

白龙江流域溃决型泥石流灾变过程

张宁, 常鸣, 李宏杰, 周康驰, 尹道龙, 刘洋

(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: [目的] 揭示白龙江流域溃决型泥石流的演化机理, 阐明其灾变过程, 为溃决型泥石流预警和防治提供技术支撑。[方法] 以甘肃省陇南市汉王镇甘家沟为研究区, 通过室内遥感解译与野外实地考察, 获取物源、地形与降雨特征, 结合区域地质构造、地震活动等成灾条件, 系统分析溃决型泥石流的运动特征, 并结合数值仿真平台 OpenLISEM, 对主沟、支沟及级联溃决 3 种溃决模式进行模拟与对比分析。[结果] ① 甘家沟物源丰富, 存在大量崩滑体, 主要触发因素为暴雨, 崩滑体堵塞沟道后极易形成溃决型泥石流。② 溃决型泥石流演化过程可分为“崩滑体失稳—沟道堵塞—堰塞坝形成与溃决—流量放大致灾”4 个阶段, 其灾变过程是重力势能快速转化为动能与流体整体冲压力的耦合作用结果。③ 模拟结果显示, 主沟溃决型泥石流冲出距离达 1 342.06 m, 堆积面积 1.38 km², 最大堆积厚度达 21.64 m, 轻微堵塞白龙江; 支沟溃决型泥石流规模相对较小, 堆积面积 1.03 km², 最大堆积厚度 15.37 m, 未对白龙江造成堵塞; 级联溃决型泥石流规模最大, 冲出距离 1 365.64 m, 堆积面积 1.92 km², 最大堆积厚度 28.2 m, 严重堵塞白龙江并形成堰塞湖, 有极大可能产生溃决洪水, 对下游居民区构成严重威胁。[结论] ① 甘家沟具备陡峻地形、物源丰富、降雨集中和地震频繁等不利条件, 是溃决型泥石流高发区。② 溃决型泥石流普遍经历堵塞—蓄水—溃决阶段, 灾害破坏力显著高于一般暴雨型泥石流。③ 不同溃决模式在规模、堆积范围及危害程度上存在差异, 其中级联溃决风险最大。

关键词: 级联溃决型泥石流; 灾变机理; 数值仿真; 堰塞体; 白龙江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0403-11

中图分类号: P642.23

文献参数: 张宁, 常鸣, 李宏杰, 等. 白龙江流域溃决型泥石流灾变过程[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 403-413. Zhang Ning, Chang Ming, Li Hongjie, et al. Catastrophic processes of dam-break debris flows in Bailong River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 403-413.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.025

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.025

Catastrophic processes of dam-break debris flows in Bailong River basin

Zhang Ning, Chang Ming, Li Hongjie, Zhou Kangchi, Yin Daolong, Liu Yang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The evolution mechanism and catastrophic process of dam-break debris flows in the Bailong River basin were investigated in order to provide technical support for their early warning and prevention. [Methods] Ganjia gully in Hanwang Town, Longnan City was selected as the study area. Characteristics of source materials, topography, and rainfall were obtained through indoor remote sensing interpretation and field investigation. Combined with disaster-forming conditions such as regional geological structures and seismic activity, the movement characteristics of dam-break debris flows were systematically analyzed. Furthermore, three dam-break modes, including main gully, branch gully, and cascading dam-break, were simulated and comparatively analyzed using the numerical simulation platform OpenLISEM. [Results] ① The Ganjia gully watershed had abundant source materials and numerous collapse-slide masses, with rainstorms being the main

收稿日期: 2025-08-10

修回日期: 2025-10-22

采用日期: 2025-10-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“强震区泥石流服役拦砂坝损伤机制与减灾效果评价方法研究”(42477173); 成都理工大学珠峰科学研究计划 2.0 交叉项目; 四川省中央引导地方科技发展专项项目(自由探索类基础研究)(2024ZYD0121); 中国长江电力股份有限公司科研项目(AH2025-0221)

第一作者: 张宁(2001—), 男(汉族), 海南省文昌市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害定量风险评价。Email: zhangning@stu.cdut.edu.cn。

通信作者: 常鸣(1985—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 教授, 主要从事泥石流灾害演化特征与动力致灾方面的研究。Email: changmxq@126.com。

triggering factor. These masses were prone to forming dam-break debris flows after blocking the channel. ② The evolution process of dam-break debris flows was divided into four stages: collapse-slide mass instability-channel blockage-landslide dam formation and breach-discharge amplification causing disaster. The catastrophic process involved the coupling of rapid conversion of gravitational potential energy into kinetic energy and the overall fluid impact pressure. ③ The simulation results showed that the main gully dam-break debris flow had a runout distance of 1 342.06 m, a deposition area of 1.38 km², and a maximum deposition thickness of 21.64 m, slightly blocking the Bailong River. The branch gully dam-break debris flow was relatively smaller in scale, with a deposition area of 1.03 km² and a maximum deposition thickness of 15.37 m, causing no blockage to the Bailong River. The cascading dam-break debris flow was the largest in scale, with a runout distance of 1 365.64 m, a deposition area of 1.92 km², and a maximum deposition thickness of 28.2 m, severely blocking the Bailong River and forming a barrier lake, which was highly likely to trigger an outburst flood and posed a serious threat to downstream residential areas. [Conclusions] ① Ganjia gully possesses unfavorable conditions, including steep terrain, abundant source materials, concentrated rainfall, and frequent seismic activity, making it a high-incidence area for dam-break debris flows. ② Dam-break debris flows generally undergo the blockage—impoundment—outburst stages, and their destructive power is significantly higher than that of general rainstorm-induced debris flows. ③ Different dam-break modes vary in scale, deposition range, and hazard severity, among which the cascading dam-break presents the greatest risk.

Keywords: cascading dam-break debris flow; catastrophe mechanism; numerical simulation; landslide dam; Bailong River basin

白龙江流域处于青藏高原东部边缘、黄土高原西南部以及四川盆地北缘的交汇区域,处于中国南北与东西地震带的交汇点。该区新构造作用显著,导致峡谷切割深刻,地质构造复杂,活动断裂发育明显。区域内软弱岩土体广泛分布,加之降雨集中,人类活动频繁,使得地质环境极为脆弱敏感^[1-2]。受此影响,该区地质灾害高发且规模大,具有“群发性、突发性、隐蔽性和叠加性”的特征,其中泥石流成为较典型的次生地质灾害^[3]。其中基于流量放大的级联溃决型泥石流是较为典型的一类泥石流。震后该类型泥石流沟道中含有一个或多个堰塞体,一旦失稳将会引发流量放大效应,造成的风险远高于一般的泥石流灾害^[4-5]。如 2010 年“8·8”舟曲特大泥石流堵江灾害中,降雨径流携带沟道内大量物质向下游运动形成泥石流,途中又冲毁 9 道拦沙坝并造成大量堰塞坝溃决,形成级联溃决型泥石流,最后堵塞白龙江形成堰塞湖^[6]。

近年关于堰塞体溃坝的研究,各国学者主要聚焦于两大方向:一是堰塞体的基本特征及其失稳过程^[7-9];二是堰塞体稳定性的预测分析^[10-12]。当多个崩滑体沿泥石流沟道分布时,极易引发级联溃决现象^[13-14],且不同级联堰塞体溃决后所形成的泥石流,表现出典型的流量放大特征^[15]。通过室内试验得知,在堰塞体失稳模式中以漫顶破坏为主要类型,此外,管涌作用与侵蚀作用也能在一定程度上诱发堰塞体失稳^[16]。

