提供了较大的动能。在强降雨条件下,第三条和第四条支沟上方的北山滑坡历史堆积体极易滑动并堆积至支沟以及主沟内。因此,流域内汇水迅速且物源充足,在短时集中强降雨的作用下,诱发北山滑坡堆积体发生崩滑,然后在沟内形成泥石流,沿着立节沟主沟冲出,汇入白龙江。

1.4 植被覆盖度

植被主要通过影响物源供给,植被覆盖度越

低,土体表面固土能力越低,从而一定程度上控制泥石流的发育。通过“地理空间数据云”所获取的立节沟流域2021年8月拍摄的Landsat8数据,利用可视化图像环境(environment for visualizing images, ENVI)和地理信息系统(geographic information system, GIS)进行解译分析,得到流域内植被覆盖率。如图4所示,从南至北向上整体呈现递增趋势,形成区植被覆盖率较高,但是其顶上北山滑坡群L1~L6的植被覆盖率极低,因此在发生强降雨时滑坡群容易被冲刷和崩滑。根据现场调查和历史土地调查得知北山滑坡群的L7区域属于古滑坡区,已被治理,所以给立节沟泥石流主要提供物源的是滑坡群L1~L6,位于支沟三和支沟四流域范围内。流域内的流通区植被覆盖率为20%~40%,植被覆盖率相对较低,这导致了流通区主沟沟道两侧土体稳定性较差,在遇降雨时被直接冲刷,极易发生崩滑灾害,因此流通区主沟道和支沟道两侧沟壁岩土体在降雨条件下也在持续滑落为泥石流提供部分物源。

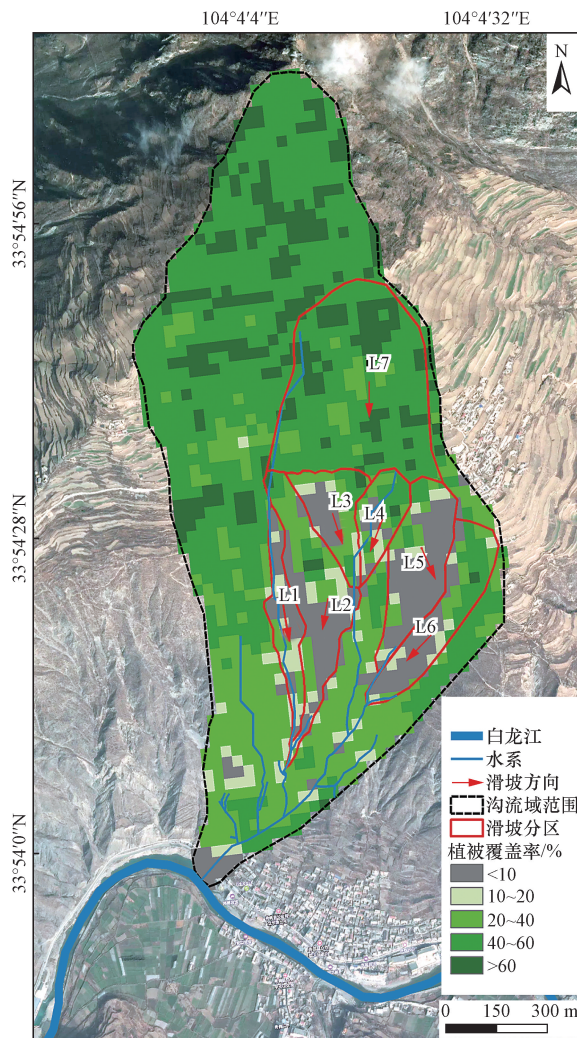


图4 立节沟流域植被覆盖率

Fig. 4 Vegetation coverage in Lijie Basin

1.5 防治结构

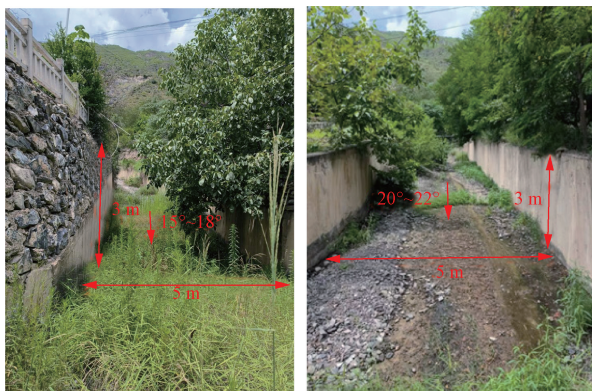
在立节沟沟道和北山滑坡群中都设有防治工程。北山滑坡群治理主要集中在北山滑坡古滑坡区域(滑坡分区为L7),采用分级治理,从滑坡顶部依次设有分级开挖排水、格构锚杆加固、锚绳抗滑桩搭配变形监测器、排水渠和挡墙以及锚拉桩搭配监测变形器,并且加固边坡中设有多条的排水槽,如图5所示。

立节沟部分防治措施由图6所示。经现场实测,



图5 立节北山滑坡治理措施

Fig. 5 Lijie Beishan landslide control measures



(a) 支沟一排导槽

(b) 支沟二排导槽



(c) 支沟三排导槽

图6 立节沟部分治理措施

Fig. 6 Part of the management measures of Lijiegou

立节沟主沟排导槽宽度为10~12 m,在主沟口宽度最宽为12 m,排导槽高度为6 m,部分加高处地区为7 m,排导槽坡度为7°~12°;支沟一排导槽宽度为6 m,排导槽高度为3 m,加高处为4 m,排导槽坡度为15°~18°;支沟二排导槽宽度为5 m,在支沟口宽度最宽为6 m,排导槽高度为3 m,加高处为4 m,排导槽坡度为20°~22°;立节沟主沟及各支沟可测得数据如表1所示。

表1 立节沟排导槽数据表

Table 1 Calculation results of power

名称	宽度/m	高度/m	加高处高度/m	坡度/(°)
主沟道排导槽	10~12	6	7	7~12
支沟一沟道排导槽	5~6	3	4	15~18
支沟二沟道排导槽	5~6	3	4	20~22

2 立节沟形变和滑坡物源分析

地表形变量反映了一个区域整体的运动趋势。泥石流流域内地表形变变化越大,表明流域内斜坡岩土体稳定性越低,物质发生运移,将会为泥石流灾害提供丰富的物源,从而有利于泥石流灾害的发生。因此流域内地表形变量的量化计算以及分区规律能够为泥石流物源区的滑坡范围界定以及泥石流物源量化判定提供依据。由于2020年11月—2021年1月,立节沟北山滑坡持续发生明显蠕动变形,造成较大险情,因此本文选取2020年10月1日—2021年5月29日的19景vv极化方式的Sentinel-1号影像数据,利用SBAS-InSAR技术对北山滑坡进行形变分析。获得累计形变量结果和平均形变速率结果分别如图7和图8所示。

由图7可知,流域内主要沉降区域位于立节沟上方的北山滑坡。北山滑坡自2020年10月—2021年6月期间最大沉降量为18.70 mm,其中主要沉降区域位于古滑坡区L7的边缘及顶部,新近滑坡区L5和L6。并且流通区有大面积滑坡松散体堆积,导致流通区整体有微弱抬升现象,其中研究时间内堆积厚度最高达到10.50 mm,该区域位于滑坡区L6下部。流域内有0.46%区域面积沉降量达到了17~21 mm,有2.96%的区域沉降量达到13~17 mm,有4.31%的区域沉降量达到10~13 mm,有9.63%的区域沉降量达到6~10 mm,有14.17%的区域沉降量达到3~6 mm。因此,整体形变结果表明,形变沉降区主要位于滑坡源区,形变抬升区位于滑坡下部和前缘,即泥石流沟的流通区内,这与泥石流的物源汇流趋势一致。形变结果所显示的各滑坡范围进一步明确实地调查和影像解译的范围。

