https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.079

考虑前期降雨条件的小流域泥石流触发阈值及危险性评估

郭子正，魏国鹏，陈光齐*，曲正阳，程孟晨

河北工业大学土木与交通工程学院，天津 300401

摘 要： 小流域泥石流多由短时强降雨诱发，但目前关于此类灾害的降雨阈值及危险性评估研究仍然存在较多不确定性．针对该问题，以2024年发生的天津蓟州区白蛇谷泥石流为例，首先使用基于物理的模型进行了该流域的破坏概率计算，通过0.5的分类阈值确定了不同前期降雨水平下的短期临界降雨量，并形成了可用于划分“四级预警”的降雨阈值曲线．使用FLO-2D软件模拟了白蛇谷泥石流的运动过程，其中物源区的流量数据由地表径流计算值和考虑泥石流现场条件的修正系数共同决定．基于模拟得到的堆积深度（h）和流动速度（v）空间分布，分析并对比了4种不同指标下（hv、hv^2、冲击力F、决策矩阵）的泥石流危险性分区结果，并量化了泥石流危险性对于不同监测指标（短期降雨、土壤饱和度、地表径流）的响应规律．研究结果表明，小流域泥石流的短期降雨触发阈值与前期降雨水平呈负线性相关关系（相关性$R^2 \geqslant 0.92$），在极高预警等级下，短期临界降雨量可由81.6 mm（前期降雨0.1 mm/d）下降到44.4 mm（前期降雨0.5 mm/d）．FSLAM（Fast Shallow Landslide Assessment Model）和FLO-2D的联合计算方法能够有效模拟泥石流运动过程，在特定地点的速度和堆积深度与实际情况相吻合．基于冲击力和决策矩阵的危险性评估分别得到相对“保守”和“激进”的分区结果，而基于hv和hv^2的分区结果更加合理．泥石流危险性对于不同指标的响应均较为明显，但是当前期降雨较小时，对土壤饱和度变化的响应要更加敏感．上述结果揭示了泥石流危险性评估中的部分不确定性来源及可优化的方向，为小流域泥石流的降雨阈值动态识别与气象预警提供了重要参考．

关键词： 前期降雨；触发阈值；物理模型；FLO-2D模拟；破坏概率；危险性评估；工程地质．

中图分类号： P642.23 **文章编号：** 1000－2383(2026)10－3755－18 **收稿日期：** 2025-11-18

Triggering Rainfall Thresholds and Hazard Assessment for Debris Flows at Small Watersheds by Considering Antecedent Rainfall Conditions

Guo Zizheng, Wei Guopeng, Chen Guangqi*, Qu Zhengyang, Cheng Mengchen

School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, *China*

Abstract: The debris flows at small watersheds are mostly triggered by short-term heavy rainfall, but the studies regarding the rainfall thresholds and hazard assessment still remain some uncertainties. To overcome this issue, the Baishegu debris flow in

基金项目： 国家自然科学基金项目(No. 42307248)；河北省自然科学基金项目(No.D2025202001)；“长江学者奖励计划”讲席学者项目；河北省全职引进国家级高层次创新人才研究项目(No. 2023HBQZYCSB004)；隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室开放基金(No. TESKL202401)；国家自然科学基金区域集成项目(No. U25A6018).

作者简介： 郭子正（1994－），男，副教授，主要从事工程地质灾害监测预警和风险评估方面的研究．ORCID：0000-0002-9847-2596. E-mail：zizheng. guo@hebut. edu. cn

* **通讯作者：** 陈光齐，ORCID: 0000-0002-3073-5193. E-mail: chen@kyudai. jp

引用格式： 郭子正，魏国鹏，陈光齐，曲正阳，程孟晨，2026. 考虑前期降雨条件的小流域泥石流触发阈值及危险性评估．地球科学，51(10)：3755－3772.

Citation: Guo Zizheng, Wei Guopeng, Chen Guangqi, Qu Zhengyang, Cheng Mengchen, 2026. Triggering Rainfall Thresholds and Hazard Assessment for Debris Flows at Small Watersheds by Considering Antecedent Rainfall Conditions. *Earth Science*, 51(10): 3755－3772.

Jizhou District of Tianjin City in 2024 was taken as an example. The probability of failure (*PoF*) at the watershed was calculated by using a physically-based model, and the short-term rainfall thresholds under different antecedent rainfall conditions were determined through the *PoF* threshold at 0.5. Moreover, the rainfall threshold curves were also established for classifying four-level warnings. The movement process of the Baishegu debris flow was simulated using the FLO-2D software, with the discharge in the source area determined by the calculated surface runoff and a correction coefficient accounting for on-site conditions. Based on the simulated spatial distributions of flow depth (h) and velocity (v), debris flow hazard zonation when using four indicators (hv, hv^2, impact force F, and decision matrix) were analyzed and compared. Additionally, the response patterns of debris flow hazard to three monitoring indicators (short-term rainfall, soil saturation, and runoff) were quantified. The results show that the short-term rainfall triggering threshold of debris flows at small watersheds had a strong negative linear correlation with antecedent rainfall ($R^2 \geqslant 0.92$). Under the very high warning level, the short-term critical rainfall decreased from 81.6 mm (antecedent rainfall: 0.1 mm/d) to 44.4 mm (antecedent rainfall: 0.5 mm/d). The combined FSLAM (Fast Shallow Landslide Assessment Model) and FLO-2D method effectively simulated the kinematic process of the debris flow, and the velocity and depth at specific locations coincide with field observations. The hazard assessments based on impact force and decision matrix yielded relatively "conservative" and "radical" zonation outcomes, respectively, while those based on hv and hv^2 were more reasonable. Debris flow hazard responded distinctly to all indicators, but was more sensitive to soil saturation changes when antecedent rainfall was low. These findings reveal key uncertainty sources and optimization directions for debris flow hazard assessment, providing crucial references for the dynamic identification of rainfall thresholds and meteorological early warning of debris flows in small watersheds.

Key words: antecedent rainfall; triggering threshold; physically-based model; FLO-2D simulation; probability of failure; hazard assessment; engineering geology.

0 引言

滑坡灾害是我国最重要的地质灾害种类之一，每年都会造成大量人员伤亡和财产损失(Guo *et al.*, 2020a).广义范围内泥石流是滑坡的一种,通常具有突发性强和破坏性大等特点(Chang *et al.*, 2017; Koo *et al.*, 2017).其形成过程受多种因素共同影响,其中短时强降雨及地表径流是最主要的触发因素(Tang *et al.*, 2019).因此,为泥石流启动确定降雨阈值并开展预警具有重要意义.

泥石流降雨阈值分析方法大致可以分为两类:最常用的一类是根据统计方法提出经验公式,最为人熟知的是降雨强度－持时曲线(*I*-*D*曲线),最早由 Caine(1980)提出,并已在全球多地推广应用(Guzzetti *et al.*, 2007; Cannon *et al.*, 2011).此外,还有研究使用其他降雨指标,包括但不限于累计降雨－持时曲线(Aleotti, 2004)、前期降雨－累计降雨曲线等(Zhuang *et al.*, 2015).但是此种方法依赖于大量已知的泥石流历史事件和长时间降雨监测数据,在很多地区并不适用(张思玲等,2025).比如 Zhuang *et al.*(2015)利用统计方法将云南省同一处沟谷共47次泥石流事件对应的降雨量进行了分析,得出了其*I*-*D*阈值曲线和累计降雨－持续时间曲线,但是该研究建立在长期监测数据的基础上,且降雨持续时间在实践中经常被忽略或数据不可得,所以其工程适用性不足.第2类是基于数值方法(或称作基于物理的模型)分析特定降雨条件下的泥石流稳定性,并以此捕捉能够诱发泥石流启动的阈值条件.已经开发的此类方法包括 TRIGRS(Li *et al.*, 2024)、HiPIMS(Wei *et al.*, 2024)、以及相关的改进模型(Long *et al.*, 2020).它们通常需要将水文条件和岩土材料破坏理论等相结合,并且在区域尺度和小流域尺度上均有应用.但是此类方法的限制主要在于以下两点:一是在较大范围中岩土物理力学参数具有时空变异性,通常难以准确获得;二是不同模型的开发涉及的物理力学理论各异,在不同区域上的适用性较差且计算效率较低.此外,近年来随着计算机技术的快速发展,还有研究通过人工智能手段分析泥石流降雨阈值(Zhao *et al.*, 2025),此类方法虽然能够考虑大量参数但通常忽略了泥石流发生的机理过程.

上述的降雨阈值分析涉及泥石流预警的初始步骤,因为与泥石流的启动破坏息息相关.若要对泥石流运动后的潜在风险进行分析,则开展危险性评估与区划必不可少.对于小流域泥石流而言,运动过程的数值模拟通常是其关键一步,因为它能量化泥石流的影响范围与强度.已经开发的常用方法包括 FLO-2D (Chang *et al.*, 2017)、DAN3D (Cheon *et al.*, 2020)等,它们通常基于不同的流变学模型(如宾汉流体、非牛顿流体)(Hürlimann

et al., 2008).但是,关于此类研究仍然面临以下几点挑战:一是流动速度、堆积深度和冲击力等常见指标已被用于表征泥石流危险性,但是目前仍未有统一标准.二是对于危险性分区图,不同指标与分类方法得到的结果具有显著差异,这在区域尺度上的易发性/危险性评估中已经得到证实(黄发明等,2024),但是在小流域尺度上还未进行充分研究.例如 Hürlimann *et al.* (2006)使用矩阵方法通过定义不同的堆积深度和速度来定义泥石流危险性等级,可是最终结果显然受到深度和速度阈值大小的影响,主观性较强;Prieto *et al.*(2018)提出使用动量通量(hv^2)来表征泥石流危险性,但是主要将其用于评估建筑物受损伤程度,未能得到最终的危险性分区,因此无法揭示不同评价指标间的异同.三是在泥石流监测过程中,不同参数的预警能力没有系统的对比.这些问题都极大地限制了小流域泥石流预警研究的发展,极大地增加了结果的不确定性.

针对上述问题,笔者以 2024 年 8 月发生的天津蓟州区白蛇谷泥石流为例,主要通过确定性模型与数值模拟相结合的方式开展泥石流启动的降雨阈值识别和危险性评估,目的是为了提出一种能够用于小流域泥石流气象预警的技术框架,并揭示有关其危险性评估和区划的一些不确定性问题,从而为后续研究提供基础.

1　白蛇谷泥石流

1.1　研究区概况

研究区位于天津市北部蓟州山区(图 1),距主城区直线距离约 28 km,地理坐标介于 N40°03′～40°06′和 E117°18′～117°21′之间.该区域地处燕山山脉南段,地质构造上属燕山期构造褶皱带的一部分,海拔范围为 229～829 m,地势特点主要为西北高东南低.出露地层主要为中元古界雾迷山组和长城系地层,岩性以片麻岩、石英岩及砂岩为主.受长期地壳运动影响,区域内节理及断裂较为发育,地层倾角较大,岩体风化破碎.棕壤和褐土是最为主要的土壤类型,局部区域有黄土堆积.