随着计算机技术应用增多,研究人员开发了众多模拟泥石流的技术,如 FLO-2D, Massflow 等^[17], RAMMS 等^[18]。目前国内主流的数值模拟软件的模型往往仅针对流体运动阶段进行模拟,难以实现从降雨入渗、坡体失稳到物质输移堆积的全过程耦合分析,但在溃决型泥石流数值模拟上,需要从物源起动—堵塞沟道—溃决全过程链条进行考虑。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,将降雨、径流、泥石流启动、侵蚀、运移和堆积等多重过程耦合集成^[19-21],弥补传统模拟方法缺陷,为溃决型泥石流预警和防治提供更全面的技术支撑。因此,本文以白龙江流域典型泥石流流域甘家沟为研究对象,通过室内遥感解译与野外实地调查,分析级联溃决型泥石流的孕灾背景和成灾机理,结合 OpenLISEM 数值平台对不同溃决型泥石流的动力演进全过程进行反演,以期显著提高级联溃决型泥石流的防灾减灾能力。

1 研究区概况

研究区所在的汉王镇位于陇南市武都区东南部,白龙江左岸,距离城区 13 km。东接郭河乡,南邻桔柑乡,西连城郊乡,北与龙凤乡相接。该地区交通便利,兰渝铁路、G75 武罐高速公路以及国道 212 线

穿越。工作区位于汉王镇北侧山区的甘家沟,地理坐标为北纬 $33^{\circ}20'53.41''$,东经 $105^{\circ}00'22.22''$ 。甘家沟拥有极佳的泥石流形成条件,流域内滑坡和崩塌现象普遍,坡积物和泥石流堆积物丰富,沟道地势陡峭,水流湍急,泥石流频繁,规模巨大。甘家沟位于南秦岭陇南山地中部,地形复杂,山高谷深,海拔 $960\sim 2\,292\text{ m}$,相对高差 $1\,332\text{ m}$,地貌类型包括构造侵蚀山区和河谷阶地。高中山区山顶平缓覆黄土,中低山区沟谷切割深,常见V形和U形谷地,滑坡、坍塌频发;白龙江及沟口阶地宽 $10\sim 450\text{ m}$,高 $1\sim 20\text{ m}$ 。区内年均降水 487.2 mm ,5—9月占全年 $75\%\sim 85\%$,7—8月暴雨频发,强度常超过 50 mm/d ,为泥石流活动提供充足水源。地层由志留系至第四系组成,前者岩石破碎、易风化,第四系沉积物广布,包括泥石流堆积物、重力堆积物、残坡积物及厚层黄土,均为泥石流提供丰富物源。区内构造受多期运动影响,形成复背斜、断层及褶皱,武都西部隆升超 $3\,500\text{ m}$,甘家沟切割深达 $1\,322\text{ m}$,沟口具多级阶地,新构造运动活跃,滑坡、崩塌与泥石流灾害频繁发生。甘家沟位于中国南北地震带中段,即天水至武都地震带,同时也受到附近的松潘至平武地震带的强烈影响,因此属于地震频发区域。这一地区的地震强度通常达到Ⅷ度,根据设计标准,基本地震加速度为 0.20 g 。自1975年以来,该地区的构造活动明显增加,发生了多次地震事件。1976年8月16日和8月20日的两次7.2级地震,1987年1月8日的迭部5.9级地震,1987年10月25日的礼县5.0级地震等。这些地震事件表明了该地区潜在的地震风险。此外,2008年5月12日的汶川地震也在该流域内引发了大量的滑坡、崩塌等地质灾害,同时导致了許多老滑坡的再次活化^[22-24]。这说明频繁发生的地震活动是甘家沟地质灾害发生的主要原因之一。

2 甘家沟溃决型泥石流成灾条件分析

2.1 地形条件

甘家沟总面积约为 43.63 km^2 ,主沟道长约 15.08 km ,平均纵沟比降为 72.9% 。流域内的相对高差相对较大,最高点海拔达 $2\,292\text{ m}$,而沟口海拔则为 960 m ,形成相对高差高达 $1\,332\text{ m}$ 。整个流域的纵向距离大约为 12.76 km ,横向距离约为 5.71 km 。山坡的平均坡度约为 25° ,山坡平均长度为 720 m 。甘家沟的地形呈倒葫芦形状,形成区流域面积约为 36.61 km^2 ,流通区面积为 5.29 km^2 ,堆积区面积约为 1.73 km^2 。形成区内分布有东西两条支沟,其流域面积分别为 21.25 和 15.36 km^2 。这两条支沟各自还分

布有3级支沟,总体呈现出深切的V形谷地貌,其中小冲沟深度一般介于 210 m 。流域内的两岸地形特点是陡峻,支沟发育,典型的中高山峡谷地貌。研究区山体坡度较大,区域内地形高差悬殊,整个沟谷为深切的V形谷地。

2.2 物源条件

选取Google Earth 2025年的遥感影像解译分析发现,甘家沟内各高程几乎均有物源分布(图1)。有沟道物源6处,面积为 0.569 km^2 ;松散堆积物1处,面积为 0.002 km^2 ;崩塌23处,面积为 0.516 km^2 ;滑坡82处,面积为 8.744 km^2 。在 $1\,900\text{ m}$ 高程以上分布有残坡积物、崩坡积物及潜在高位崩滑体;在 $1\,600\sim 1\,900\text{ m}$ 高程处的物源类型主要为分布较少崩滑物源和沟道内堆积物,但距沟口超过 $1\,000\text{ m}$,具有极高的重力势能,在地形等条件的影响下,这部分物源极易发生启动汇入沟道内,对沟道中游造成影响,可能形成泥石流;在 $1\,300\sim 1\,600\text{ m}$ 高程处分布的物源类型主要为崩滑物源、坡面物源、沟道内堆积物等,物源储量巨大,占到甘家沟总物源量的 40% 以上,同时受到地形及物源结构等影响,此范围内物源将成为泥石流活动的主要物源供给区(表1);在 $1\,000\sim 1\,300\text{ m}$ 高程处的物源主要为沟道内堆积物以及少量崩坡积物、滑坡、坡面堆积物、巨石等(表2)。该部分物源与沟口高差较小,重力势能较弱。一般情况下自身较难启动,多半是由上游泥石流裹挟下参与泥石流活动,威胁较小;在 $1\,000\text{ m}$ 及以下高程基本上不存在泥石流物源,不予考虑。

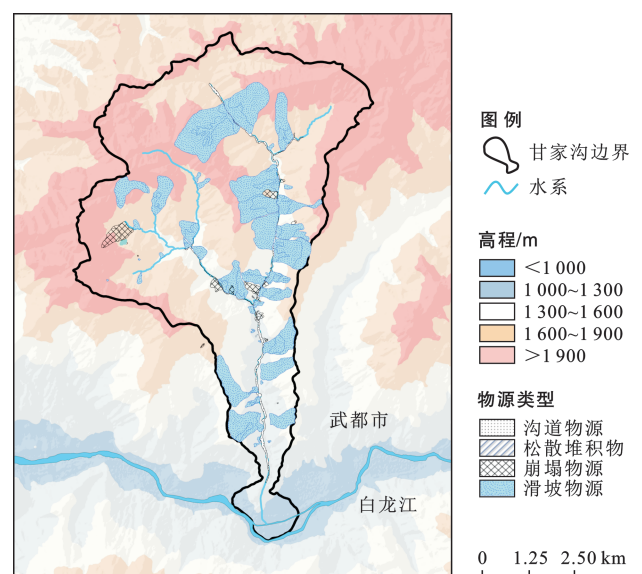


图1 甘家沟内不同高程物源分布(2025年遥感影像解译)
Fig.1 Distribution of source materials at different elevations in Ganjia gully (interpreted from remote sensing image in 2025)

2.3 水源条件

甘家沟泥石流属典型的暴雨型泥石流,降雨是区内泥石流形成的唯一水源和激发因素。甘家沟多年平均降水量 487.2 mm,5—9 月降水量占全年降水总量的 75%~85%。大雨发生在 5—9 月,1939 年以来,降水量为 25~50 mm/d 的大雨平均 2~3 次/a,暴

