

四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究

张宪政, 铁永波, 宁志杰, 杨昶, 李宗亮, 李明辉, 梁京涛, 卢佳燕, 鲁拓, 李光辉, 李果, 向炳霖

Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi catchment, Wenchuan County of Sichuan Province

ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, YANG Chang, LI Zongliang, LI Minghui, LIANG Jingtao, LU Jiayan, LU Tuo, LI Guanghui, LI Guo, and XIANG Binglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone
李明威, 唐川, 陈明, 史青云 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 182–190

西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征

Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet
高波, 张佳佳, 王军朝, 陈龙, 杨东旭 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 144–153

川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响

Characteristics and potential engineering perniciousness of the debris flow group in one station of the Sichuan–Tibet Railway
何坤, 胡卸文, 刘波, 周瑞宸, 席传杰, 韩玫, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 137–149

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density
黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161–168

西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究

Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China
刘波, 胡卸文, 何坤, 黄涛, 韩玫, 席传杰, 文强, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 150–160

德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County
王俊豪, 管建军, 魏云杰, 高培强, 梅傲霜, 张东伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 187–195



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307003

张宪政, 铁永波, 宁志杰, 等. 四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 134-145.

ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, *et al.* Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi catchment, Wenchuan County of Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 134-145.

四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究

张宪政^{1,2,3}, 铁永波^{1,2,3}, 宁志杰¹, 杨 昶^{1,4}, 李宗亮^{1,2,3}, 李明辉^{1,2,3}, 梁京涛⁵, 卢佳燕¹,
鲁 拓¹, 李光辉¹, 李 果¹, 向炳霖¹

- (1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 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, 北京 100037;
5. 四川省地质调查院, 四川 成都 610084)

摘要: 2023 年 6 月 26 日, 四川省阿坝州汶川县板子沟发生灾害性泥石流, 沟口冲出总量约 $8.28 \times 10^5 \text{ m}^3$, 堵塞岷江并形成面积约 0.4 km^2 的堰塞湖。为揭示汶川震后 15 a 仍发生特大型泥石流事件的内在成因机制, 采用现场调查、遥感解译、地形叠加分析与动力学参数计算等方法, 分析板子沟泥石流的成因和堵江特征, 并在此基础上提出防治建议。研究表明: (1) 板子沟泥石流触发降雨具有短历时高强度的特征, 泥石流以沟道物源启动为主; (2) 泥石流洪峰流量高达 $755.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 是导致堵塞岷江的主要原因; (3) 板子沟泥石流表明, 震后这类泥石流的活动性因物源耦合输移而具有滞后性和长期性特点。建议加强震区泥石流隐蔽型同震滑坡物源和沟道物源动态调查评估。研究结果有助于深化对震后泥石流活动性演变规律的认识, 并可为震后泥石流的防治提供科学参考。

关键词: 汶川县; 板子沟; 震后; 泥石流; 岷江; 堵江

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0134-12

Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi catchment, Wenchuan County of Sichuan Province

ZHANG Xianzheng^{1,2,3}, TIE Yongbo^{1,2,3}, NING Zhijie¹, YANG Chang^{1,4}, LI Zongliang^{1,2,3},
LI Minghui^{1,2,3}, LIANG Jingtao⁵, LU Jiayan¹, LU Tuo¹, LI Guanghui¹, LI Guo¹, XIANG Binglin¹
(1. Chengdu Center of China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610000, China;

收稿日期: 2023-07-02; 修订日期: 2023-07-08

投稿网址: www.swdggcdz.com

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

第一作者: 张宪政(1990-), 男, 博士后, 主要从事地质灾害演变规律和防治研究。E-mail: 2018010092@stu.cdut.edu.cn

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

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

4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. Sichuan Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610084, China)