研究区植被覆盖度总体良好,以北方山地常绿落叶阔叶林为主,但植被类型随海拔的垂直变化较为明显.气候上属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温约 11.5 ℃,年降雨量约为 720 mm,且时空分布具有明显的不均匀特征,汛期主要集中为 6～9 月,该期间降雨量可达全年总量的 70% 以上.白蛇谷流域属潮白河水系的支流汇入

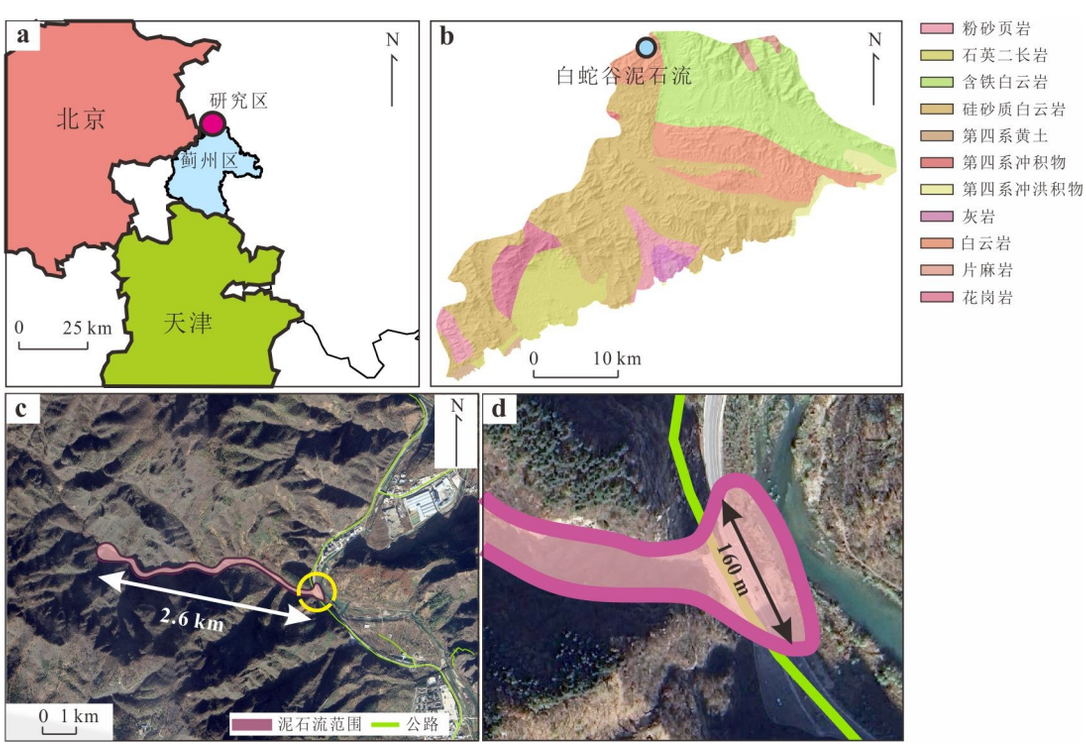

图 1　研究区地理位置(a);岩性分布(b);白蛇谷泥石流遥感影像和边界(c～d)

Fig.1　Location of the study area (a); the lithology map (b); the remote sensing image and the boundary for the Baishegu debris flow (c－d)

区，小型季节性沟谷较为发育，平时以地下水补给为主，在雨季地表径流显著增强，往往形成间歇性溪流．沟谷内通常分布残坡积层和松散堆积物，厚度一般为 1～3 m，局部堆积体厚度可达 10 m 以上，地表物质组成以砾石、砂质壤土及风化碎屑为主．

1.2　泥石流发育特征及成因分析

2024 年 8 月 9 日，蓟州区遭遇连续多小时强降雨，累计降雨量接近 50 mm．10 日凌晨 2 点左右，白蛇谷景区内发生泥石流事件，山石泥浆方量达数千立方米，泥石流冲毁了沟谷出口处的公路，造成持续多日的交通中断，预计造成经济损失数十万元．

白蛇谷整体呈北西－南东走向（图 2），主沟自北向南延伸，沟长约 2.6 km，汇水面积约 4.52 km^2，属典型的小流域山区沟谷地貌单元．流域地势起伏较大，沟谷纵深明显，平均坡降约 180‰．两岸山体陡峭，最高海拔约 880 m，最低处沟口高程约 280 m，地形高差超过 600 m．坡度多在 30°～45°之间，坡面切割较强烈且沟槽密集．受重力与日常降雨侵蚀作用影响，坡面分布较多的崩塌堆积物与坡积碎屑物．流通区沿主沟中上游展布，海拔范围在 310～410 m 左右，沟底宽度普遍小于 20 m，纵坡降在 150‰～250‰之间．该段沟谷较为狭窄，受洪流冲刷强烈，沟壁陡峭且多为裸露岩体，局部段落形成深切槽沟．沟内堆积物粒径变化显著，主要为砂砾质与块石混合物，含泥量较低．泥石流堆积区主要为沟口处地势较缓开阔地段，形成了典型的扇形沉积区，直径约 160 m，扇面坡度约为 6°～8°．堆积体物质组成以砾石和砂质壤土为主，粒径从 0.5 cm 到 40 cm 不等，局部块石直径超过 1 m．堆积体结构松散，分选性差．

白蛇谷泥石流的形成与演化受到地形地貌、地质构造、物源特性和降雨条件的多重控制作用．首先，流域陡峭的地形条件为泥石流启动提供了充足的能量来源（图 3）：沟道总体坡降较大，上下游高差悬殊，形成较强的位势能差．主沟“陡－缓－陡”的地形结构有助于上游地表径流的汇集和中下游的冲刷与沉积．此外，流域内具有多条支沟且长度较短，呈树枝状分布，这明显缩短了降雨入渗转换为径流的响应时间，强化了局部峰值流量．其次，地质构造与岩性条件为泥石流发生提供了丰富物质基础：岩体节理裂隙密集发育，风化破碎较为严重．坡面覆盖的残坡积层与崩塌堆积物厚度普遍在 1～3 m，局部可达 10 m 以上，土体结构松散、渗透性强．暴雨过程中，渗流作用削弱了土体抗剪强度，诱发坡面滑塌与崩落，使固体物源不断补充进入沟道，为泥石流形成提供充足物料．气象因素是此次泥石流的直接触发条件，泥石流发生前 10 d（7 月 30 日～8 月 9 日）研究区累计降雨量达 141 mm（图 4），其中 8 月 9 日降雨量达 44 mm，附近局部降雨甚至超 100 mm．此外，研究区地处景区，频繁的道路及景区设施建设改变了原有坡面径流路径和排水格局．部分人工开挖边坡缺乏防护，坡脚堆积松散物较为密集，为下游沟道提供了额外的物源条件．人类活动与自然条件的叠加，进一步降低了沟谷两侧斜坡的稳定性．

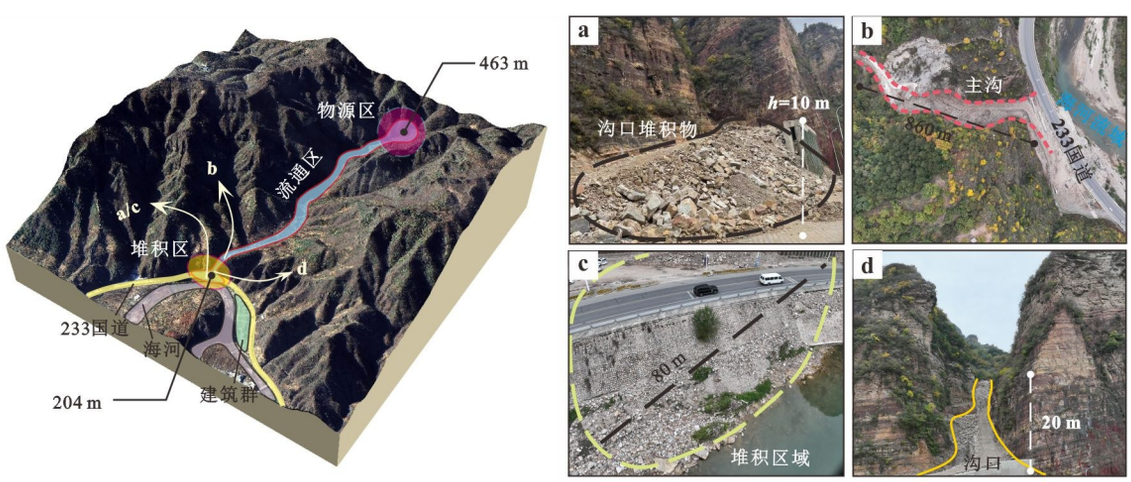

图 2　白蛇谷泥石流发育特征

Fig.2　Development characteristics of the Baishegu debris flow

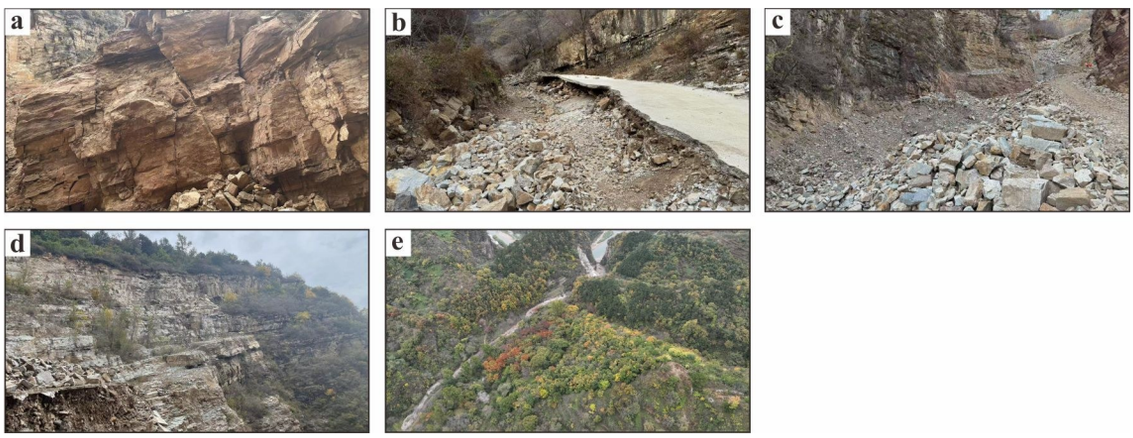

图 3　白蛇谷泥石流物源区及流通区现场特征

Fig.3　The on-site characteristics at source and transition areas of the Baishegu debris flow

a.侵蚀岸坡;b.掏蚀下切;c.松散物源;d.危岩体;e.沟道侵蚀

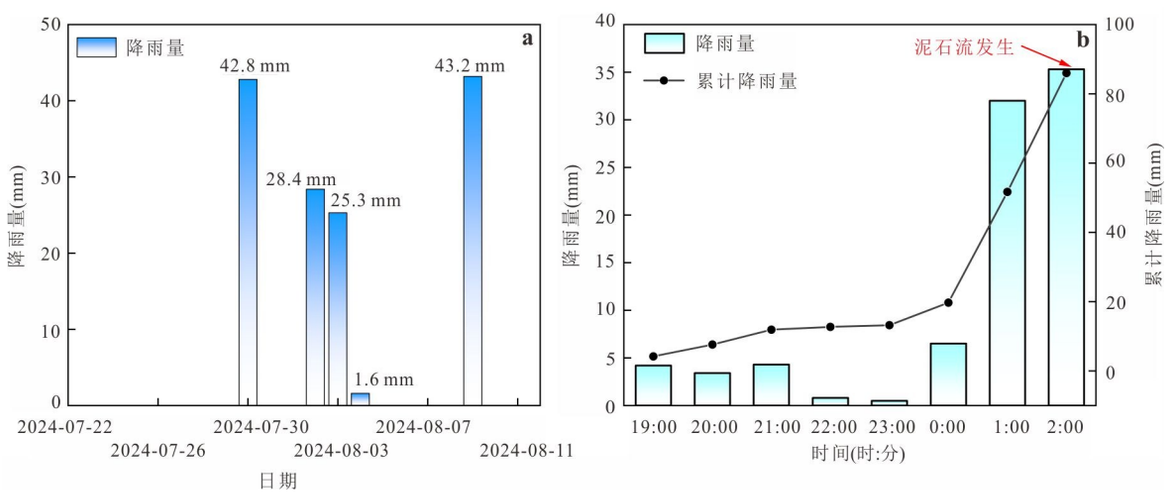

图 4　泥石流发生前每日降雨量(a);8 月 9～10 日的小时降雨量(b)

