

引用格式：张宪政，铁永波，李光辉，等，2022. 四川泸定 M_s 6.8 级地震区湾东河流域泥石流活动性预测 [J]. 地质力学学报，28（6）：1035–1045. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222827

Citation: ZHANG X Z, TIE Y B, LI G H, et al., 2022. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the M_s 6.8 Luding earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 28（6）：1035–1045. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222827

四川泸定 M_s 6.8 级地震区湾东河流域泥石流活动性预测

张宪政^{1,2,3}，铁永波^{1,2,3}，李光辉^{1,4,5}，杨 昶^{1,4,5}，卢佳燕^{1,4,5}，鲁 拓^{1,4,5}
ZHANG Xianzheng^{1,2,3}，TIE Yongbo^{1,2,3}，LI Guanghui^{1,4,5}，YANG Chang^{1,4,5}，LU Jiayan^{1,4,5}，LU Tuo^{1,4,5}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心，四川 成都 610081；

2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心，四川 成都 611734；

3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站，四川 成都 610000；

4. 中国地质科学院研究生院，北京 100083；

5. 中国地质大学（北京），北京 100083
1. *Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;*

2. *Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Nature Resources, Chengdu 611734, Sichuan, China;*

3. *Observation and Research Station of Chengdu Geological Harzards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, Sichuan, China;*

4. *Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100083, China;*

5. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the M_s 6.8 Luding earthquake

Abstract: On Sep. 5, 2022, an M_s 6.8 earthquake struck Luding County. The earthquake triggered large amounts of co-seismic landslides, which blocked the Wandong River for nearly 24 hours. Field surveys, image interpretation, spatial statistics, and hydro-logical calculations were used to investigate the characteristics of co-seismic landslides and the risk of debris flow following the earthquake. According to the findings, co-seismic landslides are primarily found in areas of earthquake intensity IX, and their sizes are typically small and medium. They are distributed along both sides of the channel, particularly on both sides of the thin ridge facing the air. The distance from the fault and slope controls the distribution of co-seismic landslides. The volume of debris flow runoff in the Wandong catchment may be twice that of the debris flow prior to the earthquake. On this basis, the following disaster prevention and mitigation suggestions were put forward. The risk of runoff debris flow in the catchment should be strengthened; The value of triggering rainfall of debris flow should be obtained as soon as possible through comprehensive monitoring and early warning; The scale amplification factor of debris flow should be fully considered in the design of debris flow prevention and control projects. This research can be used as a scientific reference for disaster prevention and mitigation of post-earthquake debris flows.

Keywords: Luding earthquake; post-earthquake debris flow; co-seismic landslides; outburst amplification; risk prediction

基金项目：国家自然科学基金（U20A20110-01）；中国地质调查局地质调查项目（DD20221746）

The research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China（Grant U20A20110-01）and the Geological Survey Project of the China Geological Survey（Grant DD20221746）

第一作者简介：张宪政（1990—），男，博士，工程师，主要从事地质灾害评价与防治研究工作。E-mail: 1067303751@qq.com

通讯作者：铁永波（1979—），男，博士，教授级高级工程师，主要从事地质灾害形成机理与防治研究工作。

E-mail: tyongbo@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2022-09-27；修回日期：2022-10-12；责任编辑：范二平

摘要: 2022年9月5日四川泸定县发生 M_s 6.8级地震,地震诱发大量同震崩滑体,并导致湾东河断流。基于现场调查、影像解译和区域地质资料分析,采用空间统计和水文计算的方法,对湾东河流域同震崩滑体分布特征和潜在泥石流危险性进行了研究。结果表明:湾东河流域内同震崩滑体主要分布在地震烈度IX度区,规模以中小型为主,主要沿沟道两侧展布,尤其是单薄山脊两侧临空面发育密度较大,距断层距离和坡度对其分布具有明显的控灾效应;未来湾东河流域暴发溃决型泥石流的冲出量可能为同等触发条件下震前泥石流的约两倍。依此提出了加强流域内溃决型泥石流风险防范,尽快通过综合监测预警获取泥石流发生的临界雨量值,在泥石流防治工程设计中应充分考虑泥石流规模放大系数等防灾减灾建议,为泸定地震后泥石流灾害防灾减灾提供科学参考。

关键词: 泸定地震;震后泥石流;同震崩滑体;溃决放大;危险性预测

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 06-1035-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222827

0 引言

2022年9月5日12时52分18秒,四川省甘孜州泸定县发生 M_s 6.8级地震,震中位置为东经102.08°,北纬29.59°,震源深度为15 km,地震类型以走滑型为主。地震后在距离震中约5 km的湾东河流域出现了断流现象,通过现场调查可知,地震诱发的同震崩滑体碎屑物堵塞了原沟道,形成了堰塞湖,对下游居民、道路和水库构成了威胁。堰塞湖于2022年9月6日11时开始自然泄流,且未对下游造成流域性灾害,但是湾东河流域内仍存在大量的地震滑坡体、堰塞体,在强降雨条件下,具有暴发大规模溃决型泥石流的风险。

强震诱发的同震崩滑体可为震后泥石流提供丰富的物源。如2008年汶川地震,地震共诱发同震崩滑体22528处,总面积约18.88 km² (Xu et al., 2015)。汶川地震后11年内(2008—2019年),汶川县有记录的泥石流事件为113次,其中包括3次群发性泥石流事件 (Zhang et al., 2022)。灾难性的震后泥石流事件引起了国内外学者的广泛关注,主要对两方面进行了研究。一是同震崩滑体物源的发育分布规律,研究发现其分布与距断层距离、坡度、坡向、高程、岩性等因素有关 (Lin et al., 2004; 黄润秋和李为乐, 2008; Barth et al., 2020)。二是震后物源演化规律,研究基于震后建立的多时相崩滑体数据库,发现震后物源稳定性逐渐恢复到震前水平 (Tang et al., 2016; Chen et al., 2020),但其恢复速率与地震属性、气候、岩性等多种因素有关 (许强和李为乐, 2010; Fan et al., 2019; Xiong et al., 2022)。

震后泥石流的危险性相比震前泥石流显著增加。根据汶川震后泥石流的研究成果可知,震后泥石流冲出量通常远大于震前泥石流的冲出量,主要原因有:①同震崩滑体为泥石流的暴发提供了丰富的物源,导致震后泥石流可启动的物源量增加 (Tang et al., 2011; Ge et al., 2015);②部分同震崩滑体产生的碎屑堆积物堵塞河道,导致震后溃决型泥石流的暴发,且冲出量可比一般型泥石流大出几十倍 (方群生和唐川, 2016; 黄勋和唐川, 2017; 陈淑婧等, 2020)。