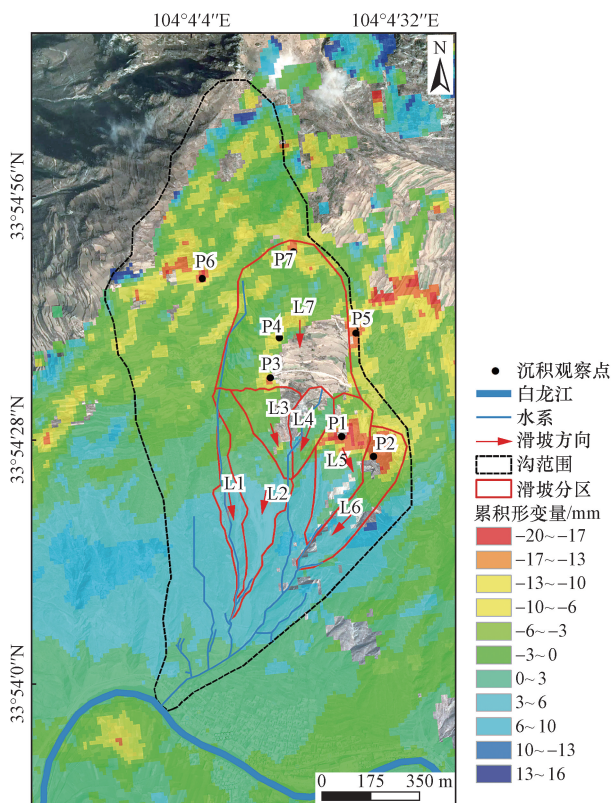


图7 累计形变量

Fig. 7 Cumulative form variable

由图8可见,立节沟流域内的平均形变速率最大达到了 $-13.97\text{ mm}/\text{年}$,北山滑坡区域都存在沉降情况,其中新近滑坡区L5和L6沉降速率较大。研究区内有 0.28% 的区域平均沉降速率为 $13\sim 17\text{ mm}/\text{年}$,有 4.54% 的区域平均沉降速率为 $8\sim 13\text{ mm}/\text{年}$,有 7.42% 的区域平均沉降速率为 $4\sim 8\text{ mm}/\text{年}$,有 29.75% 的区域平均沉降速率为 $0\sim 4\text{ mm}/\text{年}$ 。据形变监测结果分析,北山滑坡体持续蠕动下滑,其中滑坡区L5和L6较为严重,导致大量滑坡松散堆积体堆积在支沟四上方,这与现场调查情况符合一致,并且老滑坡堆积体大量堆积在支沟三上方,这些松散堆积体在强降雨下滑动堆积至沟道内,进而启动形成泥石流。

为探究滑坡体产生形变的原因,选取了累计沉降量较大的7个典型特征点进行时序形变分析(图9)。7个典型特征点中P1和P2分别位于滑坡区L5和L6的滑坡后缘,P3位于滑坡区L7的前缘,P4和P5位于滑坡区L7的中部,P6和P7位于滑坡区L7的后缘。根据时序形变结果分析(图9)所得,7个特征点的总体形变趋势相似,10月初至12月初形变速率加剧,土体活动状态表现为沉降。其原因是进入冬季,温度持续降低至零下,土体内水分冻结引起整体蠕动导致。12月初至2月底形变速率较

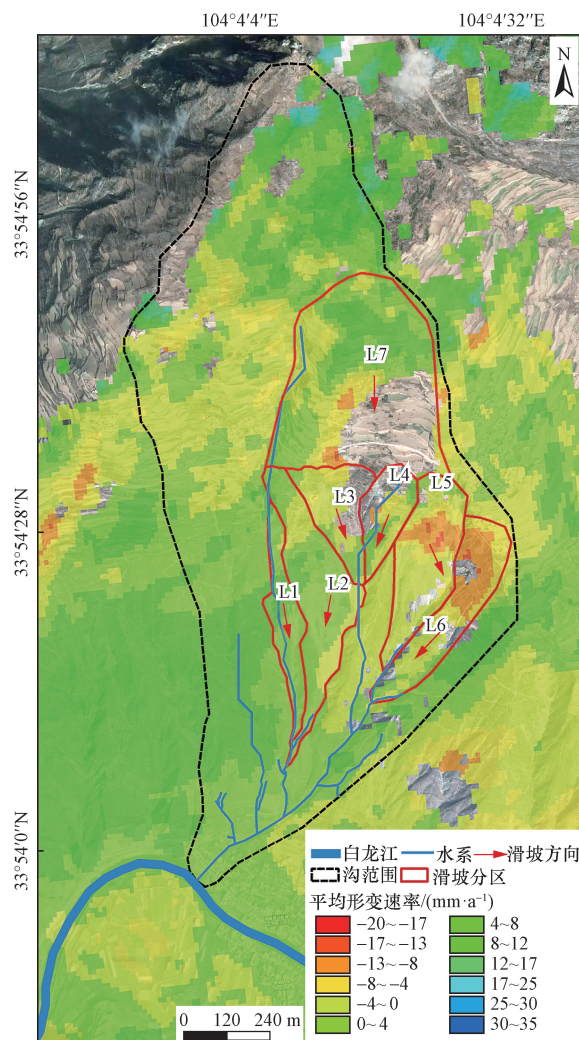


图8 平均形变速率

Fig. 8 Mean rate of deformation

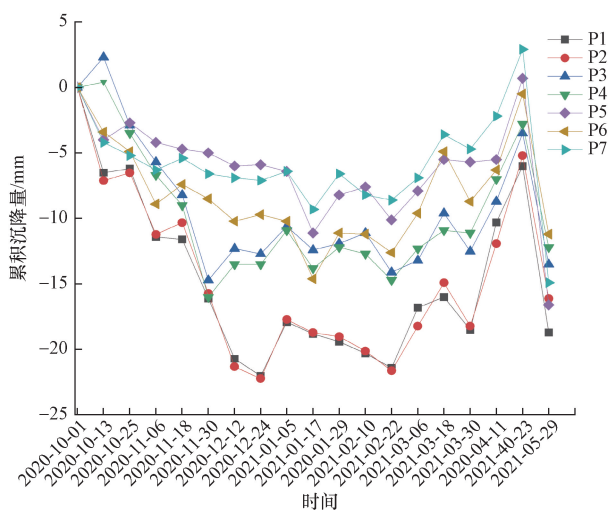


图9 特征点时序形变分析

Fig. 9 Time series deformation analysis of feature points

低,则是由于土体反复冻融导致不断抬升沉降,但是土体整体较为稳定。3月初至4月底,形变速率

加剧,土体活动状态表现为抬升,这是由于研究区三月气温开始逐渐回暖,土体内冻结的水分开始融化和降雨开始增多,研究区土体的黄土中含有大量的蒙脱石矿物、千枚岩内含有绢云母等矿物,吸水导致土体膨胀,所以土体形变表现为整体抬升。从5月初开始,形变速率急剧增大,土体急剧沉降,主要原因是气温回暖后,土体内水分增加导致土体稳定性降低,并且持续降雨和强降雨逐渐增多,所以土体发生失稳滑动和冲刷。在研究时间段内,研究区的土体整体的活动趋势呈现为沉降,这表示滑坡仍在滑动状态。根据特征点的时序形变原因分析可以得出立节沟流域内的北山滑坡的形变的控制性因素为土体的冻融变化。

3 泥石流危险性评价

3.1 危险性评价方法

基于形变分析结果、现场勘测及岩土体实验分析数据,采用 RAMMS 动力模型进行泥石流动力过程数值模拟,计算立节沟泥石流在不同降雨频率下的流速和泥石流堆积深度,进而计算泥石流的危险性。主要分析流程如图 10 所示。

RAMMS 模型采用的是改进的 VS (voellmy-salm) 单相流连续介质模型,该模型算法可用于山体滑坡、雪崩及泥石流等^[23-25]。VS 模型将摩擦力分为两个阻力部分组成:静态摩擦阻力和运动阻力。其中