Fig.4　Daily rainfall before the debris flow (a); hourly rainfall during 9th and 10th August (b)

2　泥石流降雨阈值及数值模拟

2.1　数据源

本研究中的泥石流降雨阈值分析主要使用基于物理的 FSLAM 模型,其建模过程需要使用 5 类栅格文件,包括 DEM、土壤类型、土地利用、前期有效降雨和短期极值降雨.其中,DEM 数据来源于日本宇宙航空研究机构的 ALOS PALSAR 卫星开源数据,分辨率为 12.5 m.土壤类型和土地利用数据来自于中科院资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn).降雨数据来源包括两部分,一个是蓟县气象站点的历史日降雨,用于计算前期降雨的有效入渗;一个是 CHRIPS 公开数据集(https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps),它主要基于对雨量观测站和雷达遥感降水的插值处理而得到,并且以 0.25°的空间分辨率提供全球每日降雨数据.该数据主要用来获取白蛇谷泥石流发生前数天的降雨数据,因为前述气象站点和白蛇谷流域具有一定的空间距离,而 CHRIPS 数据集虽然分辨率较低,但是其单一网格能够正好覆盖流域.且通过对 2024 年 7～8 月气象站所在地的 CHRIPS 观测值和和日监测数据对比可发现,二者具有较高相关性(R^2=0.943),且平均偏差仅为 0.37 mm,说明 CHRIPS 数据集在研究时段内对区域日尺度降雨量总体估计可靠.上述所有栅格类数据均经过 ArcGIS 软件进行统一坐标系统处理(CGCS2000),并进行重采样和裁剪,以确保数据的空间一致性.

对泥石流运动过程的分析主要使用 FLO-2D 作为模拟工具,通过 Planet 卫星和吉林一号卫星分别获取了泥石流发生前后的高分辨率遥感影像,日

期分别为8月9日(事件发生前)和8月17日(事件发生后),二者的对比能够清晰地揭示泥石流的破坏边界与影响范围.此外,在泥石流发生后的两天内进行了现场调查和无人机摄影,用于进行地形分析和灾害特征解译.

2.2 泥石流启动分析及降雨阈值识别

2.2.1 FSLAM模型原理 FSLAM(Fast Shallow Landslide Assessment Model)是一种基于物理机制的浅层滑坡快速稳定性分析模型,可以用于不同尺度的地质灾害易发性和危险性评估(郭子正等,2023).该模型主要包含两部分,一是稳定性分析部分,另一个是地表径流部分.前者基于无限斜坡模型计算坡体稳定性,并且考虑了两种降雨条件:一种是对应中长时间尺度的前期有效降雨Pa(mm/d),为滑坡破坏提供初始条件,另一种是最终诱发滑坡失稳的短期临界降雨Pe(mm).Pa通过传统的SHALSTAB模型转化为地下水位(Montgomery and Dietrich, 1994;Pack *et al.*,1998):

$$h_a=\left(\frac{a}{b}\right)\frac{Pa}{K\sin\theta\cos\theta}\left(\frac{\rho_w}{\rho_s}\right), \tag{1}$$

式中:h_a对应前期有效降雨后的地下水位(初始条件为干燥时),a是特定地点的上游汇水面积,b是单元格大小,K是土壤渗透系数,θ是坡角,ρ_s是饱和土壤密度,ρ_w是水的密度.对于短期临界降雨,FSLAM通过事件尺度的水量平衡来分析其入渗与径流过程,即将Pe视为入渗量I、地表径流Q和土壤储水变化ΔS的和(Mishra and Singh, 2003).其中的地表径流采用以下公式进行计算:

$$Q=C_{runoff}IA, \tag{2}$$

式中:I是降雨强度、A是区域汇流面积、C_{runoff}是区域径流系数并按照下式计算(Hürlimann *et al.*, 2022):

$$C_{runoff}=\frac{(Pe-I_a)\cdot(Pe+23I_a)}{(Pe+11I_a)^2}, \tag{3}$$

式中:I_a是降雨的初始损失量,包括地面和植被截流、填洼等部分.在这一步中,FSLAM模型采用SCS-CN方法建立地表径流与降雨入渗间的非线性关系,该理论仅需要通过设置径流曲线数(CN)就能够调节降雨初始损失量和入渗量进而改变地表径流.因此对于Pe部分,它通过垂向流的方式直接渗透,所对应的地下水位为:

$$h_e=\frac{Pe-I_a-Q}{n}, \tag{4}$$

式中:n是土壤孔隙度.因此根据无限斜坡理论,边坡的稳定性系数可表示为(Pack *et al.*, 1998):

$$F_s=\frac{C+(\gamma_s z\cos^2\theta-\gamma_w h)\tan\phi}{\gamma_s z\sin\theta\cos\theta}, \tag{5}$$

式中:C为内聚力,φ为内摩擦角,z为土壤厚度,h是地下水位高度,等于上述h_a和h_e之和.FSLAM模型考虑了植被根系对于土壤的固定作用,因此C是土壤内聚力C_r和植被根系表观内聚力C_s之和.此外,考虑到岩土物理参数的空间异质性,FSLAM模型使用高斯随机分布方法来允许输入参数的范围值而非特定值,这样能够计算边坡破坏概率,不仅更符合工程实践,同时更契合滑坡风险评估的思想.

2.2.2 分级降雨阈值 利用FSLAM模型进行降雨条件下白蛇谷流域稳定性分析,需重点确定前期有效降雨量.本研究使用Easy_Bal软件完成此步骤计算,它主要基于水量平衡法,结合太阳辐射、地表温度、蒸散等一系列变量来计算大气降雨到土壤层中的有效入渗(Serrano-Juan *et al.*, 2020).需要提供研究区经纬度、土壤持水度(本文为0.3)、初始体积含水量(本文为0.35)和植物根部平均深度(本文为0.5 m),然后通过输入降雨、温度和蒸散数据自动完成计算.本文使用蓟州区2013—2017期间的历史每日降雨、温度和蒸散值,没有直接使用2024年泥石流发生前的降雨数据是因为现有研究未达成关于前期降雨作用时段的一致意见(Guo *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2021),因此多年降雨数据能更全面地反映研究区降雨过程的统计特征和气候背景条件,减少单一年份对结果的偶然影响.计算结果表明(图5)蓟州区多年平均有效入渗率为0.11,平均前期有效降雨水平为0.39 mm/d(Pa).选择泥石流发生前的9日19:00~10日1:00的降雨量(51.7 mm)作为Pe(图4b).

除了前述5个栅格文件,FSLAM模型需要使用土壤参数和土地利用参数来进行建模计算.由于区域内可用的岩土勘察数据不足,选择使用本次泥石流事件来进行参数反演.首先根据类似研究和专家经验确定参数初始值,然后通过迭代计算来进行微调.因为51.7 mm的降雨量触发了白蛇谷泥石流,因此当降雨略小于该值时,流域应整体保持稳定.通过多次迭代计算后,取得的最佳效果结果如图6所示.当降雨量为48 mm时(图6b),流域内仅有个别栅格破坏概率大于0.5,但是当Pe增大为50.8 mm时(图6c),$PoF>0.5$的栅格数显著增多,特别是在物源区和沟道两侧,有较多区域会发生破

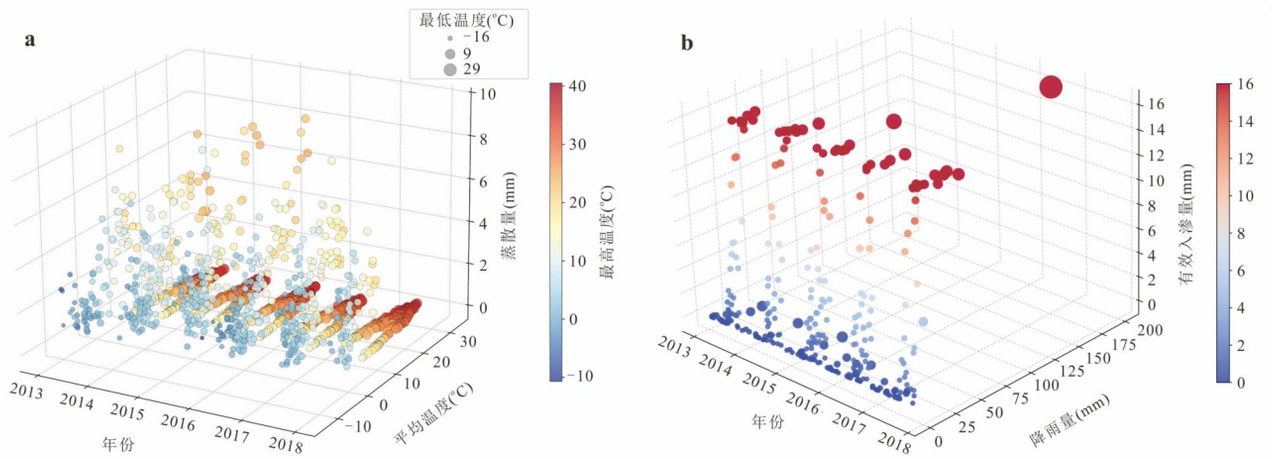

图 5　研究区前期有效降雨计算过程

Fig.5　The calculation for antecedent effective rainfall for the study area

a.2013—2018 年间的每日温度和蒸散;b.2013—2018 年间的每日降雨和有效入渗量

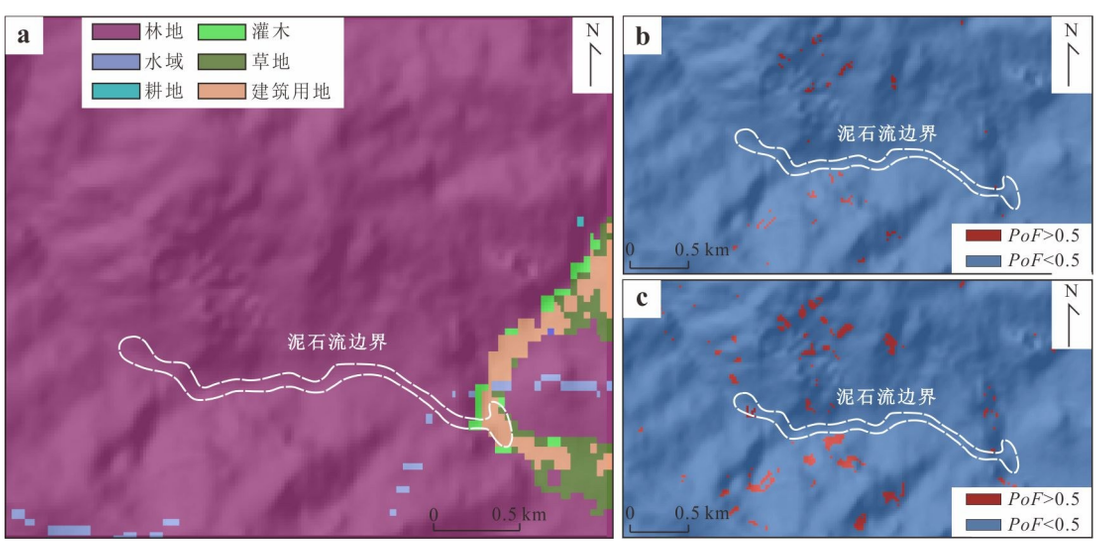

图 6　参数反演时的输入数据和结果值

Fig.6　The input data and results during the parameter calibration

a.研究区土地利用分布;b～c. 利用破坏概率的演变确定泥石流临界降雨阈

坏,这与实际情况相符,此时使用参数值见表 1 和表 2.需要说明的是,表 1 中 *CN* 被分为 A、B、C、D 四大类,分别对应于干燥、正常、湿润、极其湿润的下垫面情况(USDA, 1986, 2004).