文章聚焦可能暴发震后溃决型泥石流的湾东河流域,首先采用地面调查和影像解译方法获取流域内同震崩滑体物源分布,利用空间统计方法分析物源分布特征和发育规律。然后调查流域内堰塞体堵溃特征,并采用水文分析方法对冲出量进行预测。文章的研究成果可为震后次生灾害的防治和监测预警提供科学参考。

1 研究区概况

湾东河位于四川省泸定县得妥镇,为大渡河右岸一级支流。湾东河发源于贡嘎山东侧,河流自西向东流,在两岸有多条支沟汇入 (如板棚沟、板板棚沟、红岩沟、飞水沟、银厂沟等)。湾东河流域面积为166 km²,主沟道长28 km,主沟道平均纵坡降为125‰;支沟红岩沟的流域面积为18.2 km²,沟道长4.5 km,沟道平均纵坡降为218‰;银厂沟流域面积为8.3 km²,沟道长1.9 km,沟道平均纵坡降为382‰。

湾东河流域地表起伏大,最高海拔为6078 m,位于贡嘎山东侧。最低海拔为1058 m,流域相对

高差达 5020 m。流域内具有典型的 V 型侵蚀河谷地貌, 临空面发育。流域内坡面较陡, 主要坡度变化范围为 $20^{\circ} \sim 48^{\circ}$, 平均坡度为 34° 。陡峭的地形为泥石流的发育提供了良好的地形条件。

湾东河流域位于鲜水河断裂、汶茂-汶川断裂和安宁河断裂的交汇处, 地质条件复杂, 构造活动强烈。流域内岩性复杂, 主要为三叠统变砂岩和板岩、侏罗纪二长花岗岩和早远古代石英闪

长岩。沟口处有两条断裂穿过, 分别为锦屏山断裂和鲜水河断裂 (图 1)。根据流域及周边地震事件统计结果可知: 1900 年以来共发生 6.0 级以上地震 40 多次, 其中 1786 年磨西 M_s 7.75 级地震为最大的一次 (倪化勇, 2016)。复杂的构造和强烈的地震活动, 使得流域内的岩体破碎, 滑坡和崩塌频发, 为泥石流的发育提供了丰富的物源。

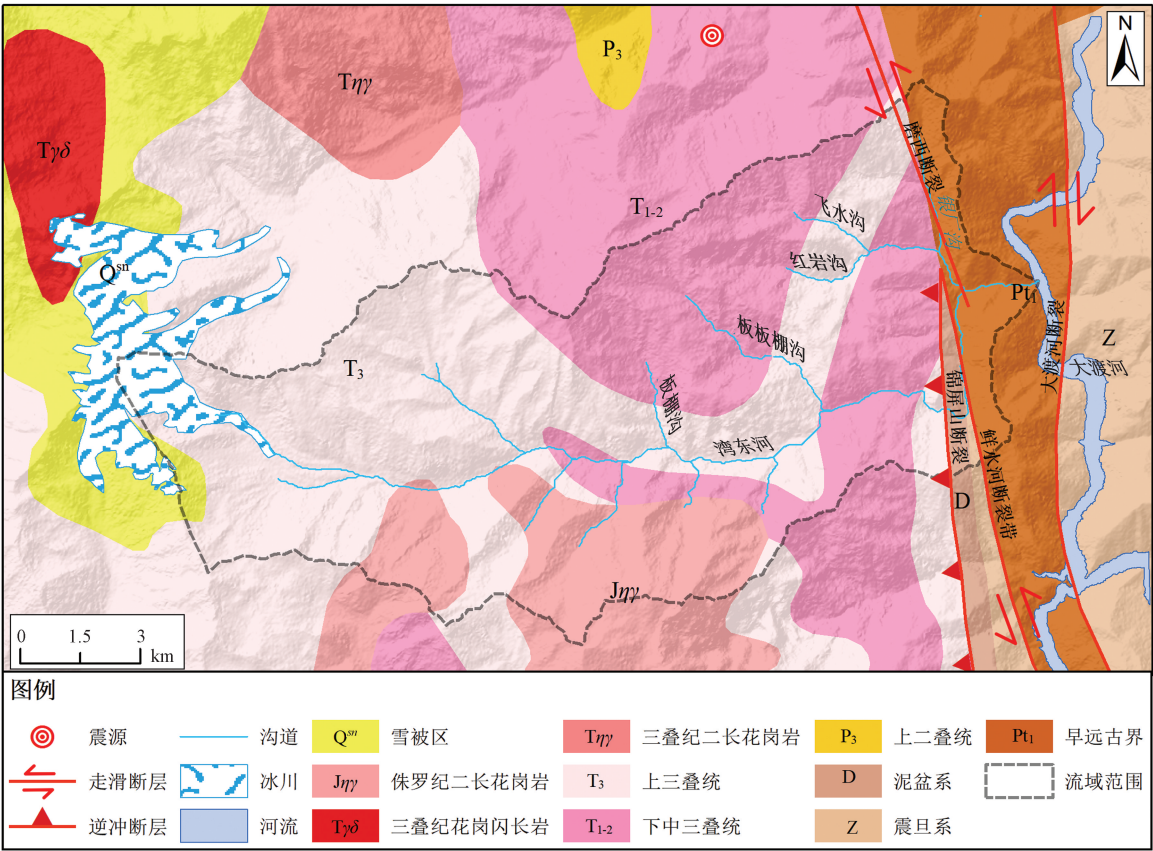


图 1 研究区地质岩性和水系分布图

Fig. 1 Lithology and drainage distribution map of the study area

湾东河流域处于亚热带季风气候区, 且受地形影响较大。降雨量随海拔增加呈现先增大后减小的趋势, 海拔 3000 m 和 5000 m 的区域为两个降雨峰值带 (铁永波和李宗亮, 2011)。根据相邻流域内的气象观测站数据可知, 海拔 3000 m 处的年平均降雨量为 1972.2 mm, 最大年平均降雨量为 2175.4 mm; 海拔 1600 m 处的年平均降雨量为 897.8 mm, 年最大降雨量为 1113.6 mm (高东东等, 2015)。流域内降雨主要集中在 6—8 月份, 其中 5—10 月份为雨季, 11 月—次年 4 月为非雨季。丰富的降雨为泥石流的暴发提供了充足的水动力