改进后的总摩擦阻力 S 表示为

$$S = \mu N + (\rho g u^2) / \xi + (1 - \mu) N_0 - (1 - \mu) N_0 e^{(-N/N_0)} \quad (1)$$

式(1)中: N 为法向应力; ρ 为密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度; u 为流体速度, m/s ; N_0 为屈服应力; μ 为干库仑型摩擦因数; ξ 为黏性湍流摩擦因数。

3.2 危险性计算

3.2.1 泥石流特征

1) 参数计算

结合《泥石流勘察技术》中的泥石流分类方法,根据泥石流沉积物中黏粒的容量计算公式确定。即

$$\gamma_c = P_{0.05}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_0 \quad (2)$$

式(2)中: γ_c 为泥石流容重, g/cm^3 ; $P_{0.05}$ 为粒径小于 0.05 mm 的颗粒百分比含量(小数表示); P_2 为粒径大于 2.00 mm 的颗粒百分比含量(小数表示); γ_v 为黏性泥石流的最小容重, $2.00 \text{ g}/\text{cm}^3$; γ_0 为泥石流的最小容重,黏性泥石流取值为 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

根据野外取样编号将支沟一、支沟二、支沟三、沟口堆积体分别代号为 1#、2#、3#、4# 并进行颗粒分试验,其结果如图 11 所示,然后结合野外调查并结合土工试验和根据式(2)获得容重计算值为 $1.72 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

结合立节沟具体地形和流体型,根据相关案例和使用手册,选取相关参数(表 2)进行泥石流动力过程模拟。

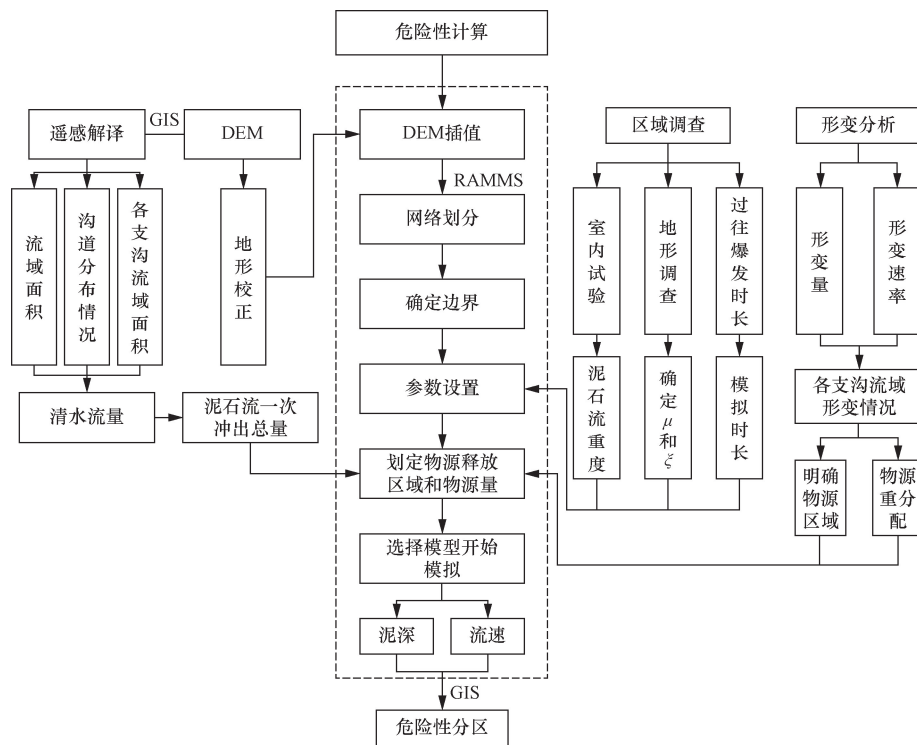


图 10 危险性分析示意图

Fig. 10 Risk analysis diagram

参考 Ouyang 等^[26],通过改进雨洪法,计算降雨频率分别为 5%、2% 和 1% 3 种情况下,立节沟各支沟流域的清水流量过程线,由于泥石流在运动过程中含有泥砂具有放大作用,所以通过清水流量乘以放大因子 BF 得到泥石流峰值流量(表 3)。放大因子 BF 计算公式为

$$BF = 1/(1 - C_V) \quad (3)$$

$$C_V = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (4)$$

式中:BF 为泥石流放大因子; C_V 为体积浓度,以小数

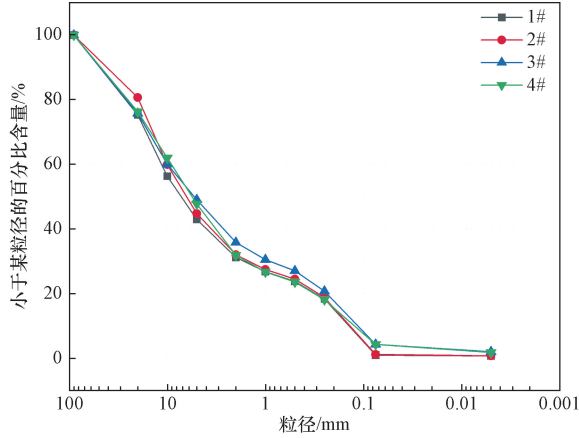


图 11 沟道堆积体颗粒级配曲线

Fig. 11 Grain size distribution curve of channel fill

表 2 RAMMS 数值模拟参数表

Table 2 RAMMS numerical simulation parameter table

$\gamma_c /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	μ	$\xi /$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	t / s	插值精度	计算精度
1.72	0.15	200	3 600	3×3	0.10

表 3 不同降雨频率下立节沟各支沟泥石流流量

Table 3 The flow of debris flow in each branch of the node gully under different rainfall frequency

沟道名称	降雨频率 $P / \%$	暴雨洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	BF	泥石流洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
支沟一	5	0.52	1.77	0.92
	2	0.82		1.45
	1	1.03		1.82
支沟二	5	0.52	1.77	0.92
	2	0.84		1.49
	1	1.04		1.84
支沟三	5	5.96	1.77	10.55
	2	9.54		16.89
	1	11.92		21.10
支沟四	5	6.79	1.77	12.02
	2	10.87		19.24
	1	13.59		24.05
支沟五	5	0.75	1.77	1.33
	2	1.20		2.12
	1	1.50		2.66

表示; γ_c 为泥石流容重, g/cm^3 ; γ_s 为泥砂容重, g/cm^3 ; γ_w 为水容重, g/cm^3 。

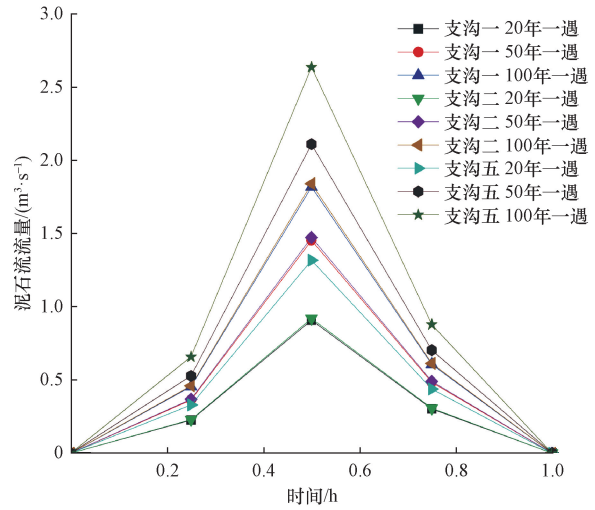
根据现场走访调查及结合暴雨流量过程线的计算公式,确定立节沟泥石流发生时长为 1.00 h。依据发生时长和泥石流洪峰流量,运用五边形概化模型获得泥石流流量概化过程线,结果见图 12。