Abstract: On 26 June 2023, a catastrophic debris flow occurred in the Banzi Catchment in Wenchuan county of Sichuan province. This debris flow event is a viscous debris flow triggered by short duration heavy rainfall. The volume of debris which transported out of the catchment by debris flow is more than $8.3 \times 10^5 \text{ m}^3$, and the debris flow blocked the Minjiang River. The river blockage formed a barrier lake with an area of about 0.4 km^2 . To reveal the formation mechanism of the occurrence of the extremely large debris flow events 15 years after the Wenchuan earthquake, This paper adopts a comprehensive method of field investigation, image interpretation, topographic superposition and calculation of forced vortex. This paper also analyzes the formation mechanism of debris flow and the characteristics of river blocking. Based on the results, this paper gives some suggestions of investigation and prevention of debris flow in the Banzi catchment. The research results show that (1) the triggering rainfall is characterized by short duration and high intensity. The main initiation positions are in the channel. The main debris supply is from the debris deposition along the channel. (2) The peak discharge of debris flow is as high as $755.5 \text{ m}^3/\text{s}$, which is the main cause of river blockage. (3) Since the Wenchuan earthquake, the debris flow activity of the Banzi Catchment has the characteristics of lag and long-term because of the coupled transport of debris on the slope and along the channel. (4) The volume of the debris source which can be eroded along the channel should be paid more attention in subsequent investigation and prevention. The research results are helpful in better understanding of the activity evolution of the post-seismic debris flow. They can also provide scientific references for the prevention of the post-seismic debris flow..

Keywords: Wenchuan county; Banzi Catchment; post-seismic; debris flow; Minjiang River; river blocking

大地震后, 同震滑坡为泥石流暴发提供了充足的松散固体物质^[1]。在强降雨形成的地表径流条件下, 这些固体物质极易被冲刷侵蚀, 导致震区遭受泥石流灾害的威胁急剧上升^[2-3], 往往给当地造成灾难性破坏^[4]。强震区泥石流还具有易引发堵江的特征^[5], 泥石流堵江诱发的堰塞湖和溃决洪水灾害进一步增加了泥石流事件的危险性^[6-8]。

强震区泥石流活动性一直是研究的热点。随着时间推移, 强震区泥石流的启动方式、物源补给和降雨特征会发生明显变化^[9]。汶川地震后的泥石流研究结果表明: 泥石流主要启动方式由坡面启动向沟道启动转变, 物源补给由以坡面物源补给为主向以沟道物源补给为主转变^[10-11], 触发降雨阈值先急剧下降而后呈现上升趋势, 但截至 2019 年仍未恢复到震前水平^[12-13]。

学者普遍认为强震后泥石流活动性整体呈现震荡衰减趋势^[14]。一般从 4 个方面对泥石流活动性进行分析: 一是基于多期遥感影像解译, 分析泥石流物源的活动性演变趋势^[15]; 二是基于多期多光谱影像, 利用植被归一化指数分析震后植被恢复过程^[16-17]; 三是基于长年流域输沙数据, 分析泥石流活动性^[18]; 四是

基于地震后泥石流事件库, 分析泥石流活动性演变趋势^[19-20]。不同分析方法得到的强震区泥石流活动性趋势大致相同, 但恢复到震前水平所需的时间仍是研究难点。

前期研究成果显示, 汶川县泥石流坡面物源活动在震后 12 a(2020 年)处于较低或基本稳定状态^[16, 21], 但汶川县 2019 年“8·20”群发性泥石流事件和 2023 年“6·26”板子沟泥石流事件表明, 汶川地震后泥石流活动性仍未恢复到震前水平。最新研究成果显示坡面物源向沟道物源的输移是汶川震后泥石流活动性持续的主要原因之一^[22], 但目前对物源耦合输移的定量研究相对较少。

2023 年 6 月 26 日 22 点左右, 四川省阿坝州汶川县绵虬镇突降暴雨, 板子沟发生泥石流。灾害导致 2 人遇难, 3 人失联, 多处道路被冲毁。泥石流冲入岷江形成堆积扇, 几乎堵断岷江并形成面积约 0.4 km^2 的堰塞湖。图 1 由调查人员拍摄于 6 月 27 日上午 9 点, 此时堰塞湖已溢流。为查明板子沟泥石流成因特征, 本文主要从启动位置、物源补给、降雨特征、动力特征和堵江等几方面进行分析, 并结合板子沟泥石流暴

发历史,讨论汶川地震 15 a 后暴发大规模泥石流的内在原因,以期震后泥石流的防治提供科学参考。



图 1 板子沟泥石流堆积扇 (拍摄于 2023 年 6 月 27 日)

Fig. 1 Debris fan of the Banzi catchment (taken on 27 June, 2023)