雨发生在 7—8 月,降水量大于 50~75 mm/d 的暴雨和降水量大于 75 mm/d 的大暴雨每 10 a 约有 23 次。甘家沟连续 24 h 最大降雨量 90.5 mm,1 h 最大降雨量 40.0 mm,10 min 最大降雨量 16.2 mm。集中式、高强度降水为泥石流的形成提供了充沛的水动力条件。

表 1 甘家沟内各高程物源分布统计结果

Table 1 Statistical results of source material distribution at different elevations in Ganjia gully

高程范围/m	物源类型	物源储量/ 10 ⁶ m ³	距沟口高 差/m	占总储量 比例/%
>1 900	残坡积物、崩坡积物及潜在高位崩滑体	48.01	>916	23.56
1 600~1 900	崩滑物源和沟道内堆积物	60.14	616~916	29.51
1 300~1 600	崩滑物源、坡面物源、沟道内堆积物等	87.26	316~616	42.82
1 000~1 300	沟道内堆积物以及少量崩坡积物、滑坡、坡面堆积物、巨石等	8.05	16~316	3.95
<1 000	崩滑物源	0.33	<16	0.16

表 2 甘家沟内各物源遥感解译统计结果

Table 2 Statistical results of remote sensing interpretation of source materials in Ganjia gully

物源类型	松散堆积物	滑坡物源	崩塌物源	沟道物源
面积/km ²	0.002	8.744	0.516	0.569

3 甘家沟级联溃决型泥石流灾变机理

3.1 崩滑体失稳下滑及堵溃模式分析

通过对甘家沟的现场调查发现,泥石流沟内地震和人类活动诱发的滑坡、崩塌等不良物理地质过程十分普遍,几乎在全流域沟道的两侧山体均发育有规模不同的崩滑体,部分因强震影响已发生整体失稳并堆积于沟道之中,另一部分则处于不稳定状态仅以悬挂形式分布于斜坡之上,当突降暴雨时此类崩滑体易失稳下滑进入沟道进而形成天然堵塞体,其溃决后易引发溃决型泥石流且因堵塞体的蓄能作用导致冲出量显著大于一般型的泥石流。这类泥石流具有冲出规模大,成灾快,破坏力强等特点,其导致的灾害损失严重程度要比一般的暴雨型泥石流大,严重影响下游人民的生命财产安全,若是泥石流物质冲入白龙江内,极易造成白龙江的堵塞,对白龙江下游造成更大威胁^[25]。结合甘家沟地质环境条件及强降雨诱发,其崩滑体失稳下滑与堵溃过程可

分为启动、加速、解体及堵沟 4 个阶段:暴雨入渗致坡体饱和软化、潜蚀削弱,后缘裂缝发育并进入累进破坏,最终沿潜在滑移面启动;滑体离床后在重力作用下快速加速,碰撞坡面并不断碎裂,挟卷松散物质,方量持续增大;在进入沟道时,崩滑体近于正交冲击对岸并攀爬,部分堆积扩散,部分反向弯折与后续滑体碰撞,速度骤降;由于沟道宽缓,碎屑在交汇处迅速淤积,形成堵沟堰塞体。由前文可知,崩滑体正交进入沟道后形成堰塞体,并因溢流侵蚀,渗流管涌或坝体滑动等作用很快溃决,诱发溃决型泥石流。其溃坝模式主要有 3 类:①漫顶破坏模式。常发生在坝体强度高,透水性差,上游来水大的条件下,因溢流冲刷逐渐扩大泄流槽,坝体缓慢破坏,洪峰小,历时长;②滑动破坏模式。多见于坝体透水性大,强度弱时,上游来水快致水位迅速上升,饱和坝体因浮力和渗流作用沿滑动面整体失稳,突然崩溃;③管涌破坏模式。当坝体透水性极大且强度低,来水量小,浸润线迅速到达下游坡面并产生管涌或坡脚冲刷,导致局部塌陷逐渐向上游扩展,最终整体溃决^[26]。

在对崩滑体进行现场勘查之后,甘家沟滑坡滑体物质主要为第四系残坡积层和滑坡堆积物。选取主沟与支沟交汇处附近的滑坡作为计算对象,利用传递系数法进行滑坡稳定性计算,计算公式为

$$K_f = \frac{\sum_{(i=1)}^{(n-1)} \left\{ \left[W_i (1 - r_u) \cos \alpha_i - A \sin \alpha_i \right] \operatorname{tg} \phi_i + C_i L_i \prod_{(j=i)}^{(n-1)} \psi_j \right\} + R_n}{\sum_{(i=1)}^{(n-1)} \left[\left(W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) \prod_{(j=i)}^{(n-1)} \psi_j \right) + T_n \right]} \quad (1)$$

式中: K_f 为稳定系数; ψ_j 为第 i 块的剩余下滑力传递至 $i+1$ 块时的传递系数 ($j=i$); L_i 为第 i 条块滑面长度 (m); W_i 为第 i 条块的重量 (kN); C_i 为第 i 条块内聚力 (kPa); φ_i 为第 i 条块内摩擦角 ($^\circ$); α_i 为第 i 条块滑面倾角 ($^\circ$); β_i 为第 i 条块地下水线与滑面的夹角 ($^\circ$); A 为地震加速度 (重力加速度 g)。

根据研究区实际情况, 该滑坡的发生主要由降雨和地震作用引起。通过现场调查得知滑坡体上裂缝发育, 有利于降雨形成的地表水的入渗, 水不仅使滑体土的重度增加且会降低滑带土的抗剪强度。本文考虑降低滑带土的 C 和 φ 值对暴雨工况进行计算, 具体参数由表 3 可知, 滑坡稳定性计算结果为 0.911, 为不稳定状态 (表 4)。在暴雨作用下, 滑坡稳定性系数大幅下降, 说明持续的强降雨引起的土体强度下降是滑坡失稳的重要原因。甘家沟堰塞体在强降雨

汇流与坝后水位迅速上升作用下, 孔隙水压力增加导致抗滑力急剧下降, 最先满足滑动破坏条件, 而漫顶与管涌条件未被触发。并且甘家沟堰塞坝主要由碎石土组成, 结构较松散, 岩体强度较低, 稳定性较差, 尤其是受水浸泡和后继泥石流冲击, 其强度更是大大降低, 极易遭受破坏。综合以上分析, 随着上游的不断来水, 水位上升速率较快, 加上后继泥石流的高速冲击, 坝体突然崩塌。因此, 滑动破坏是该堰塞体最可能的溃决模式。

表 3 传递系数法计算中的岩土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock-soil mass for transfer coefficient method

容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
20.6	32.1	25.7

表 4 滑坡稳定性划分结果

Table 4 Classification results of landslide stability

滑坡稳定系数 (K_f)	$K_f < 1.00$	$1.00 < K_f < 1.05$	$1.05 < K_f < 1.15$	$K_f > 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

3.2 典型堵溃点选择与特征分析

为模拟甘家沟的溃决型泥石流, 现拟选定 D_{01} 和 D_{02} 的位置分别作为主沟和支沟的堵溃点。

(1) D_{01} 堵溃点。 D_{01} 堵溃点位于甘家沟主沟上游形成区, 周边分布大量不稳定滑坡和崩塌, 强降雨下易失稳入沟造成堵塞。 S_{02} 滑坡后缘与前缘高差 40 m, 宽 30 m, 厚 6 m, 坡度 42° , 坡向 142° , 滑壁高 3 m, 物质为黄土夹碎石 (粒径 13 cm, 含一块 20 cm 巨石),

表面有小树 (图 2)。该堵溃点沟道上段纵坡大, 下段略缓, 左岸基岩陡峻, 右岸为崩坡积物, 弯道发育且堆积体阻挡, 上游泥石流易汇聚成堵。设计堰塞体平均厚 7.7 m, 淤积长 35.4 m, 淤高 510 m, 方量约 $2\ 649\ \text{m}^3$, 沟道实测宽 3.2 m。该处由于崩滑松散堆积物源丰富, 且该处沟道宽度较小, 在模拟上游来流作用时, 坝后水位不断升高, 最终发生漫顶溢流, 堰塞体溃决。