随后,利用上述反演后的参数来确定诱发白蛇谷泥石流的不同降雨阈值组合.选择的 *Pa* 值范围为 0.1～0.5 mm/d,在不同气候区的多个实证研究表明(Wu *et al.*, 2016; Fernández-Mejuto *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2023),大气降雨的有效入渗率在 10%～20% 之间,因此该 *Pa* 范围对应的前期总降雨约为每月 15～150 mm,这与天津市的多年平均降雨水平(见 1.1 节)大致吻合.每次计算首先固定 *Pa* 值,再使用 2 个相近的 *Pe* 值分别得到流域内破坏概率分布图.对两张 *PoF* 图进行对比,当在增大 *Pe* 前后流域内出现明显的 *PoF* 变化时,可认为该 *Pe* 值是在当前的前期降雨水平下,能够诱发物源区失稳启动的降雨阈值.在风险评估中,破坏概率(*PoF*)既可用于二分类,也可用于分级预警.本文以 *PoF*=0.5 作为“稳定/不稳定”的分类阈值,是因为该值对应失稳与稳定概率相当的临界状态,具有明确的工程解释性,并在滑坡概率易发性模型与风险管控研究中被广泛作为阈值参考(Camilo *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2025).考虑到预警发布需要更精细的分级以支撑差异化响应措施,本文进一步引入 *PoF*=0.2 与

PoF=0.8作为辅助分界值:其中PoF≤0.2表示系统处于低失稳概率状态,适用于低等级预警或提示性警报;PoF≥0.8则表征系统处于高失稳概率状态,可作为高等级预警或应急预警触发条件.需要说明的是,0.2和0.8的阈值设定虽具有一定主观性,但是当前研究关于该主题并没有形成统一意见,加上部分研究也采用了相同的分类值(Liu *et al.*, 2024),因此认为是较为合理的.基于此,全部降雨工况被划分为4类:低预警等级(0<PoF≤0.2)、中预警等级(0.2<PoF≤0.5)、高预警等级(0.5<PoF≤0.8)、极高预警等级(0.8<PoF≤1).

最终得到白蛇谷流域的泥石流分级降雨预警结果如图7所示.可以发现前期降雨和短期临界降雨对于流域整体稳定性均有明显影响.随着Pa的增加,达到相同PoF所需的Pe值呈明显下降趋势.例如当Pa为0.1 mm/d时,需要约80 mm的临界降雨才会发生极高等级预警,该值超过了研究区全年平均降雨量的10%;但是当Pa增大到0.4 mm/d时,仅需约50 mm的Pe即可进入极高等级预警.类似地,对于特定的短期极值降雨,前期降雨的有效入渗程度不同,所导致的稳定性情况也不同.拟合得到了对应不同预警等级的降雨阈值曲线及函数关系,结果表明诱发白蛇谷泥石流的Pa和Pe条件呈负线性相关,不同曲线的拟合优度均高于0.92,可用于后续该流域的泥石流灾害防治与主动预警.

2.3 泥石流运动过程数值模拟

2.3.1 基于FLO-2D的数值模拟 FLO-2D是一款为洪水和泥石流模拟开发的二维数值分析软件,可以利用二维深度平均浅水方程模拟泥石流在复杂地形上的时空演化(Wu *et al.*, 2013).其数值核通过有限差分/有限体积近似求解质量守恒与动量守恒方程,从而获得流深、流速及能量的分布情况.质量守恒可采用公式(6)表示(O'Brien *et al.*, 1993):

表1 白蛇谷流域土地利用参数

Table 1 The parameters for the land use of the Baishegu watershed

类型	*Cr*-min/max(kPa)	*CN*-*A* (-)	*CN*-B (-)	*CN*-C (-)	*CN*-D (-)
林地	0/6	40	60	69	76
灌木	0/5	43	65	76	82
草地	0/1	49	69	79	84
耕地	0/1	62	71	78	81
建筑用地	0/0	90	92	96	98
水域	999/999	100	100	100	100

表2 土壤物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of soil

Cr-min / max (kPa)	*φ*-min / max(°)	*h* (m)	*K* (m·s^{-1})	*n* (-)	*ρ* (kg·m^{-3})	*HSG* (-)
25 / 45	34 / 42	1.0	10^{-6}	0.35	2 600	B

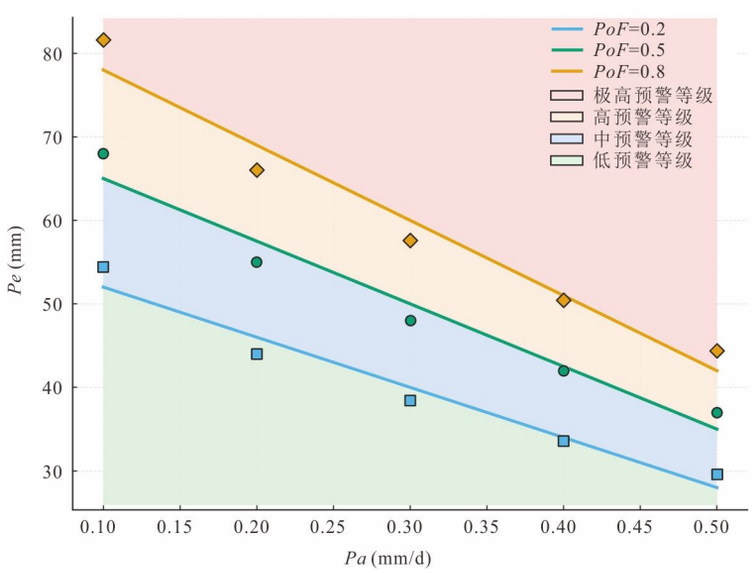

图7 白蛇谷泥石流分级降雨阈值曲线

Fig.7 The rainfall threshold curves for the Baishegu debris flow

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\nabla\cdot(hv)=i(x,y,t). \tag{6}$$

动量守恒(以x分量为例)则表示为(O'Brien *et al.*, 1993):

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t}+\nabla\cdot(Huv)=-gH\frac{\partial e}{\partial x}-\frac{\tau_{bx}}{\rho}+i(x,y,t)u, \tag{7}$$

式中:H为流深,u和v分别为x与y方向的深度平均流速,ρ为泥石流密度,e为地形标高,$i(x, y, t)$为单元源项,用于表征降雨入流或上游来流补给,τ_{bx}为x方向床面切应力,用于表征地表粗糙度及阻力效应(Wu *et al.*, 2013).针对泥石流的黏塑性流变,可在动量项中引入屈服/粘性修正以描述宾汉或非牛顿流体特征,模拟输出的指标主要包括速度、深度、冲击力等,可用于后续的动力学过程分析和危险性评估.

基于FLO-2D软件建立了白蛇谷泥石流的地质模型(图8a),每个网格都赋予了相应的高程值,模拟区域覆盖整个沟谷及汇流出口,同时边界处设置为无流动边界,入流点为清水流量输入边界,使用FSLAM输出的地表径流结果,同时参考中华人民共和国国土资源部(2006)泥石流灾害防治工程勘查规范(DZ/T 0220—2006[S])进行密度修正与体积浓度换算,按照下式计算泥石流的总流量Q_c:

$$Q_c=(1+\eta)D_cQ_p, \tag{8}$$

式中:Q_p为FSLAM计算得到的地表径流量;D_c代表泥石流阻力系数,通常在1.5~2.5之间,取决于泥石流的流变特性,本研究取2.0;η为泥石流密度的修正因子按照下式确定:

$$\eta=\frac{\gamma_c-\gamma_w}{\gamma_h-\gamma_c}, \tag{9}$$

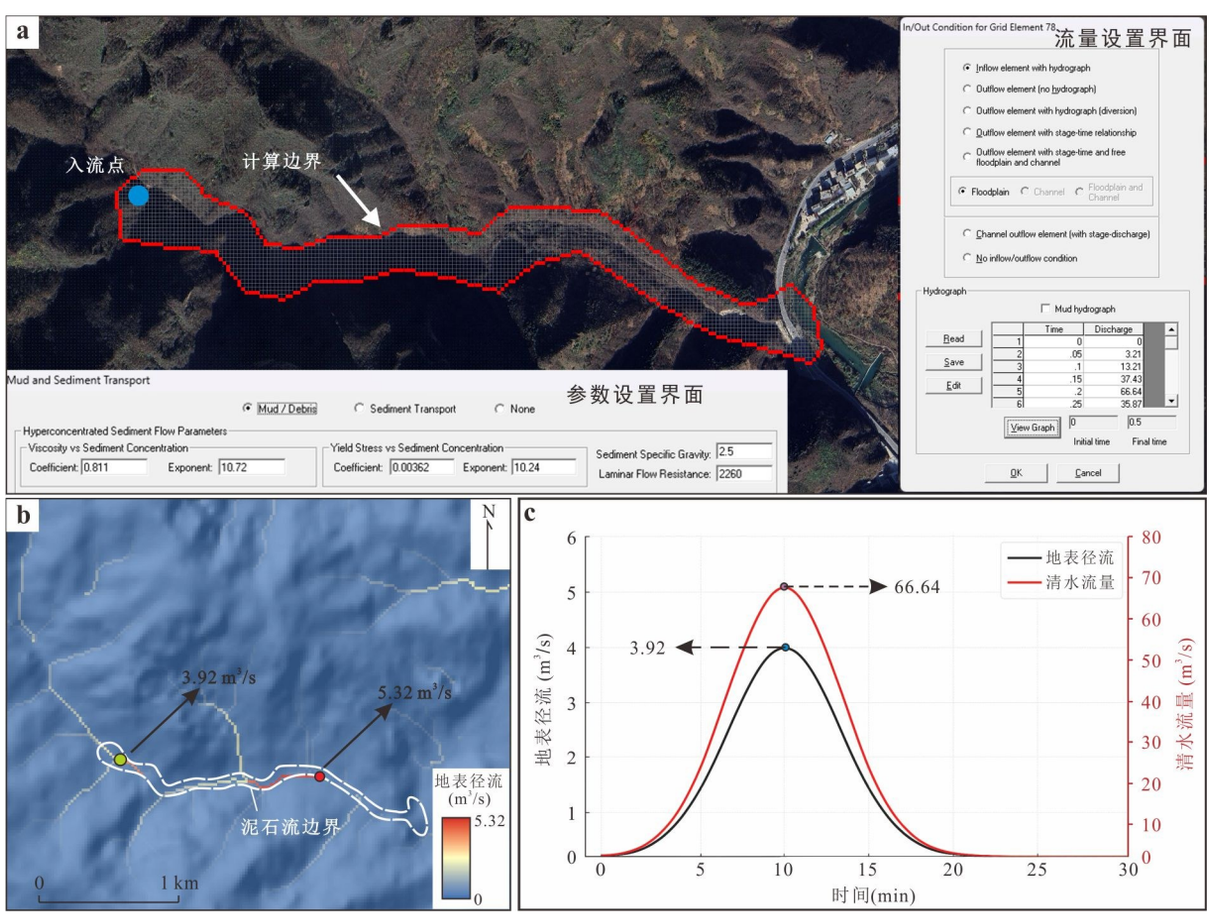

图8　FLO-2D中建立的泥石流数字模型及参数设置界面(a);FSLAM得到的地表径流分布(b);输入FLO-2D的清水流量过程线(c)