根据上述计算所得的泥石流的洪峰流量和泥石流暴发历时计算单次泥石流总量,计算公式为

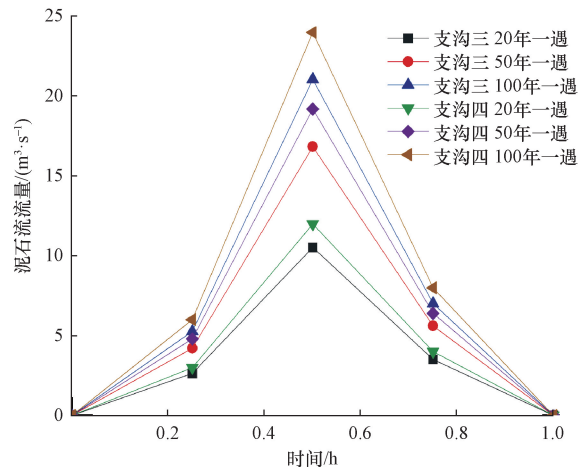
$$Q = 0.264TQ_C \quad (5)$$

式(5)中: Q 为单次泥石流冲出总量, m^3 ; T 为泥石流历时, s ; Q_C 为泥石流洪峰流量, m^3/s 。

计算得出立节沟泥石流在不同降雨频率下一次冲出总量,并且基于前面 InSAR 技术所得研究区形变分析结果,根据研究区内各支沟流域面积内累计形变量的平均值,按各支沟形变平均值的比例将立节沟泥石流的一次冲出总量对各支沟进行重分配如表 4 所示。



(a) 支沟一、支沟二和支沟五流量过程线



(b) 支沟三和支沟四流量过程线

图 12 不同降雨频率下泥石流各支沟流量过程线

Fig. 12 Flow process line of each branch channel of debris flow under different rainfall frequency

表4 不同降雨频率下立节沟各沟泥石流一次过程总量
Table 4 The total amount of debris flow in Lijie gully under different rainfall frequency

沟道名称	平均形变量/mm	占比/%	降雨频率/%	历时/s	一次冲出总量/m ³	重分配后一次冲出总量/m ³
支沟一	2.40	4.41	5	3 600	863.89	1 075.46
			2		1 382.22	1 720.75
			1		1 727.78	2 150.85
支沟二	6.93	12.77	5	875.63	3 114.20	
			2	1 400.68	4 982.77	
			1	1 749.59	6 228.19	
支沟三	18.98	34.97	5	9 997.64	8 528.08	
			2	15 996.22	13 645.05	
			1	19 995.28	17 055.58	
支沟四	21.52	39.97	5	11 396.64	9 747.43	
			2	18 233.95	15 596.02	
			1	22 793.27	19 494.18	
支沟五	4.45	8.20	5	1 253.06	1 999.72	
			2	2 006.24	3 199.58	
			1	2 506.12	3 999.31	

2) 模型构建及数值模拟

依据实地调查和灾害情况,为了改进泥石流物源量化方法,对立节沟滑坡-泥石流灾害链采用RAMMS数值模型提供的块体物源释放方式进行泥石流危险性分析。基于InSAR对研究区的形变分析结果,结合现场调查实际情况与遥感影像进行精确划定物源块体释放区域(图13),根据野外调查、

室内实验等方法确定泥石流模拟相关参数,确定泥石流一次过程总量进行不同降雨频率下的泥石流过程演进计算。

3.2.2 泥石流危险性分析结果

1) 不同降雨频率下泥石流流速和流深

基于RAMMS数值模型,对立节沟分别为1%、2%和5%降雨频率下分别进行计算后得出立节沟泥石流的泥沙堆积深度(图14)、流速分布情况(图15)。

不同降雨频率下立节沟泥石流的堆积深度情况统计如表5所示。从图14、表5可知,降雨频率从1%增加到5%,泥石流的最大堆积深度和平均堆积深度分别由9.94、1.60 m降低至7.27、0.90 m。随着降雨强度的增大,沟道内最大堆积深度达到9.94 m,超出沟道排导槽2.94 m,会危害到排导槽旁的建筑与道路,并且堆积区堆积深度超过1 m的范围占据白龙江河道宽度近95%,所以堵江危害的程度也会随之增加。

不同降雨频率下立节沟泥石流的流速情况统计如表6所示。从图15、表6可知,降雨频率从1%增加到5%,泥石流的最大流速和平均流速分别由16.75、6.93 m/s降低至13.61、5.39 m/s。

表5 不同降雨频率下泥石流堆积深度
Table 5 Debris flow accumulation depth under different rainfall frequency