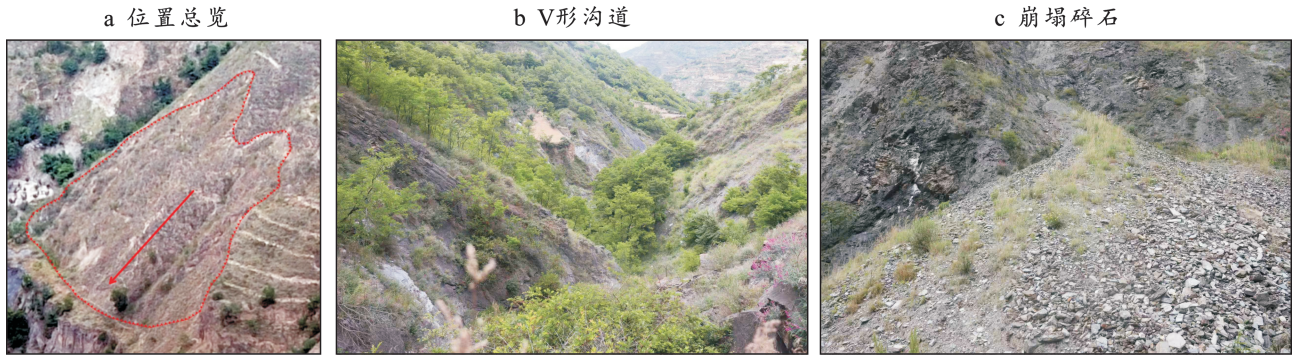


图 2 甘家沟 D_{01} 堵溃点特征

Fig.2 Characteristics of D_{01} blockage-failure point at Ganjia gully

(2) D_{02} 堵溃点。 D_{02} 堵溃点位于甘家沟支沟上游, 左右山体存在大型欠稳定滑坡, 暴雨易诱发垮塌入沟成坝。主要滑坡位于左岸, 长 66 m, 宽 50 m, 高 55 m, 厚 2 m, 坡度 44° , 坡向 308° , 坡底为板岩和千枚岩, 沟底有小溪 (图 3)。其堵溃效应表现为: ①暴雨

汇聚坡面与沟道物源, 集中堆积成坝; ②上游泥石流冲击致坝体溃决, 引发更大更强的泥石流, 并带动两岸滑塌补充物源。预计堰塞体宽 10 m, 长 38.4 m, 淤高 58 m, 背水面坡度 28° , 迎水面 22° , 以块石为主, 坝体约 $2\ 250\ \text{m}^3$, 库容约 $6\ 800\ \text{m}^3$ 。

图3 甘家沟D₀₂堵溃点特征Fig.3 Characteristics of D₀₂ blockage-failure point at Ganjia gully

4 甘家沟溃决型泥石流演进过程

4.1 模型原理

采用开源水文空间模型 OpenLISEM 模拟溃决型泥石流的致灾特性及运动过程。主要基于其在降雨—汇流—泥石流启动—侵蚀—堆积全过程的耦合优势。与 FLO-2D, RAMMS 和 DAN3D 等以单阶段流动为主的模型相比, OpenLISEM 可实现流域尺度的降雨径流生成与堵溃过程的动态演化, 并可考虑泥沙侵蚀、沉积及堵溃点相互作用等多重过程, 适用于级联溃决型泥石流的灾变全过程模拟。模型内嵌 Pudasaini 提出的广义两相流泥石流模型, 基于两相动量守恒, 考虑重力、压力、黏滞力、固相和液相之间的拖力及固相莫尔-库仑摩擦力, 可有效描述无黏性流体、高含沙水流与泥石流间的转化。夹带侵蚀采用基于莫尔-库仑准则的基本夹带公式推导而成。

$$E = E_s + E_f \quad (2)$$

$$E_s = \frac{\sqrt{[(1-\gamma^m)\rho_s^m \mu_s^m \alpha_s^m - (1-\gamma^b)\rho_s^b \mu_s^b \alpha_s^b]}}{\sqrt{v(\rho_s^m \lambda_s^m \alpha_s^m - \rho_s^b \lambda_s^b \alpha_s^b)}} \times \sqrt{g \cos(\zeta) h} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{c_f^m \rho_f^m \alpha_f^m - c_f^b \rho_f^b \lambda_f^b \alpha_f^b}{H(\rho_s^m \lambda_s^m \alpha_s^m - \rho_s^b \lambda_s^b \alpha_s^b)} / hu_f \quad (4)$$

式中: E_s, E_f 分别代表固相与液相提供的侵蚀速率 (m/s); γ^m 为流动体的体积分系数; γ^b 为河床的体积分系数; ρ_f^m 为流动体固体颗粒密度 (kg/m^3); ρ_s^b 为沟床固体颗粒密度 (kg/m^3); μ_s^m 为流动体的固相摩擦系数; μ_s^b 为沟床的固相摩擦系数; α_s^m 为流动体体积固体浓度; α_s^b 为沟床物质体积固体浓度; g 为重力加速度 (m/s^2); v 为经验常数; ζ 为地表坡角 ($^\circ$); h 为流动层厚度 (m); C_f^m 为流动体的 Chezy 摩擦系数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$); C_f^b 为沟床的 Chezy 摩擦系数 ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$); ρ_f^m 为水的密度 (kg/m^3); ρ_f^b 为沟床固体物质的密度 (kg/m^3); λ_s^m 为流体相侵蚀漂移系数; λ_s^b 为沟床侵蚀漂移系数; H 为

特征流尺度 (m); μ_f 为流体流速。

4.2 参数选取

模拟中所需要的数据及参数大部分以 map 格式输入软件中进行模拟, 其为包含空间信息与数据类型的栅格文件数据。其中基本图层数据有数字高程数据 (DEM)、土地利用类型、植被覆盖、泥石流沟道及物源等。其中地形数据是利用地理空间数据云下载的高精度 DEM 通过 QGIS 中的转换功能, 转换成所需的 map 文件; 降雨数据采用热带降雨测量任务 (TRMM) 降雨数据, 数据来源 gpm.nasa.gov。

(1) 物源数据。通过遥感解译及现场调查, 研究区物源大都为崩滑体, 由于研究区泥石流物源多位于山高坡陡处, 现场调查存在一定困难, 因此对于物源厚度的估量, 采用方群生等^[27]通过调查大量泥石流物源获得的物源厚度方程进行计算:

$$D = 1.105 \ln(A_h) - 4.795 \quad (5)$$

$$V = A_h \cdot D \quad (6)$$

式中: D 为物源厚度 (m); A_h 为遥感解译物源面积 (m^2); V 为物源体积 (m^3)。

结合表 2 中各物源面积进行计算, 最终得到物源方量为 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该公式为参考汶川震区大量泥石流沟物源, 并进行回归分析所得, 误差在 $-21.951\% \sim 26.395\%$, 且甘家沟受汶川震区影响, 而计算误差主要来自地形变化。

(2) 植被覆盖因子。通过植被归一化指数 NDVI 计算植物冠层百分比, 用 P_c 表示。该处理在 ArcGIS 平台中完成, 计算公式为

$$P_c = (46.1 \times \text{NDVI}) + 15.9 \quad (7)$$

(3) 溃坝流量数据通过谢任之^[28]提出的通过分析坝址处溃坝瞬间流态的计算公式来进行溃坝洪峰流量的计算:

$$Q = \lambda \cdot B_0 \cdot \sqrt{g} \cdot H_0^{(3/2)} \quad (8)$$

$$\lambda = x^{(x-1)} \left(\frac{2\sqrt{x}}{1+2x} \right)^{(2x+1)} \quad (9)$$

式中: Q 为洪峰流量(m^3/s); λ 流量参数; x 为沟谷断面形状指数,不同的断面形状对应于不同的 x 值(一般矩形断面取 $x=1$, 三角形断面 $x=2$, 二次抛物线断面 $x=1.5$, 四次抛物线断面 $x=1.25$), 综合分析甘家沟沟谷地形地貌, 取值为 1.5; B_0 为溃口宽度(m); g 为重力加速度($9.8 m/s^2$); H_0 为溃坝前上游水深(m)。