条件。

2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分, 四川省甘孜州泸定县发生 M_s 6.8 级地震, 地震震中位置距离研究区约 5 km, 发震断层为鲜水河断裂南东段的磨西断裂。在湾东河流域内, 地震诱发了大量的山体滑坡, 堵塞湾东河流域主沟 (图 2), 并导致主沟断流约 12 小时。然后堰塞湖自然泄流, 由中国安能集团提出的数据显示 (<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c25944122/content.html>), 堰塞湖初始溃决流量为 $150 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$, 经过 12 小时后, 流量降低为 $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$ 。



图2 湾东河多处滑坡堵塞河道

Fig. 2 Landslide dams blocked the channel of the Wandong catchment

2 数据和方法

2.1 崩滑体解译

文中用到的数据包括岩性数据、高程数据和影像数据，数据详情见表1。为了快速获取地震诱发的崩滑体数据和震前流域内的物源数据，文章采用了影像解译的方法。震前的影像来自哨兵2的2021年4月29日的多光谱影像，分辨率为10 m，该影像用于解译地震前的物源分布。震后的影像来自2022年9月11日的哨兵2多光谱影像（分辨率为10 m）和2022年9月10日的高分2号和高分6号全彩影像（分辨率为2 m），两个影像结合用于解译地震诱发的崩滑体分布。

表1 数据清单

类型	分辨率	来源
岩性数据	1:5万	成都地质调查中心
高程数据	12.5 m	ALOS 全球数字地表模型 (https://www.eorc.jaxa.jp)
多光谱影像数据	10 m	哨兵2；日期：2022-09-11、2021-04-29 (https://scihub.copernicus.eu)
全彩影像	2 m	高分2号、高分6号；日期：2022-09-10 (由四川省地质调查院提供)

2.2 堰塞湖体积估算

通过 ArcGIS 空间分析工具估算堰塞湖体积：①获取堰塞湖的平面范围；②假定堰塞湖处于准静态，水面高程一致，获取平面范围内最大的高程值；③通过最大高程值建立堰塞湖水面栅格数据；④利用 ArcGIS 栅格计算器，对堰塞湖水面栅格与原地形栅格进行叠加相减，得到堰塞湖的深

度分布栅格；⑤对深度栅格进行统计求和，乘以栅格单元格面积，得到堰塞湖体积。该方法可能会高估堰塞湖体积，因为它忽略了堰塞体对原地形的抬升。但是该方法适用于资料匮乏区域，可快速获取堰塞湖体积，从而为评估其危险性提供依据。

由于研究区流域内存在多个小型堰塞湖的情况，为了快速估算堰塞湖溃决后的泥石流冲出量，假定堰塞湖内的水体全部参与泥石流的运动，且忽略堰塞体溃决过程中因物质交换而导致泥石流容重变化的过程。堰塞湖溃决侵蚀而形成泥石流的体积为：

$$Q_{\text{dam}} = Q \frac{r_c - r_w}{r_H - r_c} \quad (1)$$

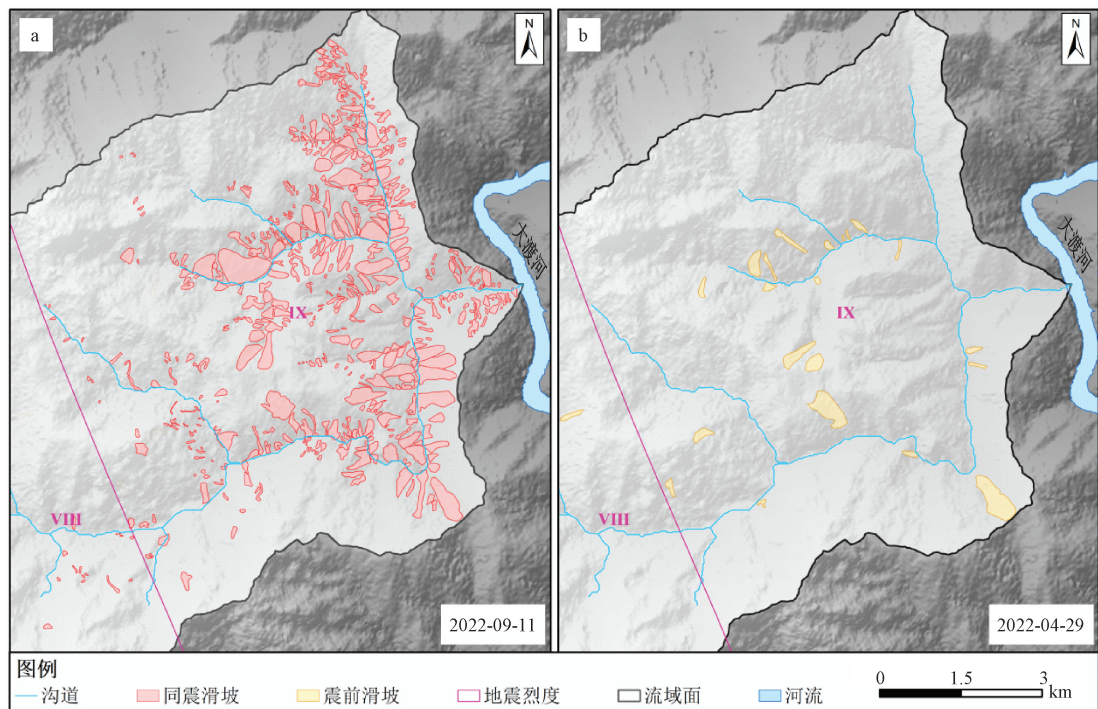
公式中， Q_{dam} 为堰塞湖溃决侵蚀形成的泥石流体积， Q 为堰塞湖水体体积， r_c 为泥石流容重， r_w 为清水的容重， r_H 为泥石流中固体物质容重。通过将暴雨泥石流冲出量与堰塞湖溃决提供的泥石流冲出量累加，得到震后湾东河主沟泥石流冲出总量。