沟名	降雨频率/%	最大堆积深度/m	平均堆积深度/m
立节沟	1	9.94	1.60
	2	8.92	1.33
	5	7.27	0.90

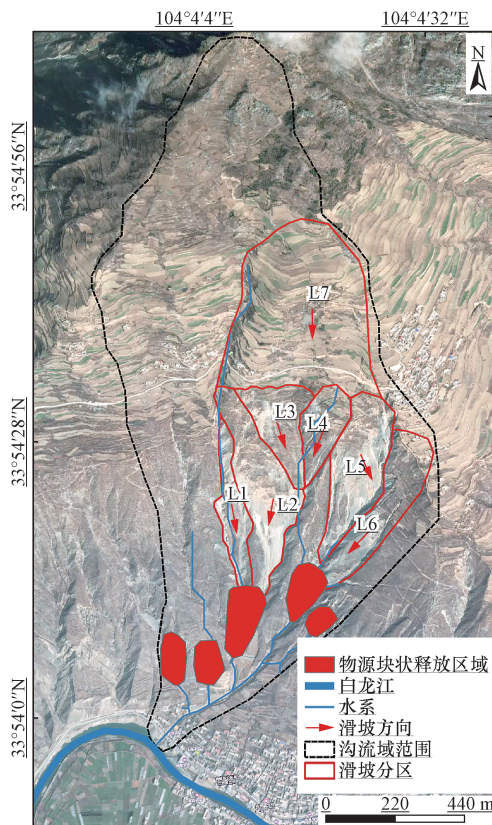


图13 泥石流模拟物源块体释放区域划分

Fig. 13 Block release area of simulated debris flow source

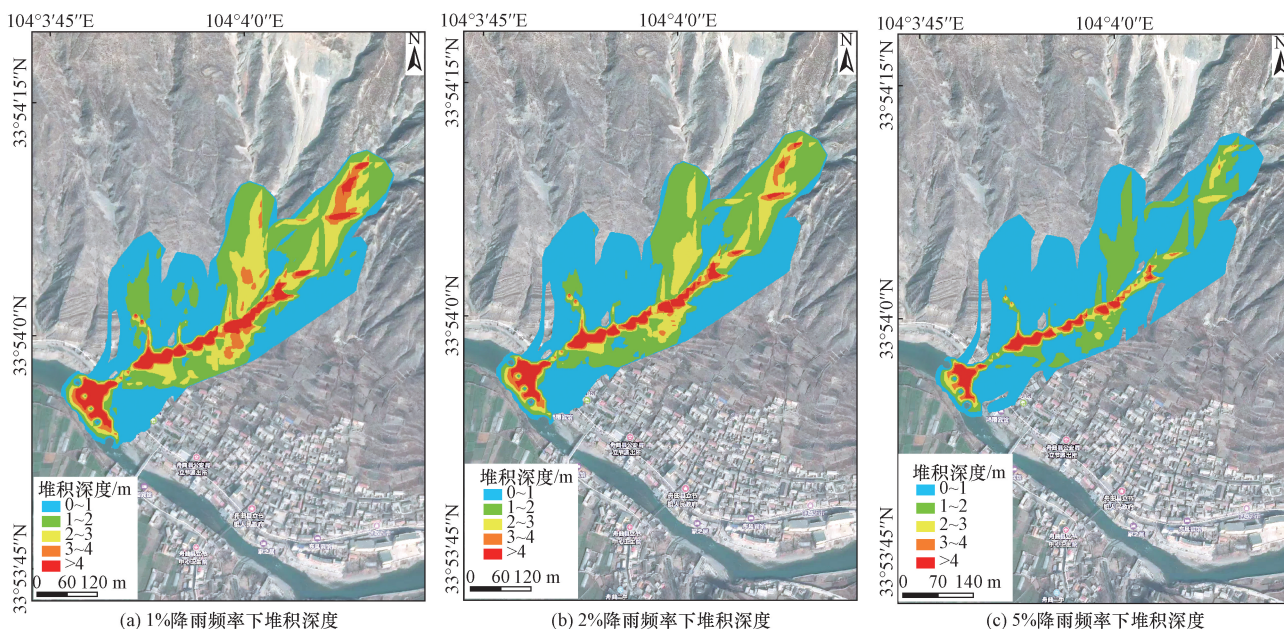


图 14 不同降雨频率下泥石流堆积深度

Fig. 14 Debris flow accumulation depth under different rainfall frequency

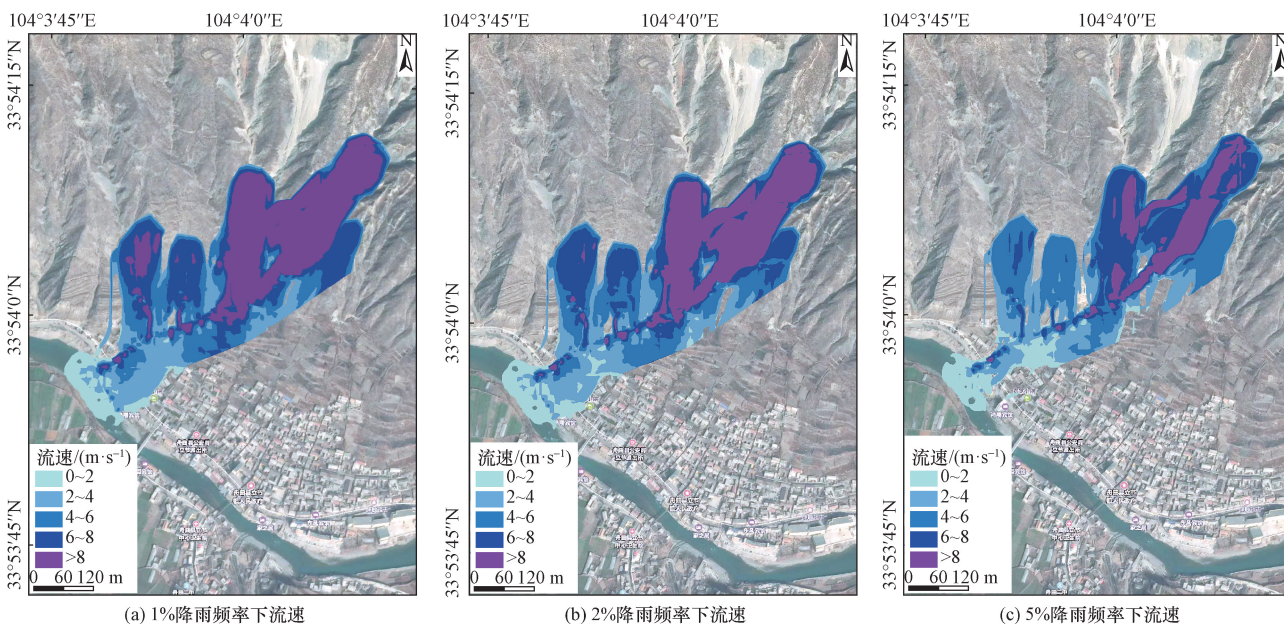


图 15 不同降雨频率下泥石流流速

Fig. 15 Flow velocity of debris flow under different rainfall frequency

表 6 不同降雨频率下泥石流流速

Table 6 Flow velocity of debris flow under different rainfall frequency

沟名	降雨频率/%	最大流速/(m·s ⁻¹)	平均流速/(m·s ⁻¹)
立节沟	1	16.75	6.93
	2	15.69	6.33
	5	13.61	5.39

2) 不同降雨频率下泥石流危险性

泥石流强度主要通过泥石流的流速和堆积深度进行评价,通过泥石流不同的流速与堆积深度将

泥石流分为高、中、低 3 个不同的强度等级^[27]。将 RAMMS 模拟所得结果按照泥石流强度划分表 7,将泥石流划分为高、中、低 3 个危险区域,得到立节沟

表 7 泥石流强度划分表

Table 7 Classification table of debris flow intensity

泥石流危险性	泥深 h/m	关系式	泥深与流速的乘积/(m ² ·s ⁻¹)
高	$h \geq 2.5$	或	$vh \geq 2.5$
中	$0.5 \leq h < 2.5$	且	$0.5 \leq vh < 2.5$
低	$0.0 \leq h < 0.5$	且	$vh < 0.5$

泥石流在不同降雨频率下泥石流的危险区域分布图。

模拟所得各个降雨频率下立节沟泥石流危险分区如图 16 所示:降雨频率从 1% 增加至 5%, 泥石流总危险面积从 0.163 9 km² 降低至 0.152 5 km²; 高危险区的面积从为 0.126 0 km² 降低至 0.081 4 km²; 高危险区面积占比从 76.88% 降低至 53.38%。

由图 16 可见,随着降雨频率的减小,即随着降雨强度的增大,总危险区和高危险区面积都在增大。高危险区大部分集中分布在滑坡面、沟道及其两岸和堆积扇区域,并伴随了明显的不同程度堵江现象。

3) 综合危险性分区

通过不同降雨频率下的泥石流强度划分,结合高、中、低降雨概率进行划分得到泥石流综合危险性划分标准如表 8 所示。

根据泥石流危险性综合评价标准,将立节沟泥石流的危险性进行划分为高危险性、中危险性和低危险性 3 类(图 17)。

表 8 泥石流综合危险性划分标准表
Table 8 Standard table for classification of comprehensive risk of debris flow

泥石流强度	降雨概率		
	低降雨(1%)	中降雨(2%)	高降雨(5%)
低	低危险	低危险	中危险
中	低危险	中危险	高危险
高	中危险	高危险	高危险

由图 17 可以得出,总危险区面积为 0.163 8 km²,高危险区面积为 0.115 5 km²。高危险区集中分布于滑坡面、沟道及沟道两岸和沟口堆积扇处,可见立节沟泥石流可能引起堵江灾害,所以灾害防