根据堵沟处剖面特征, 当堰塞坝高度分别为 10 和 9 m 时, D_{01} 和 D_{02} 堵溃点顶部坝宽分布为 20 和 18 m, 计算时考虑坝体完全溃决的情况, 其溃口宽度 B_0 取值分别为 20 和 18 m, 将上述参数代入公式, 求得在两种情况下, 主沟溃决型与支沟溃决型洪峰流量 Q 分别为 1 303.58 和 1 001.71 m^3/s 。而级联溃决型泥石流将主沟与支沟交汇处的下游沟道作为溃口, 并考虑坝体完全溃决, 溃口宽度 B_0 取值为 38 m, H_0 为 20 m。根据上述计算公式得级联溃决型泥石流洪峰流量为 1 808.8 m^3/s , 主沟、支沟与级联溃决型泥石流流量过程线如图 4 所示。暴雨型泥石流洪峰流量通过《泥石

流灾害防治工程勘察规范(试行)(T/CAGHP 006—2018)》中雨洪法计算所得, 则放大系数利用溃决型洪峰流量与暴雨型泥石流洪峰流量的比值定义, 具体参数详见表 5。

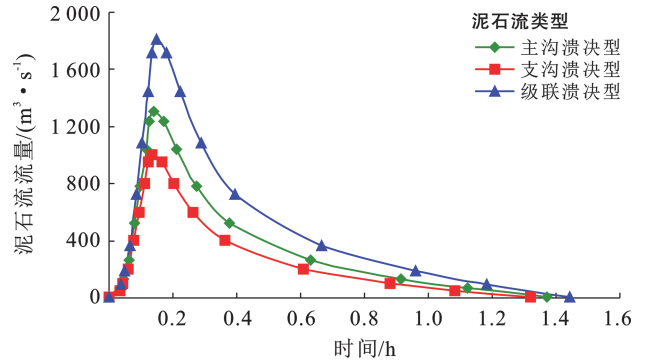


图 4 主沟溃决型、支沟溃决型与级联溃决型泥石流水文流量过程线

Fig.4 Discharge hydrographs of main-gully, tributary-gully and cascading dam-break debris flows of Ganjia gully

表 5 甘家沟主沟溃决型、支沟溃决型与级联溃决型泥石流放大系数

Table 5 Amplification coefficients of main-gully, tributary-gully and cascading dam-break debris flows of Ganjia gully

溃决模式	溃决峰值流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	暴雨型泥石流峰值流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	放大系数
主沟溃决型	1 303.58	592.12	2.202
支沟溃决型	1 001.71	402.41	2.489
级联溃决型	1 808.80	723.58	2.499

其余模拟所需参数通过现场取样在室内进行筛分与力学试验测得, 最终得到甘家沟物源物理力学参数与级配曲线(图 5), 其中粒径参数(D_{50}, D_{90})和内摩擦角主要控制泥石流的流动性与堆积范围; 较大的粒径和摩擦角会减弱流动性, 使堆积范围缩小。黏聚力增大可提高启动临界强度, 降低洪峰流量。初始含水率与孔隙度影响孔隙水压力的积聚过程, 其值较高时易导致物源启动进入沟道, 增加泥石流流量与堆积范围, 具体模拟参数详见表 6。

4.3 演进过程分析

针对甘家沟泥石流灾害, 开展基于 OpenLISEM 的数值模拟研究, 得到 200 年一遇降雨强度下主沟崩滑堵塞沟道溃决型泥石流、支沟崩滑堵塞沟道溃决型泥石流、主沟和支沟级联溃决型泥石流的运动堆积特征图, 并且获得泥石流暴发过程中流体的堆积深度、流动速度、堆积厚度、堆积范围和冲击力等数据, 图 6—8 分别为 200 年一遇条件下 3 种类型泥石流的泥深和流速图。

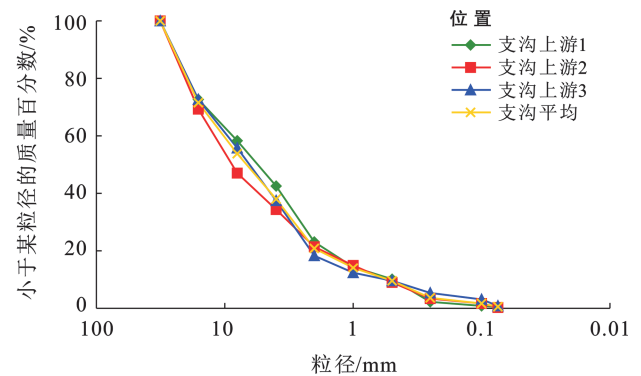
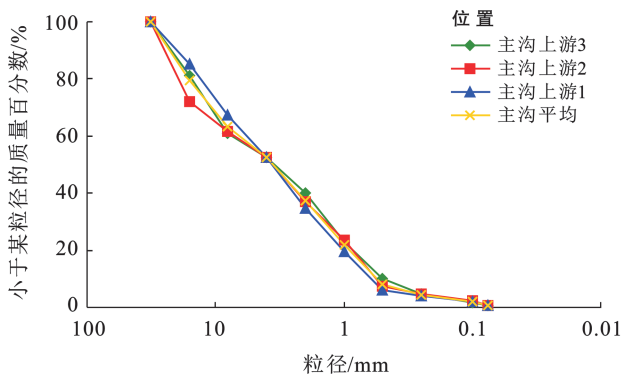


图 5 甘家沟主沟、支沟松散堆积物级配曲线

Fig.5 Grain size distribution curves of loose deposits in main and tributary gullies of Ganjia gully

表 6 物源参数及取值

Table 6 Parameters and values of source materials at Ganjia gully

物源参数	D_{50}/mm	D_{90}/mm	内摩擦角/ $^{\circ}$	初始含水率/ $\%$	孔隙度/ $\%$	黏聚力/ kPa
主沟	3.6	11.21	12.63	7.42	0.95	33.34
支沟	7.1	11.74	9.62	8.51	1.84	29.63