2.3 震后泥石流冲出量预测

为了对震后泥石流的危险性进行预测，文中采用雨洪法计算泥石流在不同降雨频率下的泥石流冲出量。雨洪法被广泛用于泥石流冲出规模的计算（宋志等，2010；Chang et al.，2017；张浩韦等，2022），其主要步骤分为两步：①利用水文方法计算不同降雨频率下暴雨洪峰流量，文章依据的为《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》（四川省水利电力厅，1984）；②根据现场调查的情况，确定泥石流的容重和堵塞系数，根据公式计算得到不同降雨频率下泥石流的洪峰流量和一次冲出固体物质体积。方法的具体计算过程详见《泥石流灾害防治工程勘察规范（试行）》（中国地质灾害防治工程行业协会，2018），下文简称《勘察规范》。

3 震前泥石流活动特征

通过地面调查和影像解译可知，震前湾东河流域内崩滑体主要分布在流域的下游（图3），以中小型崩滑体为主。崩滑体共22个，总面积为 $1.17 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，平均崩滑体面积为 $5.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。海拔分布范围为1400~3150 m，平均海拔高度为



a—同震崩滑体分布图；b—震前崩滑体分布图

图 3 泸定地震震前和震后崩滑体分布图

Fig. 3 Landslide distribution map of pre and post the Luding earthquake

(a) Co-seismic landslide distribution map; (b) Pre-seismic landslide distribution map

2193 m；坡度分布范围为 $27^{\circ} \sim 54^{\circ}$ ，平均坡度为 43° 。崩滑体主要分布在沟道的两侧，其中主沟道两侧的崩滑体面积占总面积的 51%，红岩沟沟道两侧的崩滑体面积占总面积的 39%。

流域上游覆盖大量的冰碛堆积物，通过影像解译可知主要分为两部分。一部分分布在海拔 3600 m 以上山坡坡面，堆积大量冰蚀作用产生的碎屑土，这部分土体在降雨作用下易被侵蚀形成泥石流。另外一部分分布在海拔为 3400~3800 m 的主沟道中，堆积有大量冰川运动形成的冰碛土，这部分土体在沟道径流侵蚀作用下易发生泥石流。

湾东河流域内支沟泥石流活跃。银厂沟曾多次暴发泥石流，1948 年 7 月 24 日，银厂沟暴发泥石流，造成 2 人死亡，3 间房屋被毁；1976 年银厂沟泥石流造成 8 人死亡；1994 年银厂沟泥石流堵断湾东河（余涛等，2008）。1999 年红岩沟发生大规模黏性泥石流（肖翔等，2008）。以上泥石流历史事件表明，湾东河流域内支沟泥石流一直较为活跃。从目前地面调查和影像解译结果可知，红岩沟、银厂沟和主沟道可见大量泥石流堆积物和泥石流侵蚀痕迹，由此表明湾东河流域内主沟和

部分支沟泥石流一直较为活跃。

4 震后泥石流物源特征

4.1 同震崩滑体分布特征

通过影像解译和地面调查，湾东河流域内共发现 513 处同震崩滑体，总面积为 $8.88 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。其分布范围与地震烈度呈现强相关，以中小型规模为主。

分析表明，湾东河流域内同震崩滑体主要分布在地震烈度的 IX 度区，位于湾东河流域的中下游（图 3）。位于地震烈度的 IX 度区的同震崩滑体面积为 $8.82 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，约占总面积的 99%。由同震崩滑体面积频率密度图（图 4）可知，湾东河流域内同震崩滑体的数量随着同震崩滑体面积增大而呈现先增大后减小的趋势，这与在野外观察到的大型崩滑体数量少、中小型崩滑体数量较多的现象是一致的。同时该趋势与 2008 年汶川地震、2017 年九寨沟地震和 2022 年泸定地震全域的同震滑坡面积频率分布趋势是一致的（铁永波等，2022），同震崩滑体的烈度分布规律与鲜水河断裂炉霍段地震崩滑体的分布规律一致，主要分布在

IX—X度区域（王东辉和田凯，2014）。但是由于研究区地质条件和尺度的差异，同震崩滑体面积频率的优势分布区间不同，湾东河流域内的优势分布区间为 750~2500 m²，该区间的值大于 2017 年九寨沟地震和 2022 年泸定地震全域，但是与 2008 年汶川地震相似。

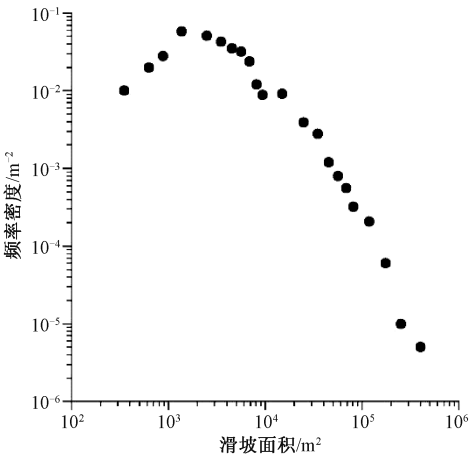


图 4 同震崩滑体密度分布图
Fig. 4 Density distribution map of the co-seismic landslides

4.2 同震崩滑体发育规律

同震崩滑体面积分布与距断层的距离、高程、坡度和坡向呈现强烈的相关性。通过 ArcGIS 空间叠加工具，统计了同震崩滑体面积和面积密度与距断层距离、高程、坡度和坡向之间的关系。震崩滑体面积密度指受崩滑体影响的面积的百分比，该指数被广泛用于同震崩滑体空间分布特征的分析（Xu and Xu, 2014; Xu et al., 2015）。下面将对每个因子进行分析。

（1）由同震崩滑体面积和面积密度与距断层距离的关系图（图 5）可见，同震崩滑体面积随距断层距离的增加呈现指数衰减的趋势。在湾东河流域内，同震崩滑体主要发生在距离断层 3 km 内的范围（同震崩滑体面积占总面积的 87%），且主要集中在距离断层 1 km 内的范围（同震崩滑体面积占总面积的 56%）。这表明随着距断层距离的增加，地震对斜坡稳定性的影响急剧减小，这与其他地区地震诱发崩滑体的分布规律一致（Pourghasemi et al., 2013; Tang and Van Westen, 2018）。

（2）同震崩滑体面积随高程增大呈现先增大后减小的趋势，并在 1400~2200 m 的区间出现了峰值。同时同震崩滑体面积密度呈现出同样的规律，这表明此次地震，湾东河流域内同震崩滑体主要分布在海拔 1400~2200 m 的范围。这与震源