Fig.8　The numerical model of the debris flow and the parameter setting interface (a); spatial distribution of runoff obtained from FSLAM model(b); the discharge hydrology input for FLO-2D (c)

式中：γ_c为泥石流总单位重度，γ_w为水的单位重度，γ_h为固体颗粒单位重度.本案例通过现场勘察确定γ_c为 2.5 kN/m^3，γ_w和γ_h分别设置为 9.81 kN/m^3 和 2.7 kN/m^3，因此η值为 7.5.此外，体积浓度C_v按照下式进行计算：

$$C_v=\frac{V_s}{V_s+V_w}, \tag{10}$$

式中：V_s和V_w分别表示固体颗粒和水的体积.根据降雨数据和流域总面积，可以估算水的总体积，V_s和V_w之间的比率大约为 2.46，通过该比率和泥石流的体积浓度，得出C_v为 0.45.

FSLAM 模型能够输出每个栅格处的地表径流量，如图 8b 所示，可以发现不同位置的径流值差异较大，物源区径流峰值为 3.92 m^3/s.需要指出的是，研究区内还存在局部更大的径流值(5.32 m^3/s)，但主要出现在下游汇流位置，反映的是多支沟汇流后的径流放大效应，显然前者才更能反映泥石流启动时的水力条件.利用上述公式计算得到的泥石流输入清水流量Q_c=66.64 m^3/s.使用“五边形”法则确定流量过程线(图 8c)，将其作为关键的边界条件输入至 FLO-2D 模型中，驱动后续的泥石流运动模拟，所使用的计算参数见表 3.其中α_1和β_1与泥石流材料的屈服应力相关，主要用于控制泥石流在低剪切应力下的流动特性；α_2和β_2与泥石流的粘性系数相关，用于模拟泥石流的非牛顿流动行为.这 4 个参数均属于经验系数，并不对应具体的物理量.曼宁系数能够表征地面粗糙情况及阻力效应，由土地利用分布图可看出，沟床(沟道)主要以林地为主，而沟口主要分布灌木和草地，根据 FLO-2D 用户手册(O'Brien, 2011)和相关资料(https://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm?utm_source=vip.dedegpt.vip)，确定前者的曼宁系数为 0.1，后者为 0.07.其他参数的取值则基于研究区相关勘察报告和专业文献(Wang *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2025)综合确定.

2.3.2 白蛇谷泥石流运动过程 FLO-2D 的模拟结果清楚地展示了泥石流流动速度和堆积深度的分布情况(图 9，图 10).整个运动过程持续约 30 min，并且运动特征具有显著的时空变化：在泥石流启动初期(T=9 min 及之前)，仅运动到沟谷上游陡坡段，最大堆积深度为 1.09 m，最大流速为 3.91 m/s.由于此段沟道狭窄且坡度较大，泥石流在这一阶段以较高流速下行，对沟道底部和两侧产生较强的侵蚀作用.在T=18 min时，泥石流已扩展至下游的较宽区域，堆积深度逐步增加，最大流深到达了 2.56 m，但流速的增长在此阶段有所减缓，尤其是在

表 3 FLO-2D 模拟中的基础参数设置

Table 3 Basic parameter settings for the FLO-2D modeling

屈服应力		粘性系数		层流阻力系数	沉积物密度(kg/m^3)	曼宁系数	体积浓度
α_1	β_1	α_2	β_2				
0.811	10.72	0.003 62	10.24	2 260	2.5×10^3	0.1(沟床) 0.07(沟口)	0.45

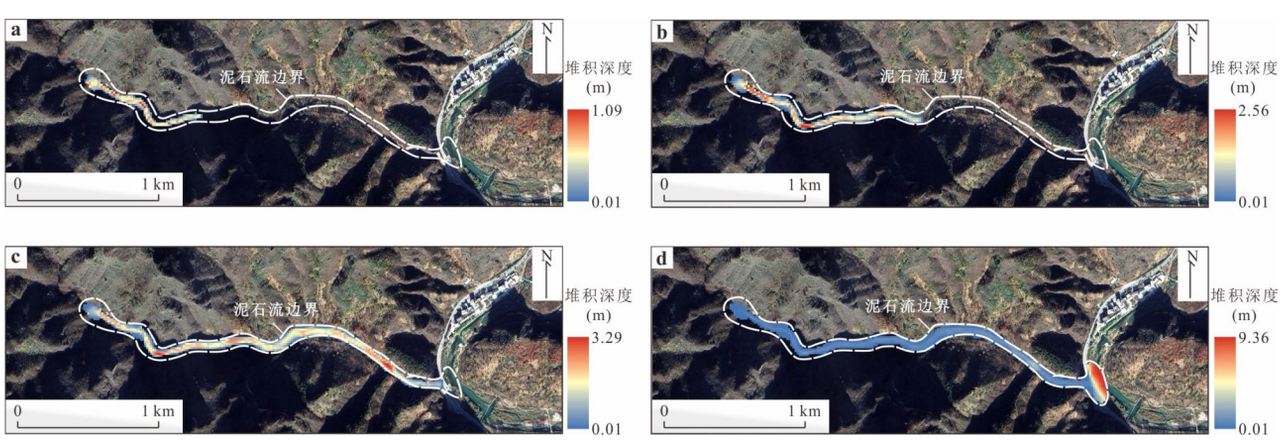

图 9 不同时刻泥石流深度分布

Fig.9 Distribution of debris flow depth at different times

a.T=9 min; b.T=18 min; c.T=24 min; d.T=30 min

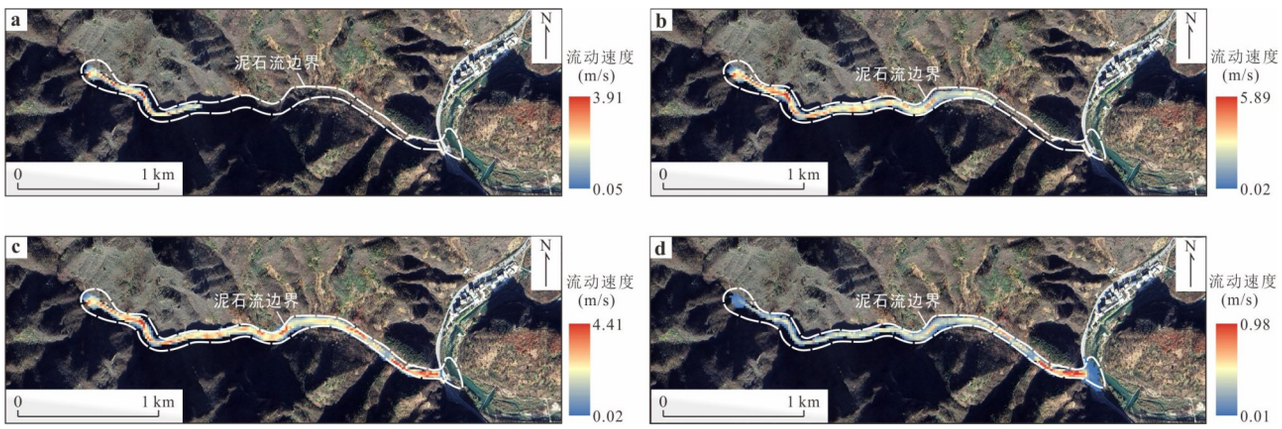

图 10　不同时刻泥石流速度分布

Fig.10　Distribution of debris flow velocity at different times

a.T=9 min;b.T=18 min;c.T=24 min;d.T=30 min

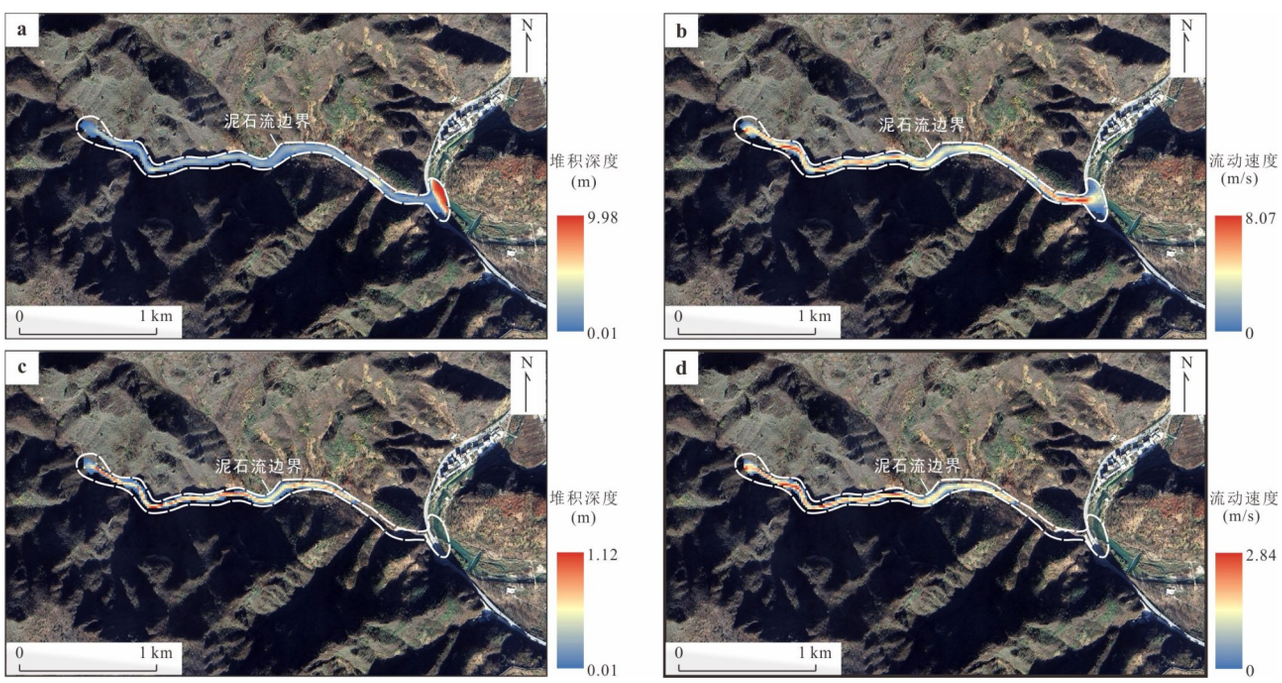

图 11　不同清水流量下泥石流最大深度和最大流速分布

Fig.11　Distribution of maximum flow depth and maximum flow velocity for the debris flow under different discharges

a～b.使用修正后的流量进行计算的结果;c～d.使用未修正的流量进行计算的结果

转弯处和坡度较缓区域.在 T=24 min时,泥石流冲出沟口进入较为平坦的堆积区,堆积厚度增加到3.29 m,但是流速却比上一阶段呈现下降趋势.这表明此时泥石流的动能衰减并已逐步转化为堆积.在 T=30 min时,堆积扇已明显形成,堆积扇前缘的堆积厚度达9.36 m,而整个沟道内的流速均小于1 m/s,表明此时泥石流的动能几乎消失,沉积过程占据主导地位.