注: D_{50} 为物源中值粒径(mm); D_{90} 为颗粒粒度分布中,从小到大累积分布百分数达到90%时对应的粒径值。

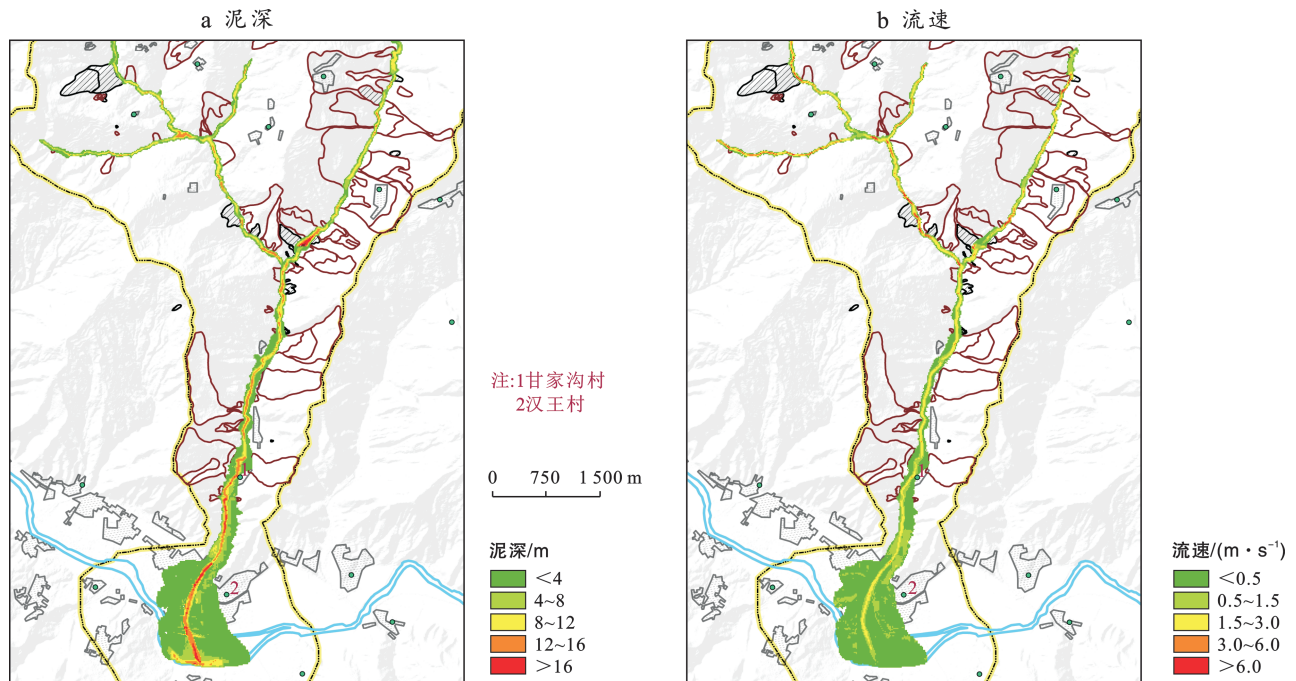


图 6 200 a 一遇降雨条件下甘家沟主沟崩滑堵塞沟道溃决型泥石流泥深、流速

Fig.6 Depth and velocity of main-gully dam-break debris flow triggered by collapse-slide blockage under a 200-year rainfall event at Ganjia gully

该模式为暴雨引发的崩滑体失稳堵塞沟道并短时溃决,形成溃决型泥石流。甘家沟沟道上游两侧边坡崩滑物源丰富,暴雨时易失稳并堵塞沟道。本次模拟选定主沟上游形成区——堵溃点。暴雨使崩滑堆积体饱和、抗剪强度下降,岩土体拉槽下切并发生侧蚀,沟岸滑塌,高位势能转化为动能,形成堰塞坝。上游来水持续蓄水,水位升速快于坝体浸润线,坝面产生溢流。初期水流接近清水,随时间流动逐渐侵蚀坝体,泥沙浓度升高,颗粒运动转为集合流,最终形成泥石流。该模式下,堆积扇冲出 1 342.06 m,最大宽度 1 270.8 m,面积 1.38 km²。模拟显示泥沙已进入河道,淤积河道长约 929.42 m,平均深 4.31 m,最大深 21.64 m,平均流速 1.64 m/s,最大淤积仍在沟道内,入河泥石流流量较少。主沟堵溃点处堆积明显,厚度可达 19.17 m。

该模式为由暴雨引发的支沟处崩滑体失稳堵塞沟道并在短时间内发生溃决,从而引起溃决型泥石流。该模式启动机制与主沟溃决型泥石流相似,都是

由暴雨引起的崩滑体失稳造成沟道堵塞,随后由上游来流冲击堰塞坝,造成溃决,形成泥石流。该模式下,堆积扇冲出 1 223.95 m,最大宽度 952.77 m,面积 1.03 km²,未达白龙江河道,堵江风险低。威胁区平均淤积深 3.89 m,最大 15.37 m,平均流速 1.44 m/s。支沟物源少于主沟,导致溃决型泥石流规模和堆积深度均较小。

该模式为由暴雨引发的支沟和主沟处崩滑体失稳堵塞沟道并在短时间内先后发生溃决,从而引起级联溃决型泥石流。当主沟和支沟两处堵溃点堵塞后,堵点上游泥石流不断叠置于堵塞体上,地表汇水部分溢流,但受堵塞体的影响以及沟道弯道的阻滞,部分地表水潜流,导致堆积体以及松散的原沟道堆积物饱水,堰塞坝强度下降。堰塞坝稳定性逐渐下降至临界点,接着牵引上游堆积体发生大规模破坏,形成规模大,流速高的泥石流。该模式下,堆积扇冲出 1 365.64 m,最大宽度 1 878.05 m,面积 1.92 km²,堵塞河道长度约 1 623.29 m,易形成堰塞湖并诱发溃

决洪水,威胁下游居民安全。泥石流威胁区平均淤积深 5.06 m,最大 28.2 m,平均流速 1.81 m/s。堆积

扇范围最大,泥沙超出排导槽承载能力,向两侧淤积,影响大面积房屋。

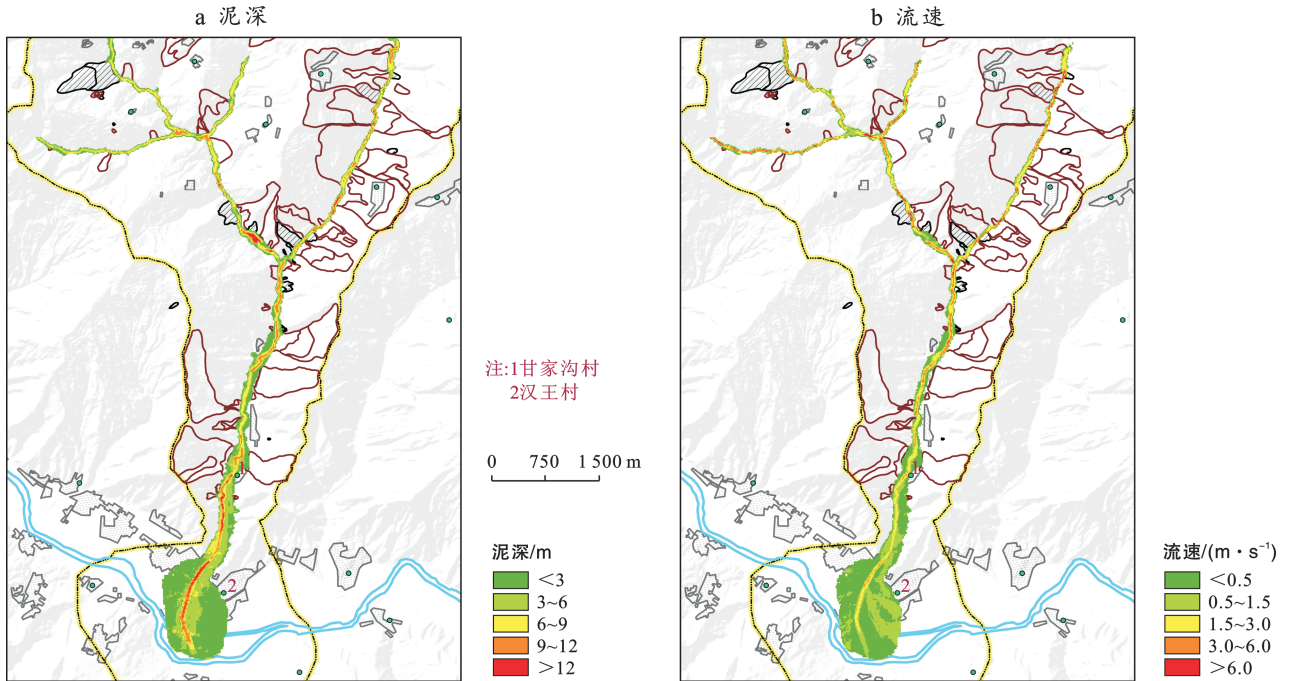


图 7 200 a 一遇降雨条件下甘家沟支沟崩滑堵塞沟道溃决型泥石流泥深、流速
Fig.7 Depth and velocity of tributary-gully dam-break debris flow triggered by collapse-slide blockage under a 200-year rainfall event at Ganjia gully