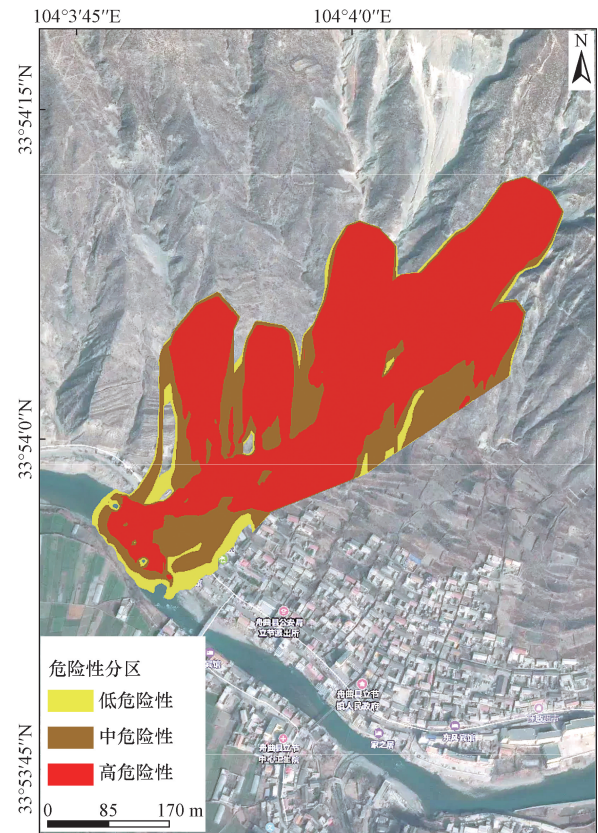


图 17 立节沟危险性分区

Fig. 17 Zoning of risk of Lijie ditch

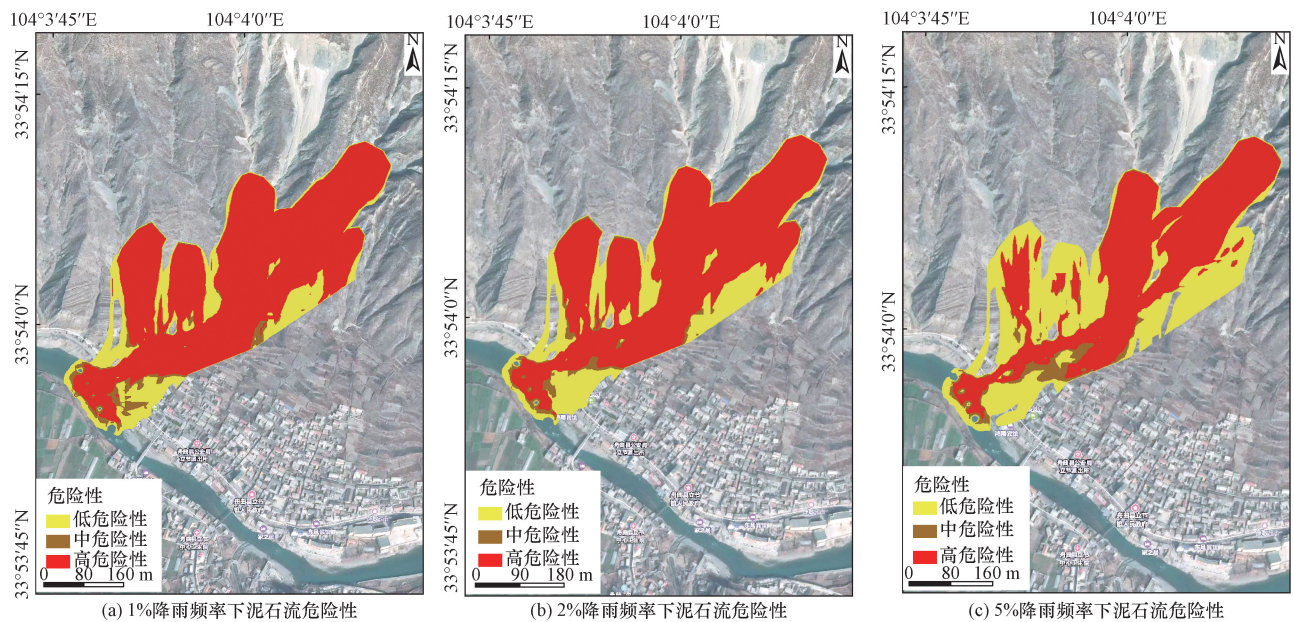


图 16 不同降雨频率下泥石流危险性分区

Fig. 16 Risk zoning of debris flow under different rainfall frequency

治应考虑河道堵塞问题。从危害范围来看,立节镇西部部分建筑及道路处于高危险范围内,所以对居民的疏散与建筑防治也应纳入防灾重点。

4 立节沟泥石流易损性评价

4.1 易损性评价因子选取

结合现场调查和危险性评价结果的泥石流危害范围,选取建筑物,道路,土地 3 种主要承灾体进行易损性评价。

4.2 易损性评价方法

根据泥石流灾害情况以及泥石流危险范围,结合主成分分析法^[28]对不同的承灾体进行主、次要成分指标进行易损性权重赋值。为了计算规范,需对主、次要成分指标进行标准化计算处理,得到评价因子的标准值,其计算公式为

$$S = \frac{W}{W_{\max}} \quad (6)$$

式(6)中: S 为评价因子标准化值; W 为主、次指标权重值; W_{\max} 为主、次指标最大权重值。

根据实际考察对研究区内按建筑物、道路和土地进行易损性评价,3类不同承灾体的易损性分级划分如下:

(1)建筑物。选取建筑物结构、建筑物距离沟口距离、建筑物层数和建筑物用途 4 个主要指标进行主、次要指标权重标准化计算,结果见表 9。

(2)道路。选取道路材料和道路类型的两个主要指标进行主、次要指标权重标准化计算,结果见表 10。

(3)土地。按土地类型和植被覆盖度两个主要指标进行主、次要指标权重标准化计算,结果见表 11。

表 9 建筑物易损性指标标准化

Table 9 Building vulnerability index standardization

评价因子	主要指标			次要指标		
	指标	权重	标准化	指标	权重	标准化
建筑物结构	4	1	土木结构	4	1.00	
			砖木结构	3	0.75	
			砖混结构	2	0.50	
			钢混结构	1	0.25	
建筑物距沟口距离	3	0.75	0~100 m	5	1.0	
			100~200 m	4	0.8	
			200~300 m	3	0.6	
			300~400 m	2	0.4	
			>400 m	1	0.2	
建筑物层数	2	0.5	一层	3	1.00	
			二层	2	0.67	
			三层	1	0.33	
建筑物用途	1	0.25	居民住房	2	1.0	
			公共活动区	1	0.5	

表 10 道路指标标准化表

Table 10 Standardization table of road indicators

评价因子	主要指标			次要指标		
	指标	权重	标准化	指标	权重	标准化
道路	道路材料	2	1	沥青	3	1.00
				水泥	2	0.67
				土石	1	0.33
	道路类型	1	0.5	主干道公路	2	1.0
			一般道路	1	0.5	

表 11 土地指标标准化表

Table 11 Standardized table of land indicators

评价因子	主要指标			次要指标		
	指标	权重	标准化	指标	权重	标准化
土地	土地类型	2	1	农田	3	1.00
				灌木	2	0.67
				裸地	1	0.33
	植被覆盖度	1	0.5	0%~30%	3	1.00
				30%~60%	2	0.67
				>60%	1	0.33

通过对泥石流危险区域内的不同土地类型进行标准化后,进行承灾体的抵抗泥石流破坏能力,即承灾体承载力的计算,其计算公式为

$$P = 1 / \left(\sum_{i=1}^n WS_i \sum_{j=1}^n WS_j \right) \quad (7)$$

式(7)中: P 为承灾体承载力; WS_i 为主要指标的权重标准值; WS_j 为次要指标权重标准值。

结合实地调查对不同的评价因子进行分类,并对承灾体的承载力进行赋值计算。通过易损性与承灾体承载力的相关性对进行易损性的评价分析,计算公式为

$$V = 1.65P^{-0.42} - 1.29 \quad (8)$$

式(8)中: V 为研究区内不同承灾体的易损性; P 为承灾体的承载力。

4.3 易损性评价结果

对立节沟危害范围内的承灾体进行遥感解译,得到承灾体分布如图 18 所示。

根据式(7)和式(8)计算出每个承载体的易损性,将易损性划分为低易损、中易损和高易损 3 类。由图 19 可得立节沟的承灾体总面积为 0.077 7 km²,高、中、低易损性面积分别为 0.007 4、0.016 6、0.053 7 km²,所占比例分别为 9.52%、21.36%、69.12%。高易损性区域主要集中在靠近沟口和紧挨沟道两旁的建筑房屋;中易损性区域主要集中在农田、主干道公路和稍微远离沟道和沟口的房屋建筑;低易损性区域主要分布在植被覆盖较差的裸地。