由整个运动过程中的最大速度和最大深度(图11a～11b)可以发现,堆积过程具有显著的分区特征,在扇形堆积区的堆积物深度要明显大于沟道中的堆积,前者堆积深度可达9.98 m,而后者深度一般不超过4 m.这主要是因为公路处是明显的平缓地带,加之原有的防护工程具有一定的阻挡作用,因此泥石流全部在此沉积,现场调查显示沟口堆积物的高度约为10 m(图2),与模拟结果吻合较好.而最大流速的模拟结果显示,泥石流主要在两个区段速度较快,一是整个沟道的上游部分,二是在沟口

表4 不同泥石流危险性评估指标的分级阈值

Table 4 The classification thresholds for different indicators of debris flow hazard assessment

指标(单位)	危险性分级			阈值确定依据
	低危险性	中危险性	高危险性	
hv(m²/s)	<0.5	[0.5, 2.5]	>2.5	Ding *et al.*(2023); Guo *et al.*(2024)
hv^2(m³/s²)	<1.5	[1.5, 8.9]	>8.9	Koo *et al.*(2017); Prieto *et al.*(2018)
F(kN)	<7	[7, 12]	>12	Kim *et al.*(2020); Zhang *et al.*(2023)

表5 流深—流速决策矩阵及其分类阈值组合

Table 5 The flow depth-flow velocity decision matrix and the combinations of classification thresholds

	低(v<1.0 m/s)	中(1.0 m/s≤v≤3.0 m/s)	高(v>3.0 m/s)
低(h<0.5 m)	低风险	低风险	中风险
中(0.5 m≤h≤1.0 m)	低风险	中风险	高风险
高(h>1.0 m)	中风险	高风险	高风险

上方位置,这两段均具有较陡峭的地形.而使用未调整的流量进行模拟的结果则显示出明显不同(图11c~11d),无论最大流速还是流深都小于前述结果,且与实际情况差距较大,再次印证了本文所提出方法能较好揭示白蛇谷泥石流的运动特征.

3 基于场景的泥石流危险性评估

3.1 危险性评估指标

基于上述数值模拟结果开展白蛇谷泥石流危险性评估及区划,共考虑了流深—流速乘积(hv)、流速平方—流深乘积(hv^2)、冲击力(F)以及流速—流深决策矩阵4种指标.虽然上述指标都已在之前研究中使用过,但尚未提出统一标准用于确定泥石流危险性评估指标,特别是针对不同指标得到的危险性空间分布并未进行过系统对比.因此,本研究使用多种指标对比了各自生成的危险性分区图,旨在揭示此步骤中产生的不确定性并为相关研究提供参考.

hv(单位:m²/s²)是常见的危险性评估指标,速度在一定程度上能够表征固液两项混合体的冲击能量,而堆积深度会显著影响承灾体的抗灾能力(如人和房屋是否会被掩埋)(Ding *et al.*, 2023; Guo*et al.*, 2024);hv^2(单位:m³/s²)在流体力学中可以表示动量通量,在hv的基础上,hv^2通过引入流速的平方项强化了高速流动条件下泥石流速度对泥石流冲击动能的控制作用,从而更加突出流速变化对泥石流破坏力的影响(Koo *et al.*, 2017; Prieto *et al.*, 2018);F是反映泥石流对承灾体产生直接破坏的重要动力学参数;决策矩阵虽然更偏向于定性指标,但强调了多因子叠加的综合判定过程,因此已被广泛用于泥石流危险性评估(Kim *et al.*, 2020).随后,通过文献调研及对比,确定了上述指标用于区分不同危险性等级的阈值(表4)以及决策矩阵的阈值组合(Hürlimann *et al.*, 2006; Ali Khan *et al.*, 2022)(表5).

3.2 危险性分区及对比

hv、hv^2和F属于连续型指标,所得到的计算结果如图12所示.可以发现即使在未进行分类之前,三者的空间分布也具有较大差异.hv的最大值主要分布在沟口堆积区,而物源区和沟道内部值明显较小.冲击力的结果与其正好相反,最大值主要分布在沟道中以及沟口上方的区段,在沟口处的冲击力很小,主要是因为此处的冲击速度很小,明显降低了F值.hv^2获得的分布结果介于二者之间,在堆积区具有较高值,但是面积要小于hv的结果,但它同样在物源区附近的值大于流通区.

随后,使用阈值条件分类获得了最终的泥石流危险性分区.从图13可发现,hv指标划定的低危险区占比最大(54.8%),其次是中危险区(31.5%).高危险区仅占13.8%,主要出现在堆积扇前部.hv^2指标判定的高危险区面积为32.7%,中危险区和低危险区分别占30.2%和37.1%.高危险区主要集中在沟谷上游狭窄陡坡段及堆积区的中心部分,与现场调查中泥石流冲蚀强烈和物源堆积活跃的地段吻合较好.冲击力的划分结果显示高危险区占比12.7%,主要集中于沟道出口还未到堆积扇的部位,这与现场景区道路等设施位置较为接近.但是其在扇形堆积区的覆盖范围十分有限,导致该区域大部分被划分为低危险性,这与泥石流灾害防控的工程

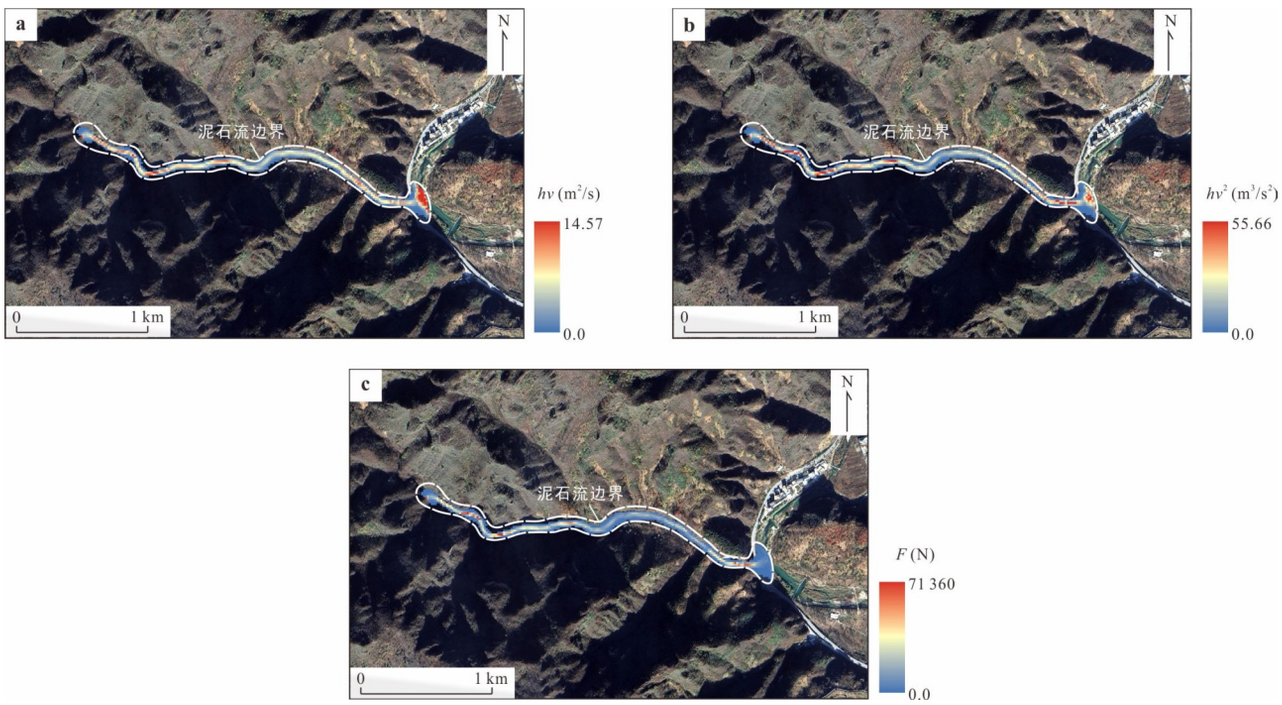

图 12　不同指标分布

Fig.12　Distribution of different indicators

a. hv; b. hv^2; c. F

实践并不相符.基于决策矩阵分区结果的最显著特征是高危险区显著增大,占比高达57.9%,中危险区和低危险区分别为14.7%和27.4%.显然,高危险区分布过于宽泛,几乎覆盖了整个主沟道与堆积区,存在过度预警的可能.这主要是因为在数值模拟结果中,相近区域中的速度和深度计算结果也类似,在矩阵中很容易被归类为同一危险性等级,导致结果的"空间分辨率"(此处指相近栅格的等级区分是否明显)有限,管理部门难以做出有效决策.

因此,从危险性等级的空间区分度以及与实际情况的对比等方面综合来看,基于冲击力和决策矩阵的分区分别代表着偏向"保守"和"激进"的结果,而基于hv和hv^2的结果更为合理.尤其是考虑到堆积区的等级分布,二者的结果捕捉到了不同等级的明显区分,即最中间区段往往代表着最危险的地点,越靠近边界的地点应越安全,这与工程实践以及前人研究中得到的典型泥石流危险性分区图相一致.

3.3　不同降雨条件下的泥石流危险性响应

为了揭示泥石流危险性对不同指标的响应情况,分别分析了3种指标(Pe、土壤饱和度S、沟道内地表径流峰值Q)下白蛇谷泥石流运动特征的变化规律.基于3.2节的讨论结果,选择了2种指标表征泥石流运动特征和危险性程度,即沟口处的堆积深度h和hv^2.Pa设置为0.1, 0.2, 0.3 mm/d,Pe的取值为20, 40, 60, 80, 100 mm,这些值能覆盖研究区可能出现的绝大多数降雨水平.土壤饱和度和地表径流值从FSLAM模型中计算得到,泥石流的运动模拟与2.3节所述一致.