1 研究区概况

板子沟位于汶川县西南方,距离汶川县城约 10 km (图 2)。该区域位于青藏高原与四川盆地间的龙门山断裂带,构造作用强烈^[23]。下游有 2 条断层穿过,沟口为汶川—茂县断层(WMF)。汶川—茂县断层是 2008 年汶川地震时主要活动断层之一,走向为 N25°~E45°。汶川地震在流域内诱发了大量同震滑坡,为泥石流提供了丰富的固体物质。板子沟出露的岩性较简单,流域中上游出露的岩性主要为中元古代斜长花岗岩。

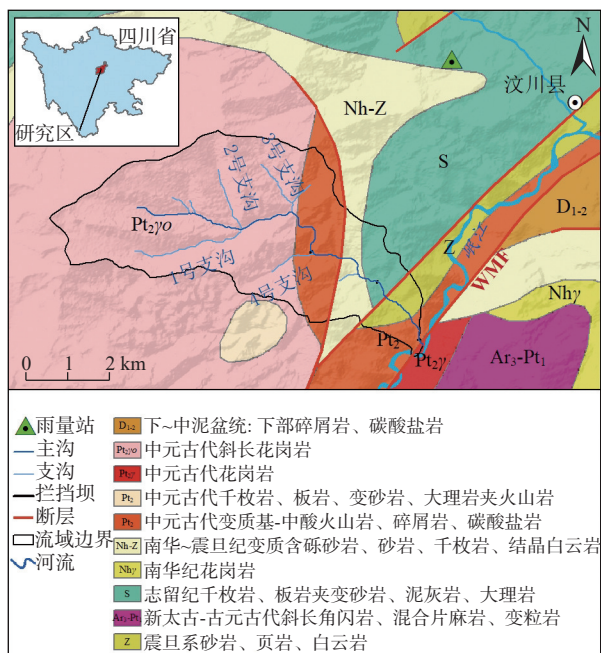


图 2 研究区地质图

Fig. 2 Geological overview of the study area

流域下游出露的岩性主要为中元古界碳酸盐岩、震旦系变质岩砂岩和白云岩。第四系崩坡积层和泥石流堆积层在整个流域内均有分布。

板子沟流域面积为 54.7 km²,主沟道长度为 14.1 km,流域相对高差 4 000 m,主沟纵比降 206‰。板子沟地形以崎岖山脉为主,主要坡度范围为 30°~50°,平均 36°。流域地貌属构造侵蚀深切切割中高山地貌。流域平面呈阔叶状,沟道平面形态呈“树枝状”,沟内常年有水。板子沟流域内发育 4 条较大支沟,其中 2 条支沟位于主沟北部,2 条支沟位于主沟南部。主沟横断面由上至下由“V”字型逐渐过渡为“U”字型。

根据现场调查和前期勘查资料^[24]可知,板子沟历史上共暴发过 3 次泥石流(1982—2023 年)。第一次为 2008 年汶川地震前的 1982 年。第二次为汶川地震后 11 a 的 2019 年 8 月 20 日,在强降雨条件下暴发了泥石流,冲出总量约 6.9×10⁵ m³^[25-26];泥石流冲毁了沟口的格栅坝和导流堤,并对沟口房屋和道路造成了灾难性损失。次年在沟内修建了防治工程,包括 3 个拦挡坝、防冲墙和导流堤。时隔 4 a 的 2023 年 6 月 26 日,在强降雨条件下板子沟再次暴发泥石流,冲出总量约 8.28×10⁵ m³。泥石流淤满 1 号拦挡坝,2 号和 3 号拦挡坝被损坏。同时泥石流冲入岷江形成堰塞坝,导致上游被堰塞湖淹没。图 3 展示了泥石流成灾特征,泥石流共损坏建筑物 8 间,损坏道路 1.4 km。本次泥石流堵江形成的堰塞湖,淹没面积为 0.4 km²,淹没长度达 3.4 km。

2 数据与方法

本文用到的数据包括岩性数据、地形数据、影像数据和现场调查数据,具体如表 1 所示。

本文采用的方法主要有影像解译、地形叠加计算、弯道超高计算和容重反算。

影像解译方法用于获取泥石流坡面物源数据。泥石流发生前影像来自 Planet 的 2023 年 5 月 24 日卫星影像,分辨率为 3 m;泥石流发生后的影像来自 Planet 的 2023 年 6 月 27 日和 2023 年 7 月 1 日卫星影像,分辨率为 3 m。