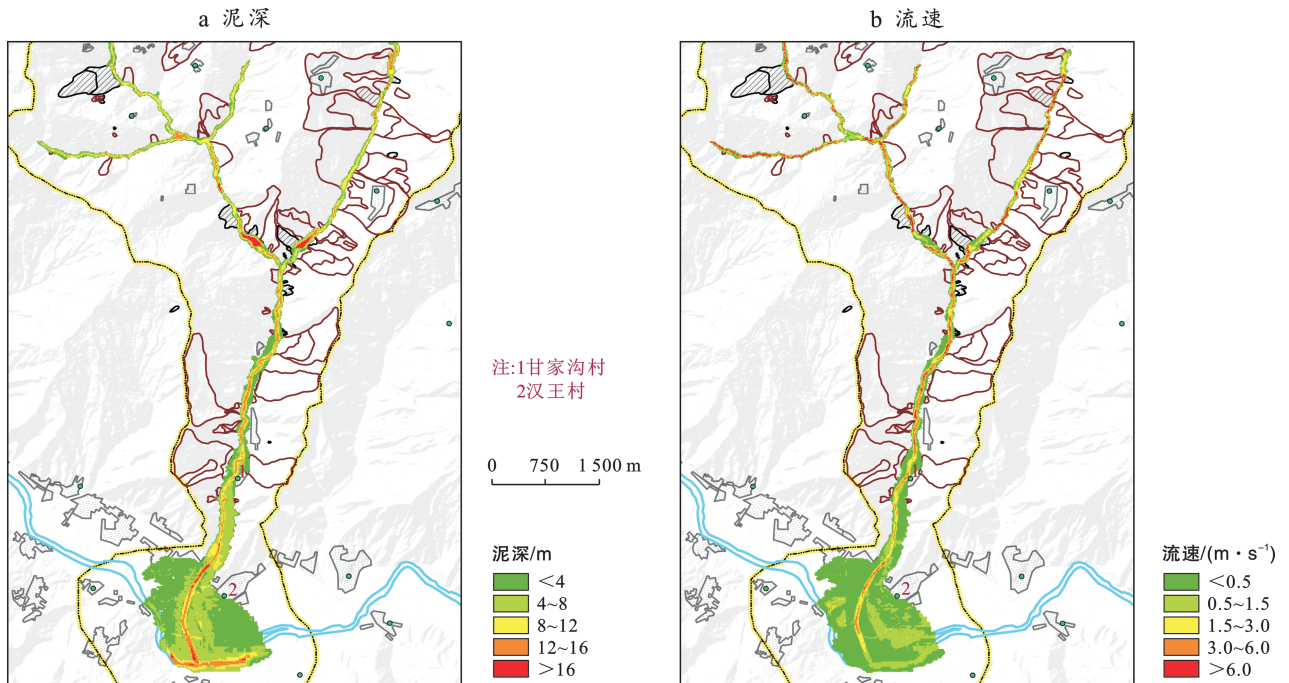


图 8 200 a 一遇降雨条件甘家沟下级联溃决型泥石流泥深、流速
Fig.8 Flow depth and velocity of cascading dam-break debris flow under a 200-year rainfall event at Ganjia gully

5 结论

(1) 甘家沟泥石流流域面积约 43.63 km², 相对高

差大, 沟道纵坡较大, 具备良好的泥石流发育条件。流域内松散堆积物丰富, 潜在崩滑体广布, 加之降雨集中且强度高, 为泥石流的形成提供充足的物源和水

动力条件。根据调查与计算表明,流域内泥石流物源储量超过 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要分布在 1 300~1 600 m 高程区,为泥石流活动的主要物质供给带。

(2) 本研究揭示了甘家沟泥石流的灾变过程主要是“崩滑体失稳启动—沟道堵塞—堰塞坝形成与溃决—泥石流流量放大”的链式演化机制,其规模和破坏程度远超单一溃决模式,并通过传递系数法计算了甘家沟典型滑坡的稳定性,发现在暴雨情况下滑坡处于欠稳定状态。

(3) 数值模拟结果显示,主沟溃决型泥石流冲出距离达 1 342.06 m,堆积面积约 1.38 km^2 ,最大堆积厚度达 21.64 m,对下游河道造成轻微淤积;支沟溃决型泥石流规模相对较小,冲出距离 1 223.95 m,堆积面积约 1.03 km^2 ,最大淤积厚度为 15.37 m,未堵塞白龙江,仅威胁沟口两侧区域;级联溃决型泥石流破坏力最强,冲出距离 1 365.64 m,堆积面积约 1.92 km^2 ,最大堆积厚度达 28.2 m,堵塞河道长度超过 1 600 m,极易形成堰塞湖并诱发溃决洪水,对下游居民安全威胁极大。

(4) 为降低溃决型泥石流的危害,需实时掌握高位物源变形特征,防止植被覆盖区隐蔽性滑坡在锁固效应或极端条件下突发失稳,应构建 InSAR 与光学遥感相结合的“空-天”一体化识别与动态监测体系,并辅以生态保持措施。同时建立由泥石流报警器、雨量计、水位计、钢索监测器和压力式泥位计组成的多参数预警系统,实现对沟道压力变化、泥石流运动及降雨过程的实时监测。此外,应结合 InSAR 形变监测结果,定期评估高位物源稳定性,提出针对性防治措施。针对沟内崩滑隐患布设监测点与警示标识,明确撤离路线和避险场所,确保“提前撤离、快速转移”的防灾目标。

本文以白龙江流域甘家沟为研究对象,系统分析了级联溃决型泥石流的孕灾条件、灾变机理与演化过程,并提出针对潜在崩滑体的防治措施,后续通过 OpenLISEM 数值仿真平台对溃决型泥石流泥深、流速以及威胁范围进行分析,实现了多因素耦合、全过程反演的综合定量风险评价。研究成果为此类极端泥石流的防治工程选址布设和应急预案制定提供科学依据。本研究本文不足之处在于:①并未对级联溃决泥石流对白龙江堵塞形成堰塞坝后的溃决洪水进行后续风险评价;②研究缺乏长期监测数据支撑,尚不足以全面反映级联溃决型泥石流在气候变化背景下的长期演化规律。在后续研究中应将“级联溃决—堵江成坝—溃坝洪水”泥石流灾害链考虑完善,并通过多元数据收集提高模拟结果准确性。

参考文献(References)

- [1] 王高峰,毕远宏,李浩,等.白龙江流域特大滑坡灾害链发育分布特征及形成机制[J].地球科学,2025,50(10):3885-3904.
Wang Gaofeng, Bi Yuanhong, Li Hao, et al. Developmental and distribution characteristics and formation mechanisms of large-scale landslide disaster chains in Bailong River basin [J]. Earth Science, 2025, 50(10): 3885-3904.
- [2] 郭长宝,任三绍,李雪,等.甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理[J].现代地质,2019,33(1):206-217.
Guo Changbao, Ren Sanshao, Li Xue, et al. Development characteristics and reactivation mechanism of the jiangdingya ancient landslide in the Nanyu Town, Zhouqu County, Gansu Province [J]. Geoscience, 2019, 33(1):206-217.
- [3] 李宏杰,常鸣,唐亮亮,等.白龙江流域潜在泥石流堵江—溃决洪水链式灾害演进过程[J].地质科技通报,2024,43(6):196-211.
Li Hongjie, Chang Ming, Tang Liangliang, et al. Potential chain disaster evolution process of debris flow blockage and dam failure floods in the Bailong River basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6):196-211.
- [4] 周超.强震区沟道泥石流堰塞体失稳判别及堵塞系数取值方法研究[D].四川成都:成都理工大学,2022.
Zhou Chao. Failure of the landslide dams and blocking coefficient on cascade outburst debris flow in the highly seismic region [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2022.
- [5] 张利强.堰塞坝连续溃决泥石流规模放大效应模型试验与数值仿真研究[D].四川成都:成都理工大学,2022.
Zhang Liqiang. Experimental and numerical simulation of the scale amplification effect of continuous weir failure on debris flow [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2022.
- [6] Tang C, Rengers N, van Asch T W J, et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu City, Gansu Province, northwestern China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(11):2903-2912.
- [7] 成泽霖,徐华,闻云呈,等.堰塞体粒序堆积结构对漫顶溃决影响研究[J/OL].人民长江,1-9[2026-01-05].https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250127.1344.008.
Cheng Zelin, Xu Hua, Wen Yuncheng, et al. Study on the response of the grain-size distribution structure to overtopping breach of landslide dam [J/OL]. Yangtze River, 2025: 1-9. (2025-02-05). https://link.cnki.net/