结果表明(图14)在不同Pa情景下,泥石流堆积深度随3个指标的增加均呈明显的上升趋势,且表现为近似线性的正相关关系.h对Pe和Q的响应敏感性程度类似,但是均低于对土壤饱和度的敏感性(曲线斜率).另一个重要特点是当短期降雨量和地表径流值较小时,堆积深度的响应变化并不明显,但是土壤饱和度即使较小也能清晰地表征堆积深度的变化.当将hv^2作为分析指标时,随着Pe、S与Q的增加,hv^2呈指数型增长,且Pa越大曲线增长越快.由此可见,前期降雨条件不仅影响地表含水与物源饱和状态,还会影响后期短历时降雨对泥石流的放大效应.这可以理解为当Pa增大,流域内土体含水率越高,渗透系数降低,地表径流的形成也会更快,从而使泥石流的动态响应更加敏感.此外与堆积深度类似的一点是,较小的Pe和Q同样会导致

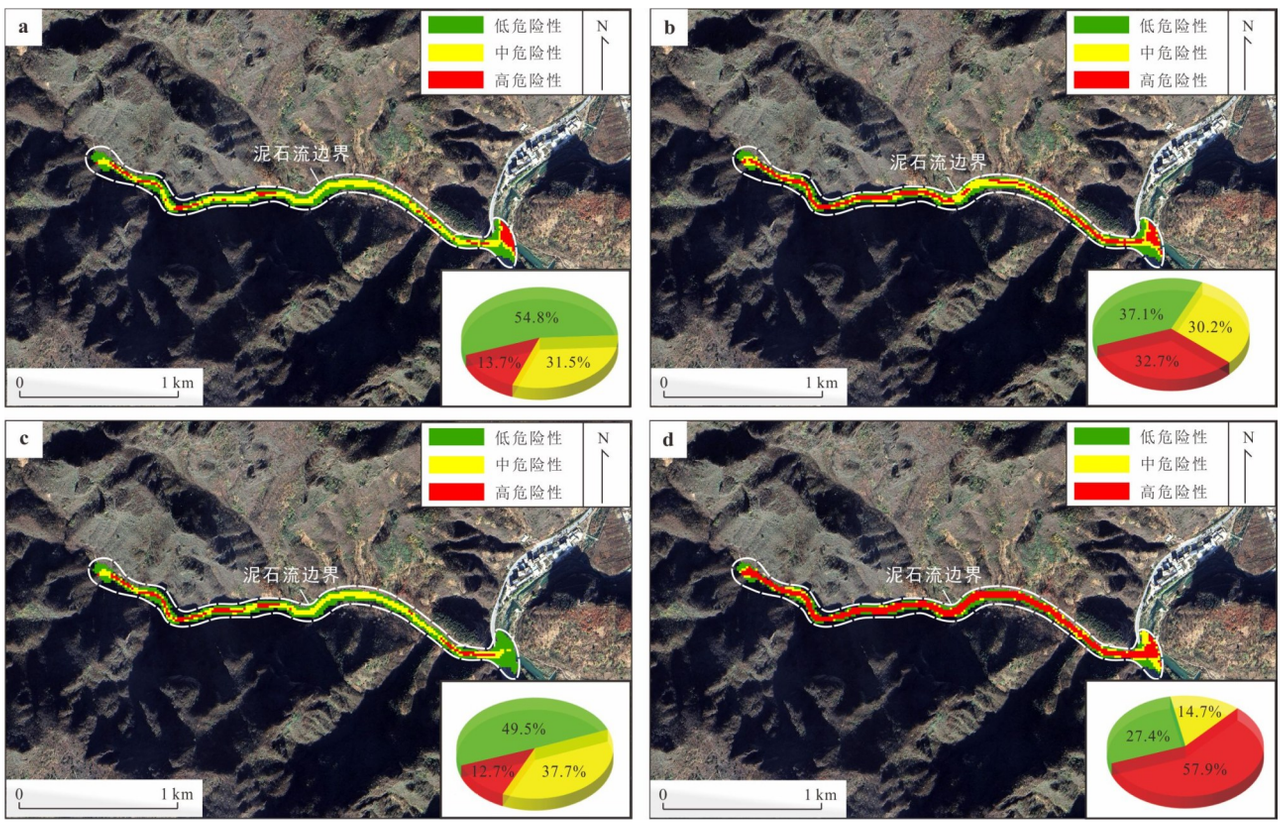

图 13 不同指标下泥石流危险性分区结果对比

Fig.13 Comparison of debris flow hazard zonation by using various indicators

a. hv;b. hv^2;c. F;d. h-v决策矩阵

相似的危险性值,而土壤饱和度仍然是更好的预测指标.

上述分析结果为泥石流的监测预警提供了重要参考:泥石流危险性评估的最终目的是能开展主动预警并提前告知受威胁居民何时以及何地会具有较大风险.当前的工程实践可能更倾向于将降雨指标监测用于预警,但是本研究发现泥石流危险性对不同指标的响应具有边际效应,使用降雨参数作为监测指标的做法可能导致较小降雨条件下的误差.相比之下,土壤饱和度与泥石流发生后的运动学指标具有更好的对应关系,因此选择它作为监测指标更加合理.这样的分析是对前述危险性评估方法和分级指标的进一步延伸,能够为后续的预警及防治提供支撑.

4 结论

(1)以 2024 年天津市蓟州区白蛇谷泥石流为例,基于 FSLAM 模型确定了不同前期降雨(Pa)条件下的短期临界降雨(Pe),并拟合得到了对应 4 个预警等级的 Pa-Pe 降雨阈值曲线.结果表明 Pa 与 Pe 呈线性负相关关系(相关性 $R^2 \geqslant 0.92$),当 Pa 由 0.1 mm/d 增大到 0.5 mm/d,诱发物源区破坏的 Pe 阈值降低为原来的一半左右,因此开展强降雨诱发的小流域泥石流气象预警研究必须要考虑前期降雨的作用.

(2)通过泥石流现场特征对地表径流峰值进行调整,并作为 FLO-2D 模型中的清水流量进行白蛇谷泥石流的运动过程模拟.结果显示泥石流运动时间约为 30 min,在沟口附近位置达到最大速度 8.07 m/s,堆积深度在扇形堆积区达到最大 9.98 m,结果与现场调查情况相吻合,表明该方法能够为小流域泥石流的运动模拟提供有效技术参考.

(3)从数值模拟结果中得到 4 种不同指标用于开展泥石流危险性评估,结果表明基于冲击力和 h-v 决策矩阵的危险性区划分别偏向“保守”和“激进”,而基于 hv 和 hv^2 的分区结果更加合理.进一步分析了危险性指标与不同变量的响应关系,发现 h

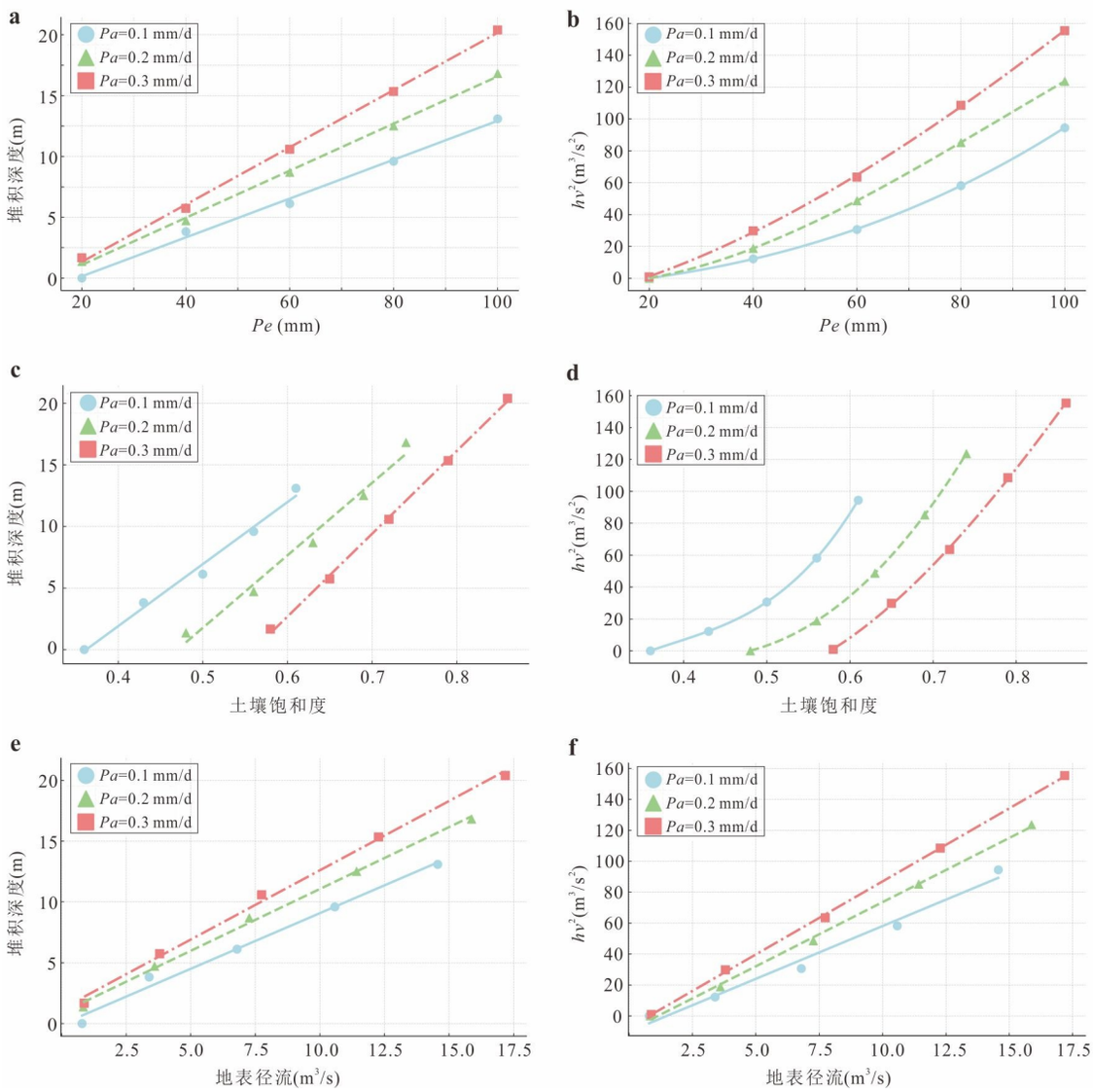

图 14　不同降雨工况下泥石流危险性与监测指标响应关系

Fig.14　Response relationships between various monitoring indicators and debris flow hazard under different rainfall conditions

和 hv^2 对于短期强降雨 Pe、土壤饱和度 S 和地表径流值 Q 的响应均较为明显,但是在 Pe 和 Q 较小时所呈现的敏感程度要低于对 S 的响应,因此后者可能在实际的监测预警中更具参考价值.

References

Aleotti, P., 2004. A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failures. *Engineering Geology*, 73(3/4): 247−265. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007

Ali Khan, M., Mustaffa, Z., Harahap, I. S. H., et al., 2022. Assessment of Physical Vulnerability and Uncertainties for Debris Flow Hazard: A Review Concerning Climate Change. *Land*, 11(12): 2240. https://doi.org/10.3390/land11122240

Caine, N., 1980. The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler*, 62: 23−27.