地形叠加分析方法主要用于获取泥石流侵蚀/堆积深度数据。该方法基于泥石流发生前后的地形数据,地形数据来源于无人机测量。2 期地形数据时间分别为 2019 年 10 月 16 日和 2023 年 6 月 27 日,分辨率为 0.1 m。2 期数据经过空间校准和高程校准后,利用 GIS 工具将数据叠加计算,最终得到泥石流侵蚀/堆

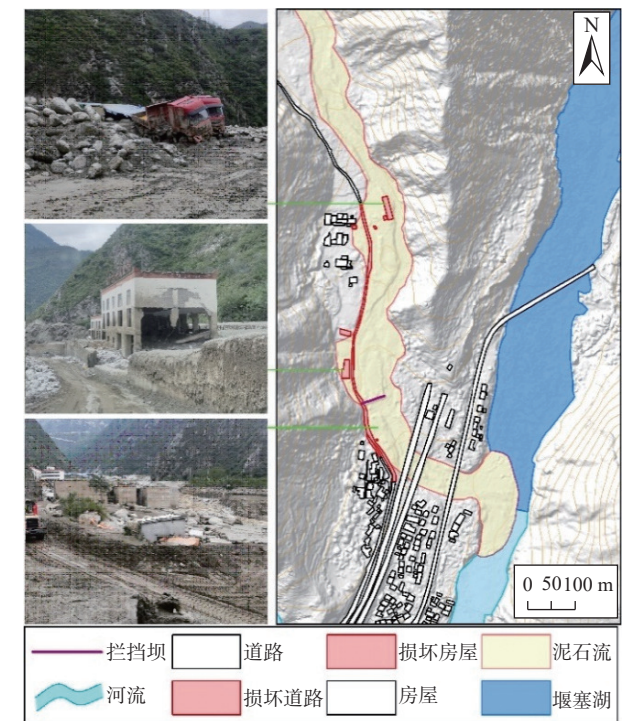


图3 板子沟泥石流成灾特征图(拍摄于2023年6月29日)
Fig. 3 Loss characteristic of debris flow in the Banzi catchment (taken on 29 June, 2023)

表1 数据清单
Table 1 Data list

数据类型	分辨率	来源
岩性数据	1:5万	中国地质调查局成都地质调查中心
高程数据	30 m	ALOS全球数字地表模型
地表高程(DSM)	0.1 m	无人机测量, 日期: 2019-10-16, 2023-06-27
卫星影像数据	3 m	Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. https://api.planet.com . 日期: 2023-05-24, 2023-06-27, 2023-07-01
全色影像	0.1 m	无人机测量, 日期: 2019-10-16, 2023-06-27
2008年同震滑坡分布数据	2.5 m	徐冲等公开数据 ^[27]

积深度分布数据。

弯道超高计算方法被广泛用于计算泥石流洪峰流速^[28-29]。文章选取 Scheidl 等^[30]提出的适用于次临界流和超临界流的弯道超高方程计算流速, 图4为方程涉及到的计算参数示意图。公式如下:

$$V = \sqrt{\frac{R_c g \cos \theta_c \Delta h}{BC}} \quad (1)$$

式中: V ——泥石流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
 g ——重力加速度, 值为 9.8 m/s^2 ;
 θ_c ——沟道坡度/($^\circ$);
 B ——沟道宽度/m;
 Δh ——弯道超高高度/m;
 C ——经验修正因子, 计算公式如下:

$$C = \left(\frac{Bh}{R_c \Delta h} \right)^{1.46} 4.4^{2.46} \quad (2)$$

式中: R_c ——沟道中心曲率半径/m;
 h ——泥石流平均高度/m。

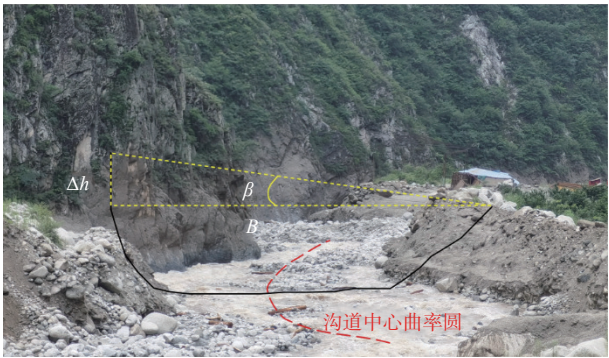


图4 弯道超高计算参数示意图
Fig. 4 Definition of the geomorphometric parameters for the forced vortex equation