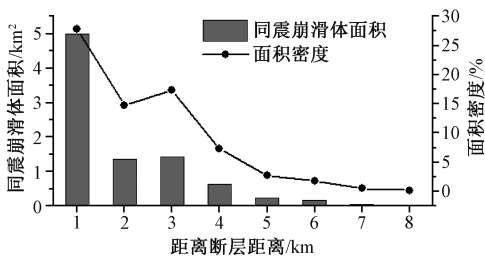


图 5 同震崩滑体面积及密度与距断层距离的关系统计图
Fig. 5 Graph of co-seismic landslide area and density vesus distance from fault

的位置和断层的分布是紧密相关的，断层投影到地面的海拔范围为 1300~2000 m，与同震崩滑体主要分布高程范围重叠，因此在湾东河流域，同震崩滑体面积呈现随高程增加先增大后减小的趋势的主要原因为距断层距离和高程叠加控制影响。

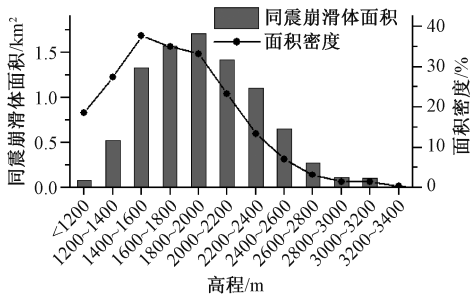


图 6 同震崩滑体面积及密度与高程的关系统计图
Fig. 6 Graph of co-seismic landslide area and density vesus elevation

（3）由同震崩滑体面积及密度与坡度的关系图（图 7）可以看出，同震崩滑体面积和面积密度随坡度的增加呈现先增大后减小的趋势。湾东河流域内的同震崩滑体面积峰值出现在 40°~45°，主要分布在坡度为 30°~50°的区域。这与汶川地震同震崩滑体分布规律一致，可能的原因是地形坡度由缓变陡的过渡转折部位对地震波有显著的放大效应（黄润秋和李为乐，2008; 刘铮等，2020）。

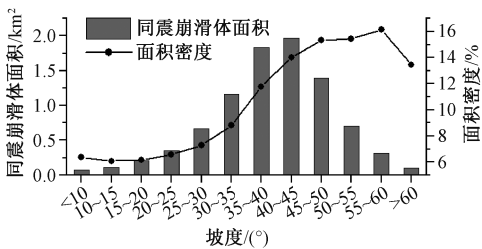


图 7 同震崩滑体面积与坡度的关系统计图
Fig. 7 Graph of co-seismic landslide area and density vesus slope steepness

(4) 由同震崩滑体面积及密度与坡向的关系图(图 8)所示,同震崩滑体面积及密度分布的主要坡向与地震传播方向一致。同震崩滑体的主要坡向为北东向、东向、南东向和南向,4 个坡向的崩滑体面积占总面积的 67%。同震崩滑体面积密度的主要坡向为南东向、南向、南西向和西向,4 个坡向的崩滑体面积占总面积的 62%。此次地震的发震断裂走向介于南东向和南向之间,这表明在地震波传播的背面坡的同震崩滑体面积及其密度远大于迎面坡一侧,即已有研究提出的“背面坡效应”(许强和李为乐,2010;辛鹏等,2017)。

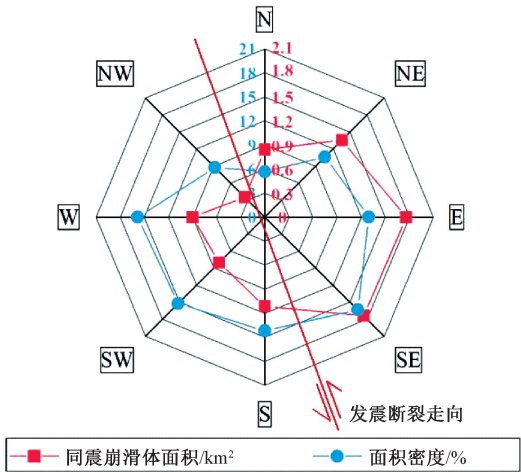


图 8 同震崩滑体面积及密度与坡向的关系雷达图
Fig. 8 Radar graph of co-seismic landslide area and density vesus aspect

4.3 同震崩滑体物源演变特征预测

同震崩滑体产生的碎屑物将成为震后湾东河泥石流的主要物源,主要通过侵蚀和搬运的形式发生演变。同震崩滑体产生了大量的松散碎屑堆积物,这些堆积物一部分堆积在山坡上,一部分堆积在沟道中。堆积在坡面上的松散碎屑物在降雨作用下极易发生失稳滑动,进入沟道后可能转化为泥石流。堆积在沟道中的松散碎屑物在降雨形成的径流作用下,极易被侵蚀冲刷,增加径流的含沙量和侵蚀能力,可能会引发“滚雪球”效应,最终形成泥石流(图 9)。

同震崩滑体产生的碎屑物稳定性将随时间而增加,主要表现为两个方面。一是表面植被恢复,增强了抗降雨侵蚀能力。其植被恢复的速率与碎屑物的岩土体性质和气候关系密切(Chen et al., 2022; Zhang et al., 2022),在震前研究区的植被覆盖度较高,因此区域气候和降雨有利于植被恢

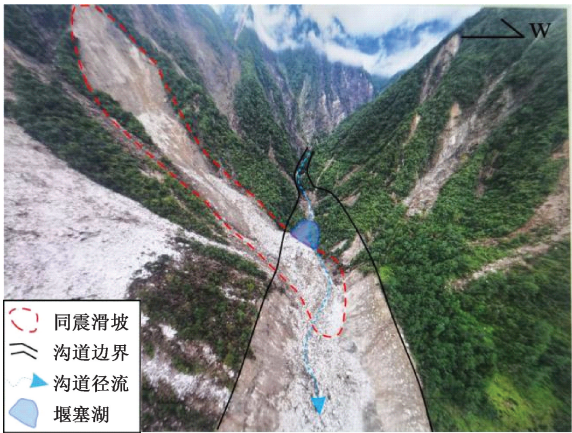


图 9 堆积在沟道中的同震崩滑体碎屑物
Fig. 9 The debris deposition of co-seismic landslides along the channel

复。二是在重力作用下,自身稳定性逐步恢复。但由于地震属性和岩性等差异,其稳定性恢复速率差异较大(Barth et al., 2020; Yunus et al., 2020)。震区的松散崩滑体基岩为强风化花岗岩,虽然岩体总体较为破碎,但碎石土的强度仍较大,相比其他震区的千枚岩、片岩等岩性区来说,泸定地震的松散土体恢复到震前所需的时间可能会相对更久。