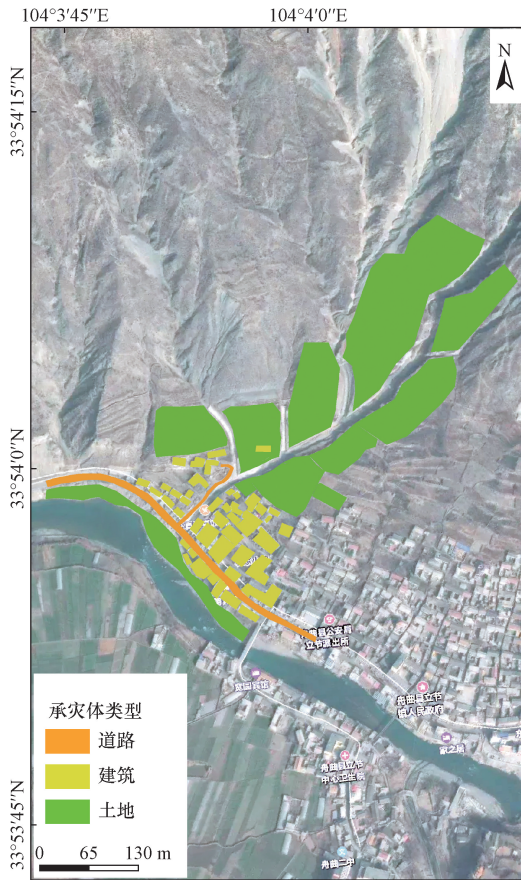


图 18 承灾体分布图

Fig. 18 Disaster body distribution

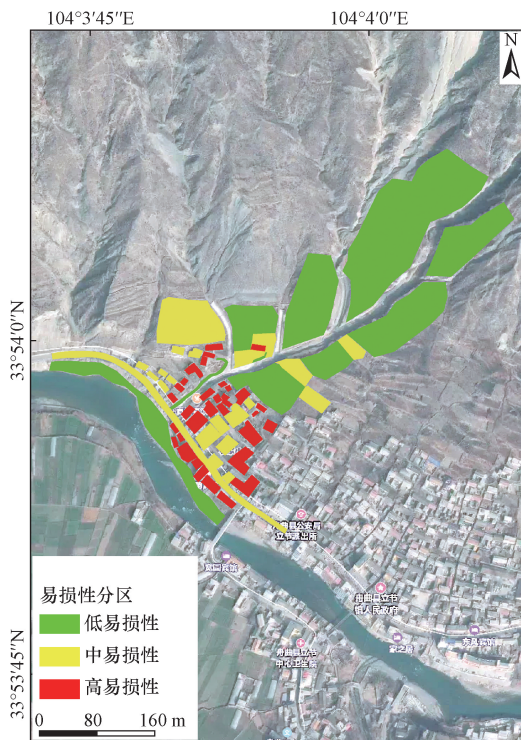


图 19 承灾体易损性分级图

Fig. 19 Vulnerability classification of disaster bearing body

5 立节沟泥石流风险性评价

5.1 评价方法

对立节沟泥石流灾害的风险评价参考文献[29]提出的泥石流灾害风险表达式,即

$$R = HV \tag{9}$$

式(9)中: R 为泥石流风险度(0~1); H 为泥石流危险性(0~1); V 为泥石流易损度(0~1)。

5.2 评价结果分析

基于上述泥石流危险性与易损性的关系,利用式(9)进行风险性计算,并划分为高风险区、中风险区及低风险区3个风险等级(图20)。

由图20可得,立节沟风险区总面积为0.0664 km²,高风险区面积为0.0087 km²、中风险区面积为0.0464 km²、低风险区面积为0.0113 km²,所占比例分别为13.10%、69.88%、17.02%。高风险区主要分布于立节沟沟口及沟道两旁建筑处。结合实地调查,由于立节沟修有排导槽,大部分泥石流会顺着排导槽冲出,但是当泥石流规模较大时,仍然会冲出排导槽,对沟道两旁建筑、道路和农田造成威胁。并且由于沟口处白龙江河道河宽约为50 m,因为历史泥石流冲出堆积,堆积扇处形成了一大片滩地,所以进一步减少了沟口处白龙江河道流通宽度(图1)。虽然泥石流从沟口冲入白龙江后会被河水冲刷至下游,但是据实地调查和采访当地目击居

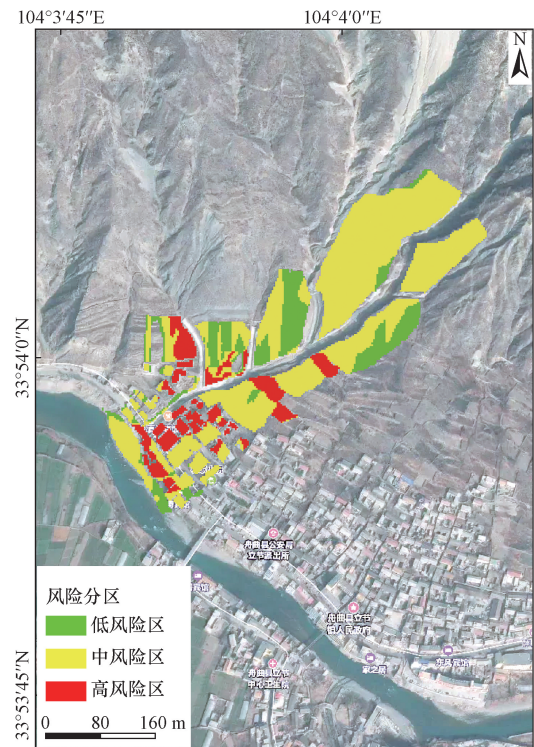


图 20 立节沟风险性分区图

Fig. 20 Risk zoning of vertical ditch

民,由于河道狭窄且历史残留堆积物众多,所以立节沟爆发泥石流时会形成短时间的堵江,且形成回水影响上游相应区域。

6 结论

(1)立节沟流域的地表形变计算结果表明,流域内主要沉降区域位于立节沟上方北山滑坡的古滑坡区 L7 边缘及顶部,以及新近滑坡区 L5 和 L6,自 2020 年 10 月—2021 年 6 月期间最大沉降量为 18.7 mm,最大平均沉降速率为 13.97 mm/年。根据典型特征点的时序形变分析,北山滑坡产生形变主要原因为受季节变化,岩土体内部水分和部分亲水矿物产生冻融现象导致体积变化及蠕动变形。

(2)结合 InSAR 技术和 RAMMS 动力模型,对立节沟泥石流在 1%、2% 和 5% 这 3 种降雨频率下进行模拟。结果显示,随着降雨强度的增加,高危险区占比由 53.38% 增加至 70.51%。其中高危险区大量分布于北山滑坡松散堆积面、沟道及沟道两岸和沟口堆积扇处,堰塞体占据河道宽度接近 95%,有可能发生不同程度的堵江灾害。计算结果与实际灾害情景相符,验证了结合形变分析与块体释放模块相结合的滑坡-泥石流灾害链危险性动力模型的可行性。

(3)根据遥感解译和实地调查结果,选取立节沟承灾体为房屋建筑、土地和道路 3 类。易损性分析结果表明,承灾体高、中、低易损性所占比例分别为 9.52%、21.36%、69.12%。其中高易损性区域主要分布在靠近沟口和紧挨沟道两旁的建筑房屋。

(4)根据危险性和易损性评价结果,对立节沟进行风险评价。立节沟高风险区面积为 0.008 7 km²、所占比例为 13.10%。高风险区主要分布于立节沟沟口及沟道两旁建筑处,并且立节沟上方滑坡松散堆积体体积庞大,仍在持续变形滑动,可为泥石流输送大量物源。风险评价结果可为该区后续的城镇泥石流防灾减灾提供参考。

参 考 文 献

[1] 中国地质灾害防治工程行业协会. 泥石流灾害防治工程勘察规范(试行): T/CAGHP 006—2018 [S]. 北京: 中国地质大学出版社, 2018.
China Geological Disaster Prevention Engineering Industry Association. Code for exploration of debris flow disaster control engineering (trial): T/CAGHP 006—2018 [S]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2018.

[2] 张玉雪, 陈光怡. 泥石流风险评价的多维正态云模型[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2019, 29(1): 91-94.
Zhang Yuxue, Chen Guangyi. Multi-dimensional normal cloud model of rock flow risk assessment[J]. Journal of Hunan University of Engineering (Natural Science), 2019, 29(1): 91-94.