为获取泥石流容重数据, 文章采用沉积物颗粒粒径反算容重(γ_D)的方法^[31], 该方法被广泛用于泥石流容重计算^[32-33]。公式如下:

$$\gamma_D = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_0 \quad (3)$$

式中: P_{05} ——小于 0.05 mm 的细颗粒的百分含量(小数表示);

P_2 ——大于 2 mm 的粗颗粒的百分含量(小数表示);

γ_v ——黏性泥石流的最小容重, 值为 2.0 g/cm^3 ;

γ_0 ——泥石流的最小容重, 值为 1.5 g/cm^3 。

3 结果

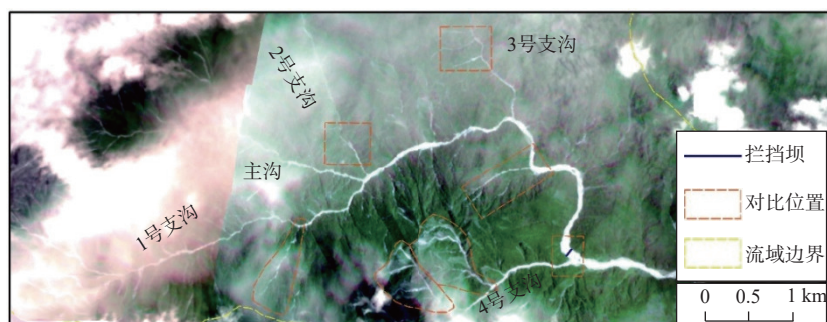
3.1 启动特征

本次板子沟的主沟和支沟均有泥石流启动。通过泥石流暴发前后的影像(图5)对比可知, 1号、3号和4号支沟内, 坡面侵蚀沟出现了明显的冲刷启动痕迹, 表明本次泥石流的主要启动位置位于坡面侵蚀沟。主沟上游和2号支沟由于云层覆盖, 未观察到坡面侵蚀沟启动现象。但在主沟沟道和2号支沟沟道内发现了明显的泥石流侵蚀痕迹, 这表明主沟上游和2号支沟上游同样有泥石流启动。综上可知, 本次板子沟的主沟和4条支沟均有泥石流启动, 启动位置主要为坡面侵蚀沟, 启动机制为强降雨形成的地表径流侵蚀沟道内的松散固体物质, 进而产生“滚雪球”效应, 形成泥石流。

裸露的高陡基岩面为沟道径流侵蚀启动提供了有利条件。由图6(a)可知, 4号支沟顶部分布大量基



(a) 2023年5月4日影像



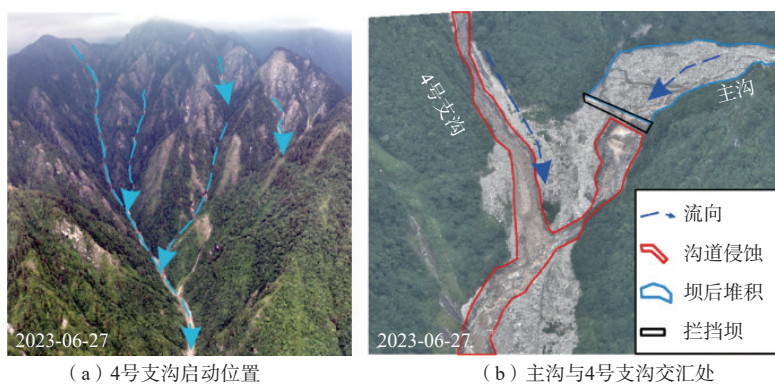
(b) 2023年7月1日影像

图 5 泥石流前后影像对比图

Fig. 5 Comparison of images before and after debris flow

岩裸露面,在裸露面下方为侵蚀沟。基岩裸露面有利于在降雨条件下快速产流,且坡度较陡,可为径流提供足够势能。泥石流在多条侵蚀沟内启动,随后汇入4号支沟,流量进一步增大,对4号支沟的沟床底部沉