5 震后泥石流活动性预测

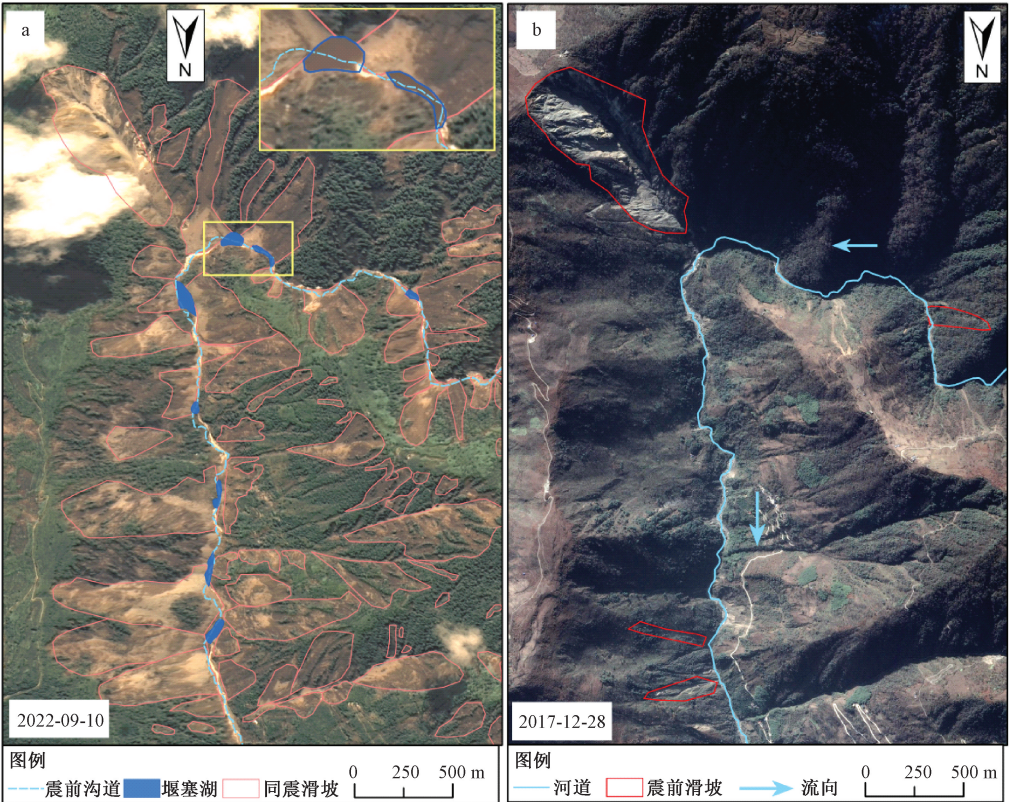
5.1 震后泥石流堵溃特征

震后湾东河流域具有暴发溃决型泥石流的条件。同震崩滑体发生后,产生的碎屑物堵塞河道,堰塞湖体积约 $6.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。12 小时后堰塞湖自然泄洪,但仍有部分堰塞水体存留。根据 2022 年 9 月 10 日的影像可知,湾东河流域下游共有 8 个堰塞湖(图 10)。其中最大的堰塞湖面积为 7592 m^2 ,最小的为 1576 m^2 ,总面积为 $2.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

流域内部分堰塞湖存留的原因为堰塞体孔隙度较大。由图 1 可知,该区域的岩体以石英闪长岩为主,另外根据现场无人机调查可知,同震崩滑体形成的堰塞体结构松散,孔隙度大。所以当堰塞湖水位达到一定高度,在水压力作用下形成渗流通道,发生泄洪。随着堰塞湖水位降低,水压力下降,最终堰塞体上游进水流量和下游渗流流量保持平衡。

5.2 震后泥石流冲出量计算

通过资料搜集、实地调查和影像解译,确定



a—地震后河道堵塞形成堰塞湖分布图（影像来源于高分6号）；b—地震前河道情况（影像来源于谷歌地图）

图 10 泸定地震震前和震后湾东河主沟下游滑坡发育及堰塞湖分布情况

Fig. 10 The distribution of co-seismic landslides and dammed lakes in the main downstream channel of the Wandong catchment pre and post the Luding earthquake

(a) The distribution of the dammed lakes formed by co-seismic landslides (The image is from GF6); (b) The state of the channel before the earthquake (The image is from Google Earth)

表 2 泥石流冲出量计算参数表

Table 2 Parameters of debris flow runoff

流域名称	容重/ (t/m ³)	堵塞系数
湾东河主沟	1. 80	4. 5
红岩沟	2. 15	3. 5
银厂沟	2. 15	3. 5

了震后泥石流冲出量参数（表 2）。根据流域内泥石流暴发历史和文献记录（余涛等，2008），湾东沟主沟为过渡性泥石流，支沟红岩沟和银厂沟为黏性泥石流，因此选取的湾东沟、红岩沟和银厂沟的泥石流容重参数分别为 1.8 t/m³、2.15 t/m³、2.15 t/m³。根据影像解译和实地调查，湾东沟主沟沟道曲率较大，且沟道宽窄不均，因此选定的震前堵塞系数为 2.5，通过对堰塞体提供的泥石流流体积累加反算，综合考虑支沟群发性泥石流对主河道的拥塞可能，得到震后湾东沟的堵塞系数为 4.5。支沟红岩沟和银厂沟沟道内存在多处崩滑体堵塞，参考《勘查规范》中的取值标准，选定红

岩沟和银厂沟的堵塞系数为 3.5。

根据泥石流冲出量计算参数，利用雨洪法得到了震后湾东河流域在不同降雨频率下泥石流冲出特征值（表 3）。其中堰塞湖溃决提供的一次冲出固体物质总量为 3.6×10⁵ m³。计算结果显示，震后湾东河流域内主沟具有暴发特大型泥石流规模的可能，其堰塞湖溃决提供的固体物质总量使震后泥石流冲出总量约是震前的两倍（震前为 3.2×10⁵~5.3×10⁵ m³，震后为 6.8×10⁵~8.9×10⁵ m³）。红岩沟和银厂沟可能暴发中型泥石流，具有堵断湾东河主沟的可能性。因此需要加强雨季期间的雨量预警，通过监测暴雨来预报泥石流，通过做好当地居民的群测群防，设计避让路线。一旦发生危险，及时组织居民转移。