- urlid/42.1202.TV.20250127.1344.008.
- [8] 毕远.堰塞体级联溃坝洪水演进机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
Bi Yuan. Study on flood evolution mechanism of cascade dam failure [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [9] Zhou G G D, Zhou Mingjun, Shrestha M S, et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods [J]. *Geomorphology*, 2019,334:29-43.
- [10] Fan X, Tang C X, van Westen C J, et al. Simulating dam-breach flood scenarios of the Tangjiashan landslide dam induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(10): 3031-3044.
- [11] 许强,郑光,李为乐,等.2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J].*工程地质学报*,2018,26(6):1534-1551.
Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige village on October 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018,26(6):1534-1551.
- [12] Zhao Tianlong, Chen Shengshui, Fu Changjing, et al. Centrifugal model tests and numerical simulations for barrier dam break due to overtopping [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(3):630-640.
- [13] 伍先福,刘江,李天涛,等.青海隆务东山沟域潜在灾害链成链分析及防治对策[J].*科学技术与工程*,2024,24(34):14878-14888.
Wu Xianfu, Liu Jiang, Li Tiantao, et al. Chains genesis analysis and prevention measures of potential hazards in Longwu Dongshan gully of Qinghai Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(34):14878-14888.
- [14] 王翔弘,胡桂胜,杨志全,等.云南维西哈达沟中频泥石流特征及堵溃危险性分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,2023,34(2):42-52.
Wang X, Hu Guisheng, Yang Zhiqian, et al. Characteristics of intermediate frequency debris flow and analysis of the hazard of blockage in Hada gully, Weixi County of Yunnan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023,34(2):42-52.
- [15] Cui P, Zhou G G D, Zhu X H, et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures [J]. *Geomorphology*, 2013,182:173-189.
- [16] Zhou G G D, Cui Peng, Zhu Xinghua, et al. A preliminary study of the failure mechanisms of cascading landslide dams [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015,30(3):223-234.
- [17] Chang Ming, Dou Xiangyang, Luo Chaopeng, et al. Multi-scenario simulations for quantitative assessment of debris flow chain hazards in southwestern China [J]. *Catena*, 2025,253:108900.
- [18] Ouyang Chaojun, Wang Zhongwen, An Huicong, 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.
- [19] 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 Luoqing Gully after the “9·5” Luding earthquake [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(5): 1116-1124.
- [20] 周康驰,常鸣,张宁,等.雅江县土窝沟火后泥石流物源储量预测与灾变过程研究[J].*灾害学*,2025,40(2):198-204.
Zhou Kangchi, Chang Ming, Zhang Ning, et al. Prediction of post-fire debris flow source storage and dynamic processes in the slope erosion of Tuwogou, Yajiang County [J]. *Journal of Catastrophology*, 2025, 40(2): 198-204.
- [21] 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/OL].*武汉大学学报(信息科学版)*,2025:1-11.(2025-06-12).<https://link.cnki.net/doi/10.13203/j.whugis20250026>.
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/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025: 1-11. (2025-06-12). <https://link.cnki.net/doi/10.13203/j.whugis20250026>.
- [22] 钟秀梅,陈文凯,侯景瑞,等.汶川地震震发武都区 and 文县地质灾害发育特征研究[J].*岩土工程学报*,2011,33(S1):356-360.
Zhong Xiumei, Chen Wenkai, Hou Jingrui, et al. Study on the development characteristics of geological disasters triggered by Wenchuan earthquake in Wudu District and Wenxian County [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011,33(S1):356-360.
- [23] 孟兴民,陈冠,郭鹏,等.白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J].*海洋地质与第四纪地质*,2013,33(4):1-15.
Meng Xingmin, Chen Guan, Guo Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River basin: Progress and prospect [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013,33(4):1-15.

- associated with soil texture on steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3):917-929.
- [50] 郭明明, 王文龙, 史清华, 等. 黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10):129-136.
Guo Mingming, Wang Wenlong, Shi Qianhua, et al. Soil anti-scourability of abandoned land and its relationship with influencing factors in Loess Plateau gully region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10):129-136.
- [51] Babazadeh H, Ashourian M, Shafai-Bajestan M. Experimental study of headcut erosion in cohesive soils under different consolidation types and hydraulic parameters [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12):438.
- [52] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. *水土保持通报*, 1982, 2(3):40-44.
Zhu Xianmo. Main types of water erosion and related factors on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1982, 2(3):40-44.
- [53] Kirkby M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion [J]. *Catena*, 2002, 46(2/3):89-102.
- [54] Gordon L M, Bennett S J, Wells R R, et al. Effect of soil stratification on the development and migration of headcuts in upland concentrated flows [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(7):2006WR005659.
- [55] Wang Jianyu, Lin Zhe, Wei Jiangxing, et al. Influence of initial headcut height on rill headcut erosion mechanisms via runoff hydrodynamics modulation in granite residual soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 661:133606.
- [56] Jiang Chengcheng, Fan Wen, Yu Ningyu, et al. A new method to predict gully head erosion in the Loess Plateau of China based on SBAS-InSAR [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3):421.
- [57] Bouchnak H, Sfar Felfoul M, Boussema M R, et al. Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia) [J]. *Catena*, 2009, 78(2):170-177.
- [58] Tang Qiuyue, Liao Dalan, Lin Zhe, et al. Dynamics of run-off hydraulic characteristics during gully headcut erosion driven by head height [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(15):3395-3413.
- [59] Allen P M, Arnold J G, Auguste L, et al. Application of a simple headcut advance model for gullies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1):202-217.
- [60] Rengers F K, Tucker G E. The evolution of gully headcut morphology: A case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10):1304-1317.
- [61] 陶婷婷. 紫色土坡耕地细沟发育过程及侵蚀动力机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2024.
Tao Tingting. Study on the development process and erosion dynamics mechanism of rill in purple soil slope [D]. Chongqing: Southwest University, 2024.
- [62] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model [J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(1):65-72.

(上接第 413 页)

- [24] 张茂省, 黎志恒, 王根龙, 等. 白龙江流域地质灾害特征及勘查思路[J]. *西北地质*, 2011, 44(3):1-9.
Zhang Maosheng, Li Zhiheng, Wang Genlong, et al. The geological hazard characteristics and exploration ideas of the Bailong River basin [J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(3):1-9.
- [25] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征[J]. *地球科学*, 2023(8):3115-3126.
Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, et al. Failure modes and dynamic characteristics of the landslide dams in strong earthquake area [J]. *Earth Science*, 2023(8):3115-3126.
- [26] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3):1-8.
Yin Yueping, Li Bin, Zhang Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3):1-8.
- [27] 方群生, 唐川, 程霄, 等. 汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J]. *水利学报*, 2015, 46(11):1298-1304.
Fang Qunsheng, Tang Chuan, Cheng Xiao, et al. An calculation method for predicting landslides volumes of the debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11):1298-1304.
- [28] 谢任之. 溃坝坝址流量计算[J]. *水利水运科学研究*, 1982(1):43-58.
Xie Renzhi. Computation for the discharge from the site of dam-break [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1982(1):43-58.