积物进行强烈冲刷侵蚀。图 6(b)展示了4号支沟下游沟道强烈侵蚀痕迹。裸露的高陡基岩面为沟道径流侵蚀启动提供了有利条件,是导致4号支沟发生沟道径流侵蚀启动的主要原因之一。



(a) 4号支沟启动位置

(b) 主沟与4号支沟交汇处

图 6 板子沟 4 号支沟启动位置及与主沟交汇处侵蚀堆积特征

Fig. 6 Initiation positions in the No. 4 branch channel of Banzi catchment and the characteristic of erosion at the intersection of the main channel and the No. 4 branch channel

3.2 物源分布

板子沟坡面物源主要分布在流域上游。图 7(a)(b)分别展示了板子沟 2023 年物源分布和 2008 年同震滑坡分布。由图可知,板子沟物源主要分布于流域上游,沿主沟和支沟沟道两侧分布。坡面物源总面积

为 2.0 km^2 , 其中约 0.6 km^2 与 2008 年同震滑坡空间位置重合,沟道物源总面积为 0.7 km^2 。根据现场调查可知,坡面物源多以浅表层侵蚀为主,这些物源顶部多为陡立基岩,植被覆盖差。通过与 2008 年同震滑坡叠加可知,本次泥石流启动位置所在的侵蚀沟,与 2008

因地形、海拔等因素,山区的降雨时空差异性通

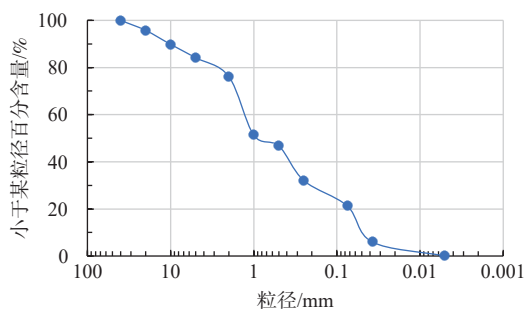


图 10 泥石流堆积区取样粒度分布

Fig. 10 Sampling particle size distribution in the debris deposition area

常较大。本次泥石流事件的降雨数据来源于周边雨量站,距离研究区约 5.7 km,其位置见图 2,与图 7 中启动位置相对高差为 500~1 350 m。根据中国气象信息中心提供的网格累计降水数据可知,该雨量站记录的降雨量可能小于研究区实际降雨量。因此以下降雨特征为基于该雨量站数据的初步分析结果。

雨量站记录了每小时降雨量。数据显示 2023 年 6 月 23 日 20 点—2023 年 6 月 26 日 19 点无降雨。2023 年 6 月 26 日 20 点降雨开始,21—22 点之间记录到 12.6 mm/h 的降雨强度,此时累计降雨量为 18.4 mm (图 11)。据现场目击者称,板子沟泥石流暴发时间为 6 月 26 日 22 点左右。因此根据降雨数据推测,本次泥石流为短历时强降雨诱发。

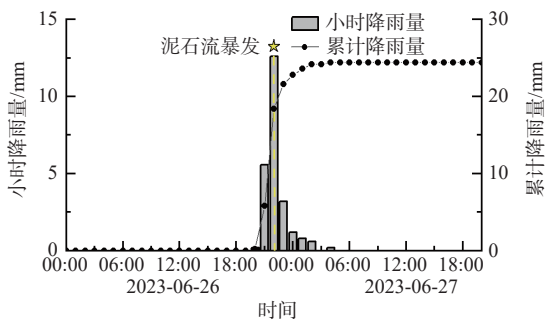


图 11 研究区泥石流暴发降雨特征

Fig. 11 Characteristics of the triggering rainfall in the study area

4.2 沟道物源补给分析

板子沟沟道以侵蚀为主,堆积主要发生在拦挡坝后和沟口。图 12 展示了板子沟中下游沟道侵蚀堆积分布。由图 12(a)可知,沟道以侵蚀为主,平均侵蚀深度为 4.9 m,最大侵蚀深度可达 10 m。在沟道的两侧,分布有少量泥石流堆积,推测为泥石流漫溢出沟道形成的堆积。