5.3 震后泥石流活动演变特征

震后湾东河流域内支沟和主沟的泥石流活动性将增强。同震崩滑体产生的碎屑堆积物为泥石

表 3 震后湾东沟流域不同频率下泥石流特征值

Table 3 Characteristic values of debris flow at different frequencies in the Wandong catchment

参数	流域名称	降雨频率 $P/\%$			
		5	2	1	0.5
洪水洪峰流量/ (m^3/s)	湾东河	281	338	376	461
	红岩沟	92	106	117	139
	银厂沟	68	77	85	99
泥石流洪峰流量/ (m^3/s)	湾东河	1330	1600	1778	2178
	红岩沟	606	702	770	915
	银厂沟	451	512	558	652
一次冲出固体物质 总量/($\times 10^5 \text{ m}^3$)	湾东河	6.8 [*]	6.7 [*]	7.9 [*]	8.9 [*]
	红岩沟	1.5	1.7	1.9	2.3
	银厂沟	1.1	1.3	1.4	1.6

^{*} 假定主沟道内 8 个堰塞湖全部溃决, 可提供 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的固体物质

流提供了丰富的物源, 这些物源结构松散, 极易在降雨或径流冲刷条件下启动。汶川震后泥石流降雨阈值降低至震前泥石流的 1/3 (Zhou and Tang, 2014), 因此推测震后湾东河流域的泥石流降雨阈值将大幅降低, 其泥石流频率将增加。统计数据表明, 此次同震崩滑体产生了总面积约 $8.88 \times 10^6 \text{ m}^2$ 的碎屑物, 其中部分碎屑物将会直接参与后续的泥石流中, 因此震后湾东河流域的泥石流规模将增强。由于主沟中存在 8 个小型堰塞湖, 因此其发生溃决泥石流的可能性较高, 通过上文计算可知, 其规模可能达到震前的约两倍。随着流域内物源的迁移和坡面物源稳定性的增强, 泥石流的规模和频率将逐渐恢复到震前水平。但是恢复的时间与降雨、植被、物源迁移速率等相关, 需要后期持续的监测和研究。

6 结论与建议

通过野外调查、影像解译、空间统计和水文计算等方法, 分析了震后泥石流物源特征, 并预测了震后泥石流的危险性。主要认识如下:

(1) 同震崩滑体主要分布区域为地震烈度 IX 度区, 即湾东河流域的中下游, 同震崩滑体分布特点为沿主沟和支沟的两侧分布, 以中小型崩滑体为主;

(2) 同震崩滑体面积主要分布在距断层距离 1 km 的范围内, 且随距断层距离增加呈指数衰减, 表明距断层距离对同震崩滑体分布起控制作用; 同震崩滑体密度随坡度增加而增大, 且具有明显背向坡效应, 表明较陡的地形和地震传播方向对同震崩滑体的控制效应明显;

(3) 湾东河流域具有发生溃决型泥石流的条件, 且其冲出量可能是同等触发条件下震前泥石流的约两倍;

(4) 根据调查和分析结果, 建议加强对地震烈度 IX 度区的 (部分) 覆盖的流域进行重点排查, 并重点分析流域内的沟道堵塞点, 评估暴发溃决泥石流的可能性和危险性, 为震后泥石流灾害的防治提供科学参考。

References

BARTH S, GEERTSEMA M, BEVINGTON A R, et al. , 2020. Landslide response to the 27 October 2012 earthquake (M_w 7.8), southern Haida Gwaii, British Columbia, Canada [J]. Landslides, 17 (3): 517-526.

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 [J]. Landslides, 14 (5): 1783-1792.

CHEN M, TANG C, XIONG J, et al. , 2020. The long-term evolution of landslide activity near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. Geomorphology, 367: 107317.

CHEN M, TANG C, LI M W, et al. , 2022. Changes of surface recovery at coseismic landslides and their driving factors in the Wenchuan earthquake-affected area [J]. CATENA, 210: 105871.

CHEN S J, ZHENG X, WANG J B, et al. , 2020. Risk analysis of cascade landslide dam based on an approach of quick breach flood calculation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51 (3): 82-90. (in Chinese with English abstract)

China Association of Geological Hazard Prevention, 2018. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S]. Beijing, 4: 47-50. (in Chinese)

FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. , 2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts [J]. Reviews of Geophysics, 57 (2): 421-503.

FANG Q S, TANG C, 2016. Study on run-out amount of break and general debris flows in Wenchuan Earthquake area [J]. Journal of Catastrophology, 31 (1): 66-71. (in Chinese with English abstract)

GAO D D, WU Y, CHEN M, et al. , 2015. Baseflow separation and rainfall infiltration calculation of small watershed in Gongga mountain forest system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 24 (6): 949-955. (in Chinese with English abstract)

GE Y G, CUI P, ZHANG J Q, et al. , 2015. Catastrophic debris flows on July 10th 2013 along the Min River in areas seriously-hit by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 12 (1): 186-206.