[3] 胡封兵, 高甲荣, 陈子珊, 等. 泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2006, 21(3): 36-40.
Hu Fengbing, Gao Jiarong, Chen Zishan, et al. Risk assessment of debris flow[J]. Catastrophology, 2006, 21(3): 36-40.

[4] 熊江, 唐川, 陈明. 泥石流早期识别与监测预警研究进展探讨[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 165-173.
Xiong Jiang, Tang Chuan, Chen Ming. Research progress on early identification, monitoring and warning of debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 165-173.

[5] 李军, 胡向德, 黎志恒, 等. 舟曲三眼峪沟特大泥石流形成及径流特征分析[J]. 甘肃地质, 2013, 22(3): 58-63.
Li Jun, Hu Xiangde, Li Zhiheng, et al. Analysis of formation and runoff characteristics of massive debris flow in Sanyanyu Valley, Zhouqu[J]. Gansu Geology, 2013, 22(3): 58-63.

[6] 翟张辉, 沈伟, 李同录, 等. 天水市大沟滑坡-泥石流运动过程模拟分析[C]//中国地质学会, 中国地质学会工程地质专业委员会. 2017 年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2017: 1-7.
Zhai Zhanghui, Shen Wei, Li Tonglu, et al. Simulation analysis of Dagou landslide-debris flow movement process in Tianshui City [C]// Geological Society of China, Engineering Geology Committee of Geological Society of China. Proceedings of the 2017 National Engineering Geology Annual Conference. Beijing: Science Press, 2017: 1-7.

[7] 梁梦辉, 向灵芝, 沈娜, 等. 白龙江流域水峪沟泥石流危险性分析[J]. 路基工程, 2022(6): 214-219.
Liang Menghui, Xiang Lingzhi, Shen Na, et al. Risk analysis of debris flow in Shuiyugou, Bailong River Basin[J]. Roadbed Engineering, 2022(6): 214-219.

[8] 侯凯. 陕西省宝鸡市贾村镇泥石流风险评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Hou Kai. Risk assessment of debris flow in Jiachun Town, Baoji City, Shaanxi Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.

[9] 舒和平, 刘东飞, 顾春杰, 等. 中小尺度区域泥石流灾害风险评价[J]. 山地学报, 2004, 32(6): 754-760.
Shu Heping, Liu Dongfei, Gu Chunjie, et al. Risk assessment of debris flow in small and medium scale region[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 32(6): 754-760.

[10] 王术彬. 云南省倘甸两区金源乡集镇泥石流风险评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Wang Shuheng. Risk assessment of debris flow in Jinyuan Township, Ifandian District, Yunnan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[11] 吴庆安, 张金霞, 刘兴荣, 等. 单沟泥石流危险性评价[J]. 水利规划与设计, 2023(7): 83-87, 111.
Wu Qing'an, Zhang Jinxia, Liu Xingrong, et al. Single gully debris flow hazard assessment[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2023(7): 83-87, 111.

[12] 张鹏, 马金珠, 舒和平等. 基于 FLO-2D 模型的泥石流运动冲淤数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 363-368, 375.
Zhang Peng, Ma Jinzhu, Shu Heping, et al. Numerical simulation of debris flow motion based on FLO-2D model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2014, 50(3): 363-368, 375.

[13] 段学良, 马凤山, 郭捷, 等. 基于 Massflow 模型的西藏仁布杰

- 仲沟泥石流运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 25-33.
- Duan Xueliang, Ma Fengshan, Guo Jie, et al. Analysis of debris flow movement characteristics in Jiezhonggou, Renbu, Xizang Province based on Massflow model [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2019, 30(6): 25-33.
- [14] 甘建军, 罗昌泰. 中低山冲沟型泥石流运动参数及过程模拟[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(2): 97-110.
- Gan Jianjun, Luo Changtai. Simulation of motion parameters and process of mud flow in middle and low mountain gully[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(2): 97-110.
- [15] 胡卸文, 刁仁辉, 梁敬轩, 等. 基于CFX的江口沟泥石流危险区范围预测模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1689-1696.
- Hu Xiewen, Diao Renhui, Liang Jingxuan, et al. Prediction and simulation of dangerous area of Jiangkou Gou debris flow based on CFX[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1689-1696.
- [16] Gibson S, Sanchez A. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(3): 540-553.
- [17] 王毅, 唐锐亮, 张鸿, 等. 降雨驱动单沟泥石流风险区划方法研究[J]. 中国水土保持, 2024(9): 63-68.
- Wang Yi, Tang Xiaoliang, Zhang Hong, et al. Study on the method of rainfall-driven single gully debris flow risk zoning[J]. Chinese Soil and Water Conservation, 2024(9): 63-68.
- [18] 刘府生, 周瑞宸, 孙红林, 等. 基于RAMMS的冰湖溃决型泥石流演进模拟及危害性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14123-14132.
- Liu Fusheng, Zhou Ruichen, Sun Honglin, et al. Simulation of the evolution of ice-lake debris flow and its hazards based on RAMMS[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14123-14132.
- [19] 种艳, 陈冠, 孟兴民, 等. 高山峡谷区滑坡-泥石流灾害链成灾模式与危险性评价——以舟曲立节为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(3): 372-384.
- Zhong Yan, Chen Guan, Meng Xingmin, et al. Disaster model and risk assessment of landslide and debris flow disaster chain in alpine canyon area: a case study of Zhouqulijie[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2022, 58(3): 372-384.
- [20] United Nations Disaster Relief Co-ordinator. Mitigation natural disasters: phenomena, effects, and options: a manual for policy makers and planners[R]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, 1991.
- [21] 潘梦宇, 雷雨, 顾海华, 等. 基于建筑易损性分析的泥石流风险评价[J]. 人民长江, 2024, 55(10): 133-140.
- Pan Mengyu, Lei Yu, Gu Haihua, et al. Risk assessment of debris flow based on building vulnerability analysis[J]. Yangtze River, 2019, 55(10): 133-140.
- [22] 吴庆安, 张金霞, 刘兴荣, 等. 基于灰色关联度的舟曲小流域泥石流灾害风险评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10713-10719.
- Wu Qing'an, Zhang Jinxia, Liu Xingrong, et al. Debris flow disaster risk assessment in Zhouqu Basin based on grey correlation degree[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(25): 10713-10719.
- [23] Salm B. Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches[J]. Annals of Glaciology, 1993, 18: 221-226.
- [24] 刘府生, 周瑞宸, 孙红林, 等. 基于RAMMS的冰湖溃决型泥石流演进模拟及危害性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14123-14132.
- Liu Fusheng, Zhou Ruichen, Sun Honglin, et al. Simulation and hazard of glacial lake outburst debris flow based on RAMMS[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14123-14132.
- [25] 庞海松, 谢骏锦, 张小明, 等. 基于RAMMS数值模拟的短时强降雨型泥石流危险性评价[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 215-225.
- Pang Haisong, Xie Junjin, Zhang Xiaoming, et al. Risk assessment of short-term heavy rainfall debris flow based on RAMMS numerical simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 215-225.
- [26] Ouyang C, Wang Z, An H, et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows: a case study of Niwan Gully, Wudu, China[J]. Engineering Geology, 2019, 263: 105351.
- [27] 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 等. 基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价——以甘肃岷县麻路河流域为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 100-109.
- Cao Peng, Hou Shengshan, Chen Liang, et al. Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: a case study of Malu River Basin, Minxian County, Gansu Province[J]. Science of Geological Hazards and Prevention in China, 2019, 32(2): 100-109.
- [28] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Chang Ming. Quantitative risk assessment of debris flow in strong earthquake area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [29] United Nations, Department of Humanitarian Affairs. Mitigating natural disaster: phenomena, effects and options: a manual for policy makers and planners[S]. New York: United Nations, Department of Humanitarian Affairs, 1991.