图 12(b)中显示拦挡坝后堆积分布,堆积主要分

布在拦挡坝的右侧,平均深度为 5.1 m,最大深度可达 10.6 m。拦挡坝后左侧为滑坡堆积体。图中显示 2019—2023 年为堆积状态,最大堆积深度达 12 m。这表明 2019 年后该滑坡发生了活动,且大量滑坡碎屑物堆积在坡脚。拦挡坝的右侧被泥石流冲毁,但保留部分坝基。泥石流在坝后形成拉槽式侵蚀沟道,在坝前出现强烈下切侵蚀。

由图 12(c-1)可知,沟道右侧为条状堆积,堆积深度 8~12 m。通过现场调查可知,该堆积体为 2019 年后沟道清淤临时堆积,图 12(c-2)为该堆积体的全景照。通过测量可知,堆积体厚度约 9 m,体积约 $9.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。沟道左侧为侵蚀状态,侵蚀深度 3~6 m。

由图 12(d)可知,拦挡坝后的左侧原沟道被泥石流淤满,堆积深度最大为 6 m。拦挡坝前到沟口,泥石流主要以堆积为主,主要原因为该段沟道坡度相对较小,宽度相对较大。泥石流运动到该段时,流速降低,携裹固体物质的能力变弱,少部分固体物质在该段沉积。大部分的泥石流冲出沟口,并形成了堆积扇。

4.3 动力学特征分析

泥石流动力学特征包括泥石流的体积、流速、洪峰流量和堵江特征,下面将详细介绍每种特征的计算分析结果。

通过地形叠加计算可知,泥石流堆积扇体积约为 $2.73 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。图 13 展示了板子沟泥石流堆积扇的形态及剖面图,由图可知,2023 年 6 月 26 日泥石流事件中,泥石流堆积扇投影面积为 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。堆积扇覆盖于 2019 年 8 月 20 日泥石流堆积扇之上,平均深度约 6 m,最深处约 10 m。通过地形叠加计算可知,堆积扇体积约 $2.73 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

泥石流冲出固体物质总量约 $8.28 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。利用 GIS 工具对沟道物源侵蚀堆体积进行统计可知,1 号坝至沟口段,沟道内固体物质被侵蚀体积为 $6.95 \times 10^5 \text{ m}^3$,沟道内堆积体积为 $2.52 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。沟口堆积扇处,泥石流的堆积体积为 $2.73 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。根据 1 号坝体的设计参数和坝前影像估算,泥石流发生前剩余库容约 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。根据 4 号支沟沟口侵蚀深度估算,4 号支沟的侵蚀体积约 $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。因此,通过统计可知,本次泥石流事件中,泥石流搬运固体物质总体积约为 $1.18 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中沟道内堆积固体物质总体积为 $3.52 \times 10^5 \text{ m}^3$,冲出沟口的物质总体积为 $8.28 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。沟口堆积扇体积小