- HUANG R Q, LI W L, 2008. Research on development and distribution rules of Geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (12): 2585-2592. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X, TANG C, 2017. Quantitative analysis of dynamic features for entrainment-outburst-induced catastrophic debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Engineering Geology, 25 (6): 1491-1500. (in Chinese with English abstract)
- LIN C W, SHIEH C L, YUAN B D, et al., 2004. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 71 (1-2): 49-61.
- LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. Research of dynamic response patterns of high steep rock slope under earthquake effects [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 115-124. (in Chinese with English abstract)
- NI H Y, 2016. Influence of rainfall patterns on debris flow initiation and critical rainfall condition [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 21-22. (in Chinese with English abstract)
- POURGHASEMI H R, JIRANDEH A G, PRADHAN B, et al., 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran [J]. Journal of Earth System Science, 122 (2): 349-369.
- SHE T, XIE H, WANG S G, et al., 2008. Characteristics and hazard assessment of Wandong river debris flow on east slope of Gongga mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 15 (3): 242-245. (in Chinese with English abstract)
- Sichuan Provincial Water Resources Department, 1984. Specification of rainstorm and flood calculation in medium and small catchments of Sichuan Province [M]. Chengdu: Sichuan Provincial Water Resources Department, 6: 8-17. (in Chinese)
- SONG Z, BA R J, LIU Y J, 2010. Analysis on blocking of the Dadu river by a giant debris flow of Moxi River: quantitative calculation of scale of a debris flow and flows of different frequencies by rain-flood method [J]. Journal of Catastrophology, 25 (2): 73-75. (in Chinese with English abstract)
- TANG C, ZHU J, DING J, et al., 2011. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 8 (4): 485-497.
- TANG C, VAN WESTEN C, 2018. Atlas of Wenchuan-earthquake geohazards [M]. Beijing: Science Press: 17-18.
- TANG C X, VAN WESTEN C J, TANYAS H, et al., 2016. Analysing post-earthquake landslide activity using multi-temporal landslide inventories near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16 (12): 2641-2655.
- TIE Y B, LI Z L, 2011. Characteristics of debris flow development and its environmental response in Moxi River basin [J]. Yangtze River, 42 (13): 40-43, 71. (in Chinese with English abstract)
- TIE Y B, ZHANG X Z, LU J Y, et al., 2022. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province [J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology, 49: 1-12 [2022-09-27]. <https://www.swdgcgdz.com/cn/article/doi/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209023>. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, TIAN K, 2014. Spatial distribution analysis of seismic landslides along Luhuo segment of Xianshuihe fault zone [J]. Journal of Engineering Geology, 22 (2): 292-299. (in Chinese with English abstract)
- XIAO X, LU C Y, WU X F, 2008. Debris flow disaster and prevention countermeasures in Wandong River, Luding County [C]. Chengdu: Sichuan Society of Civil Engineering and Architecture: 181-182. (in Chinese)
- XIN P, WU S R, ZHANG Z L, et al., 2017. Distribution characteristics and formation mechanism of landslides triggered by activities of Baoji-Wushan segment at the northern margin of western Qinling fault zone [J]. Journal of Geomechanics, 23 (5): 723-733. (in Chinese with English abstract)
- XIONG J, TANG C, TANG H, et al., 2022. Long-term hillslope erosion and landslide-channel coupling in the area of the catastrophic Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 305: 106727.
- XU C, XU X W, 2014. The spatial distribution pattern of landslides triggered by the 20 April 2013 Lushan earthquake of China and its implication to identification of the seismogenic fault [J]. Chinese Science Bulletin, 59 (13): 1416-1424.
- XU C, XU X W, SHYU J B H, 2015. Database and spatial distribution of landslides triggered by the Lushan, China Mw 6.6 earthquake of 20 April 2013 [J]. Geomorphology, 248: 77-92.
- XU Q, LI W L, 2010. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 18 (6): 818-826. (in Chinese with English abstract)
- YUNUS A P, FAN X M, TANG X L, et al., 2020. Decadal vegetation succession from MODIS reveals the spatio-temporal evolution of post-seismic landsliding after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Remote Sensing of Environment, 236: 111476.
- ZHANG H W, LIU F Z, WANG J C, et al., 2022. Hazard assessment of debris flows in Kongpo Gyamda, Tibet based on FLO-2D numerical simulation [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 306-318. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X Z, TANG C X, LI N, et al., 2022. Investigation of the 2019 Wenchuan County debris flow disaster suggests nonuniform spatial and temporal post-seismic debris flow evolution patterns [J].

Landslides, 19 (8): 1935-1956.

ZHOU W, TANG C, 2014. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China [J]. Landslides, 11 (5): 877-887.

附中文参考文献

陈淑婧, 郑轩, 王江波, 等, 2020. 基于快速连溃洪水计算的梯级堰塞湖风险分析 [J]. 水利水电技术, 51 (3): 82-90.

方群生, 唐川, 2016. 汶川 8.0 级地震震区溃决型和一般型泥石流冲出量研究 [J]. 灾害学, 31 (1): 66-71.

高东东, 吴勇, 陈盟, 等, 2015. 贡嘎山森林系统小流域基流分割与降雨入渗补给计算 [J]. 长江流域资源与环境, 24 (6): 949-955.

黄润秋, 李为乐, 2008. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 27 (12): 2585-2592.

黄勋, 唐川, 2017. 强震区侵蚀-溃决型泥石流的动力特性定量分析 [J]. 工程地质学报, 25 (6): 1491-1500.

刘铮, 李滨, 贺凯, 等, 2020. 地震作用下高陡岩质斜坡动力响应规律研究 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 115-124.

倪化勇, 2016. 泥石流发生雨型响应及其临界降雨条件 [D]. 成都: 成都理工大学: 21-22.

余涛, 谢洪, 王士革, 等, 2008. 贡嘎山东坡湾东河泥石流的特征及危险度评价 [J]. 水土保持研究, 15 (3): 242-245.

四川省水利电力厅. 1984. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册 [S]. 成都, 6: 8-17.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

宋志, 巴仁基, 刘宇杰, 2010. 磨西河特大型泥石流堵塞大渡河分析: 以一次泥石流规模、不同频率雨洪法流量定量计算 [J]. 灾害学, 25 (2): 73-75.

铁永波, 李宗亮, 2011. 磨西河流域泥石流发育特征及其环境响应分析 [J]. 人民长江, 42 (13): 40-43, 71.

铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等, 2022. 四川省泸定县 M_s 6.8 级地震地质灾害发育规律与减灾对策 [J/OL]. 水文地质工程地质, 49 (0): 1-12 [2022-09-27]. <https://www.swdzgcdz.com/cn/article/doi/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209023>.

王东辉, 田凯, 2014. 鲜水河断裂带炉霍段地震滑坡空间分布规律分析 [J]. 工程地质学报, 22 (2): 292-299.

肖翔, 卢钺昀, 武肖福, 2008. 泸定县湾东河泥石流灾害及防治对策 [C] //四川省土木建筑学会第 33 届学术年会论文集. 成都: 四川省土木建筑学会: 181-182.

辛鹏, 吴树仁, 张泽林, 等, 2017. 西秦岭北缘断裂宝鸡—武山段活动触发滑坡分布规律与成因机制 [J]. 地质力学学报, 23 (5): 723-733.

许强, 李为乐, 2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 18 (6): 818-826.

张浩韦, 刘福臻, 王军朝, 等, 2022. 基于 FLO-2D 数值模拟的工布江达县城泥石流灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 306-318.

中国地质灾害防治工程行业协会. 2018. 泥石流灾害防治工程勘查规范 (试行) [S]. 北京, 4: 47-50.