Camilo, D. C., Lombardo, L., Mai, P. M., et al., 2017. Handling High Predictor Dimensionality in Slope-Unit-Based Landslide Susceptibility Models through LASSO-Penalized Generalized Linear Model. *Environmental Modelling & Software*, 97: 145−156. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.08.003

Cannon, S. H., Boldt, E. M., Laber, J. L., et al., 2011. Rainfall Intensity-Duration Thresholds for Postfire Debris-Flow Emergency-Response Planning. *Natural Hazards*, 59(1): 209−236. https://doi. org/10.1007/

s11069-011-9747-2

Chang, M., Tang, C., Van Asch, T. W. J., et al., 2017. Hazard Assessment of Debris Flows in the Wenchuan Earthquake-Stricken Area, South West China. *Landslides*, 14(5): 1783－1792. https://doi. org/10.1007/s10346-017-0824-9

Cheon, E., Lee, S. R., Lee, D. H., 2020. Hazard Assessment Based on the Combination of DAN3D and Machine Learning Method for Planning Closed-Type Barriers against Debris-Flow. *Water*, 12(1): 170. https://doi.org/10.3390/w12010170

Ding, X. Y., Hu, W. J., Liu, F., et al., 2023. Risk Assessment of Debris Flow Disaster in Mountainous Area of Northern Yunnan Province Based on FLO-2D under the Influence of Extreme Rainfall. *Frontiers in Environmental Science*, 11: 1252206. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1252206

Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., García-Sánchez, E., et al., 2021. An Assessment of Groundwater Recharge at a Regional Scale for Sustainable Resource Management: Province of Alicante (SE Spain). *Water*, 13(6): 862. https://doi.org/10.3390/w13060862

Guo, Y. T., Feng, Z., Wang, L. C., et al., 2024. Hazard Assessment of Debris Flow: A Case Study of the Huiyazi Debris Flow. *Water*, 16(10): 1349. https://doi.org/10.3390/w16101349

Guo, Z. Z., Chen, L. X., Yin, K. L., et al., 2020a. Quantitative Risk Assessment of Slow-Moving Landslides from the Viewpoint of Decision-Making: A Case Study of the Three Gorges Reservoir in China. *Engineering Geology*, 273: 105667. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2020.105667

Guo, Z. Z., Chen, L. X., Gui, L., et al., 2020b. Landslide Displacement Prediction Based on Variational Mode Decomposition and WA-GWO-BP Model. *Landslides*, 17(3): 567－583. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01314-4

Guo, Z. Z., Cheng, M. C., Wang, Y. G., et al., 2025. Landslide Hazard Prediction under an Extreme Rainfall Scenario by Considering Multiple Timescale Rainfalls and Effective Recharge. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 19(4): 775－803. https://doi. org/10.1080/17499518.2025.2570863

Guo, Z. Z., He, J., Huang, D., et al., 2023. Fast Assessment Model for Rainfall-Induced Shallow Landslide Hazard and Application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(5): 1188－1201 (in Chinese with English abstract).

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et al., 2007. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3): 239－267. https://doi. org/10.1007/s00703-007-0262-7

Huang, F. M., Zhang, Y. L., Guo, Z. Z., et al., 2024.. Effects of Different Classification Methods on Regional Landslide Susceptibility Zonation. *Advanced Engineering Sciences*, 56(1): 148－159 (in Chinese with English abstract).

Huang, Z. Y., Yeh, P. J., Jiao, J. J., et al., 2023. A New Approach for Assessing Groundwater Recharge by Combining GRACE and Baseflow with Case Studies in Karst Areas of Southwest China. *Water Resources Research*, 59(2): e2022WR032091. https://doi. org/10.1029/2022wr032091

Hürlimann, M., Copons, R., Altimir, J., 2006. Detailed Debris Flow Hazard Assessment in Andorra: A Multidisciplinary Approach. *Geomorphology*, 78(3－4): 359－372. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.02.003

Hürlimann, M., Guo, Z. Z., Puig-Polo, C., et al., 2022. Impacts of Future Climate and Land Cover Changes on Landslide Susceptibility: Regional Scale Modelling in the Val d'Aran Region (Pyrenees, Spain). *Landslides*, 19(1): 99－118. https://doi. org/10.1007/s10346-021-01775-6

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., et al., 2008. Evaluation of Approaches to Calculate Debris-Flow Parameters for Hazard Assessment. *Engineering Geology*, 102(3－4): 152－163. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2008.03.012

Kim, M. I., Kwak, J. H., 2020. Assessment of Building Vulnerability with Varying Distances from Outlet Considering Impact Force of Debris Flow and Building Resistance. *Water*, 12(7): 2021. https://doi. org/10.3390/w12072021

Kim, S. W., Chun, K. W., Kim, M., et al., 2021. Effect of Antecedent Rainfall Conditions and Their Variations on Shallow Landslide-Triggering Rainfall Thresholds in South Korea. *Landslides*, 18(2): 569－582. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01505-4

Koo, R. C. H., Kwan, J. S. H., Ng, C. W. W., et al., 2017. Velocity Attenuation of Debris Flows and a New

Momentum-Based Load Model for Rigid Barriers. *Landslides*, 14(2): 617－629. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0715-5

Li, Y. J., Wang, M. Y., Ma, F. K., et al., 2024. Constructing Rainfall Threshold for Debris Flows of a Defined Hazardous Magnitude. *Remote Sensing*, 16(7): 1265. https://doi.org/10.3390/rs16071265

Liu, S. H., Du, J., Yin, K. L., et al., 2024. Regional Early Warning Model for Rainfall Induced Landslide Based on Slope Unit in Chongqing, China. *Engineering Geology*, 333: 107464. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2024.107464

Long, K., Zhang, S. J., Wei, F. Q., et al., 2020. A Hydrology-Process Based Method for Correlating Debris Flow Density to Rainfall Parameters and Its Application on Debris Flow Prediction. *Journal of Hydrology*, 589: 125124. https://doi. org/10.1016/j. jhydrol.2020.125124

Mishra, S. K., Singh, V. P., 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Springer Netherlands, Dordrecht. https://doi. org/10.1007/978-94-017-0147-1

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., 1994. A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153－1171. https://doi.org/10.1029/93wr02979

O'Brien, J. S., Julien, P. Y., Fullerton, W. T., 1993. Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2): 244－261. https://doi. org/10.1061/(asce)0733-9429(1993)119:2(244)

O'Brien, J.S., 2011. FLO-2D Users Manual. FLO-2D Software, Inc.: Nutrioso, AZ, USA.

Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., et al., 1998. The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. In Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 21－25 September 1998, Vol.2: Engineering Geology and Natural Hazards, 1157－1166.

Prieto, J. A., Journeay, M., Acevedo, A. B., et al., 2018. Development of Structural Debris Flow Fragility Curves (Debris Flow Buildings Resistance) Using Momentum Flux Rate as a Hazard Parameter. *Engineering Geology*, 239: 144－157. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2018.03.014

Serrano-Juan, A., Criollo, R., Vázquez-Suñé, E., et al., 2020. Customization, Extension and Reuse of Outdated Hydrogeological Software. *Geologica Acta*, 18: 1－11. https://doi.org/10.1344/geologicaacta2020.18.9

Tang, H., McGuire, L. A., Rengers, F. K., et al., 2019. Developing and Testing Physically Based Triggering Thresholds for Runoff-Generated Debris Flows. *Geophysical Research Letters*, 46(15): 8830－8839. https://doi.org/10.1029/2019gl083623

USDA (United States Department of Agriculture), 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. National Resources Conservation Service, Washington DC.

USDA (United States Department of Agriculture), 2004. National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes. Natural Resources Conservation Service, Washington DC.

Wang, T. F., Yin, K. L., Li, Y. Y., et al., 2024. Physical Vulnerability Curve Construction and Quantitative Risk Assessment of a Typhoon-Triggered Debris Flow *via* Numerical Simulation: A Case Study of Zhejiang Province, SE China. *Landslides*, 21(6): 1333－1352. https://doi.org/10.1007/s10346-024-02218-8

Wei, Z. L., Shang, Y. Q., Liang, Q. H., et al., 2024. A Coupled Hydrological and Hydrodynamic Modeling Approach for Estimating Rainfall Thresholds of Debris-Flow Occurrence. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(10): 3357－3379. https://doi.org/10.5194/nhess-24-3357-2024

Wu, Q. H., Wang, G. L., Zhang, W., et al., 2016. Estimation of Groundwater Recharge Using Tracers and Numerical Modeling in the North China Plain. *Water*, 8(8): 353. https://doi.org/10.3390/w8080353

Wu, Y. H., Liu, K. F., Chen, Y. C., 2013. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the Application of Assessment of Granular Debris Flow Hazards with Case Study. *Journal of Mountain Science*, 10(2): 293－304. https://doi.org/10.1007/s11629-013-2511-1

Zeng, P., Chen, J. L., Chang, M., et al., 2025. Uncertainty Characterization, Propagation, and Evaluation in Debris Flow Run-out Hazard Assessment. *Landslides*, 22(4): 1275－1290. https://doi. org/10.1007/s10346-024-02423-5

Zhang, P., Liu, X. R., Shu, H. P., 2023. Hazard Assessment of Debris Flow by Using FLO-2D and Hazard Matrix: A Case Study of Qingshui Gully in the Southern Gansu Province, China. *Desalination and Water Treat-*

ment, 315: 650－662. https://doi. org/10.5004/dwt.2023.30108

Zhang, S. L., Guo, X. J., Li, Y., 2025. Uncertainty and Optimization of Statistical Model for Rainfall-Triggered Debris Flow Forecast. *Mountain Research*, 43(3): 438－452 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Li, Y. J., Zheng, J. Y., et al., 2025. A New Rainfall Intensity - Duration Threshold Curve for Debris Flows Using Comprehensive Rainfall Intensity. *Engineering Geology*, 347: 107949. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2025.107949

Zhuang, J. Q., Cui, P., Wang, G. H., et al., 2015. Rainfall Thresholds for the Occurrence of Debris Flows in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China. *Engineering Geology*, 195: 335－346. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2015.06.006

中文参考文献

郭子正，何俊，黄达，等，2023. 降雨诱发浅层滑坡危险性的快速评估模型及应用. 岩石力学与工程学报，42(5): 1188－1201.

黄发明，张鉴琅，郭子正，等，2024. 不同分级方法对区域滑坡易发性区划的影响. 工程科学与技术，56(1): 148－159.

张思玲，郭晓军，李泳，2025. 统计模型在降雨型泥石流预报中的不确定性及优化. 山地学报，43(3): 438－452.

****

《地球科学》

2026年11月 第51卷 第11期 要目预告

超级层系：近源－源内油气运聚系统……杨 智等
基于数字露头实景三维模型的沉积古流向分析方法……陈建华等
泸定地震前后鲜水河断裂带磨西段滑动速率及活动性演化特征……王海洋等
鄂尔多斯盆地(陕西段)深部咸水层二氧化碳地质封存潜力禀赋与靶区选择……周 阳等
背景噪声成像揭示巴颜喀拉块体浅层地壳S波速度结构……周 铭等
巴颜喀拉地块内部五道梁－长沙贡玛断裂晚第四纪活动速率……王 越等
龙门山－鲜水河断裂带地震要素智能识别探索及启示……谷洪彪等
基于断层精细几何的三维非均匀黏弹性有限元模拟……杨艺璇等