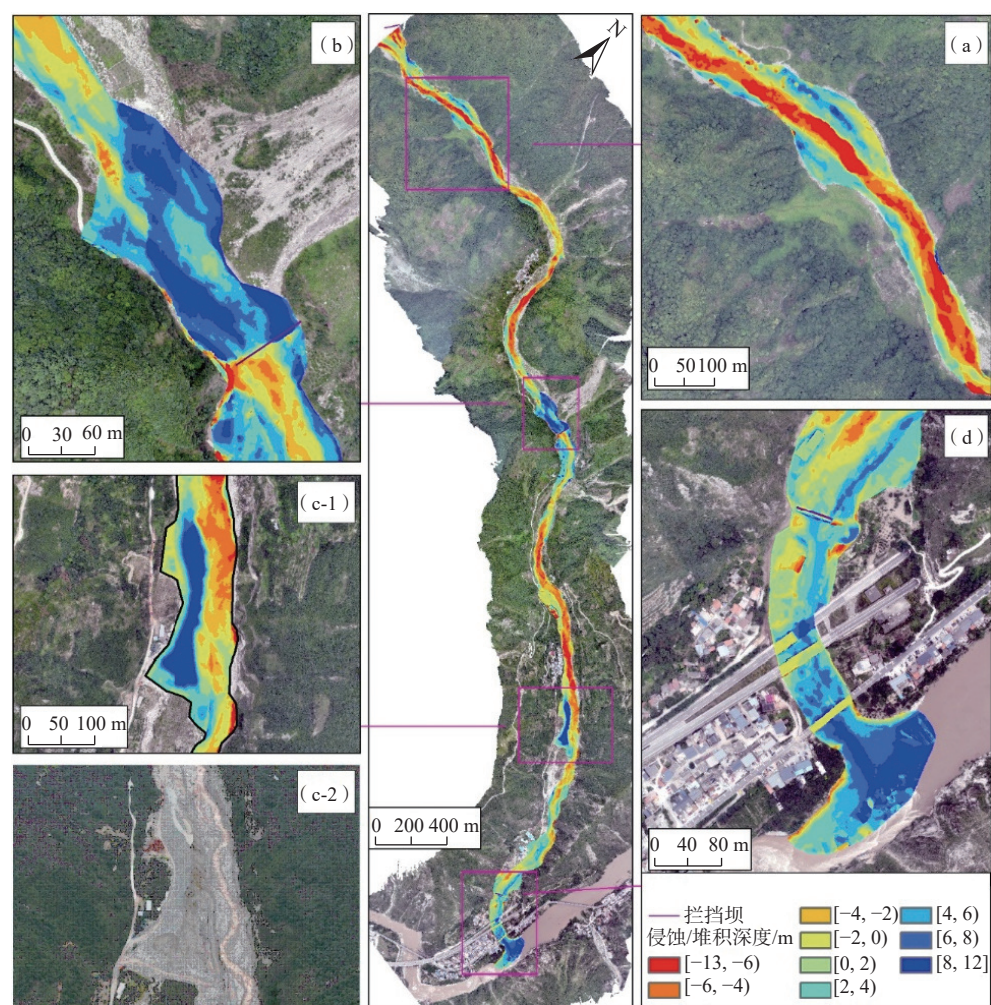


图 12 泥石流沟道侵蚀堆积分布图

Fig. 12 Distribution map of the erosion and deposition along the channel

内可见明显固体物质堆积。

现场测量 2 个弯道超高断面(图 14), 用于反算泥石流流速和洪峰流量。计算结果(表 2)显示, 2 个剖面处泥石流洪峰流量的平均值为 $755.5\text{ m}^3/\text{s}$; 流速在沟道相对宽缓处为 2.7 m/s , 在沟道相对狭窄处为 5.3 m/s 。通过现场测量可知, 泥石流搬运的巨石直径超过 2.5 m (图 15)。

4.4 堵江过程分析

综合考虑泥石流流速、容重、径流持续时间和河道响应特征等因素, 按照交汇口的动力过程, 本次板子沟泥石流堵江模式属于推进模式^[35]。推进模式指泥石流流体胁迫主河水流, 占据河道向前推进^[36]。岷江下游进入紫坪铺水库, 水库在 2012 年至 2020 年 6 月份的平均入库流量为 $881\text{ m}^3/\text{s}$ ^[37]。根据紫坪铺水库的上游流域面积估算, 在板子沟沟口位置, 岷江的流量约为 $751\text{ m}^3/\text{s}$ 。

泥石流峰值流量为 $755.5\text{ m}^3/\text{s}$, 与岷江流量相差不大, 是引发板子沟泥石流推进式堵江的主要原因。因此当泥石流与岷江交汇时, 岷江对泥石流的主要作用为阻止泥石流前进, 泥石流中固体物质沉积下来形成堆积扇。随着后续泥石流到达, 泥石流不断压迫岷江, 岷江流速逐渐增大, 侵蚀力增强, 此时岷江对泥石流的主要作用为冲刷侵蚀, 兼有阻力作用。由于板子沟固体物质冲出总体积达 $8.28\times 10^5\text{ m}^3$, 最终泥石流几乎完全占据岷江河道, 成为天然堰塞坝, 上游形成堰塞湖。

4.5 讨论

汶川地震 15 a 后, 原低频泥石流活动性显著升高。在 2019 年 8 月 20 日的群发性泥石流事件中, 板子沟、登溪沟、下庄沟等低频泥石流沟暴发泥石流, 在 2023 年 6 月 26 日泥石流事件中, 板子沟、新桥沟等低频泥石流沟暴发泥石流, 其中板子沟在汶川地震

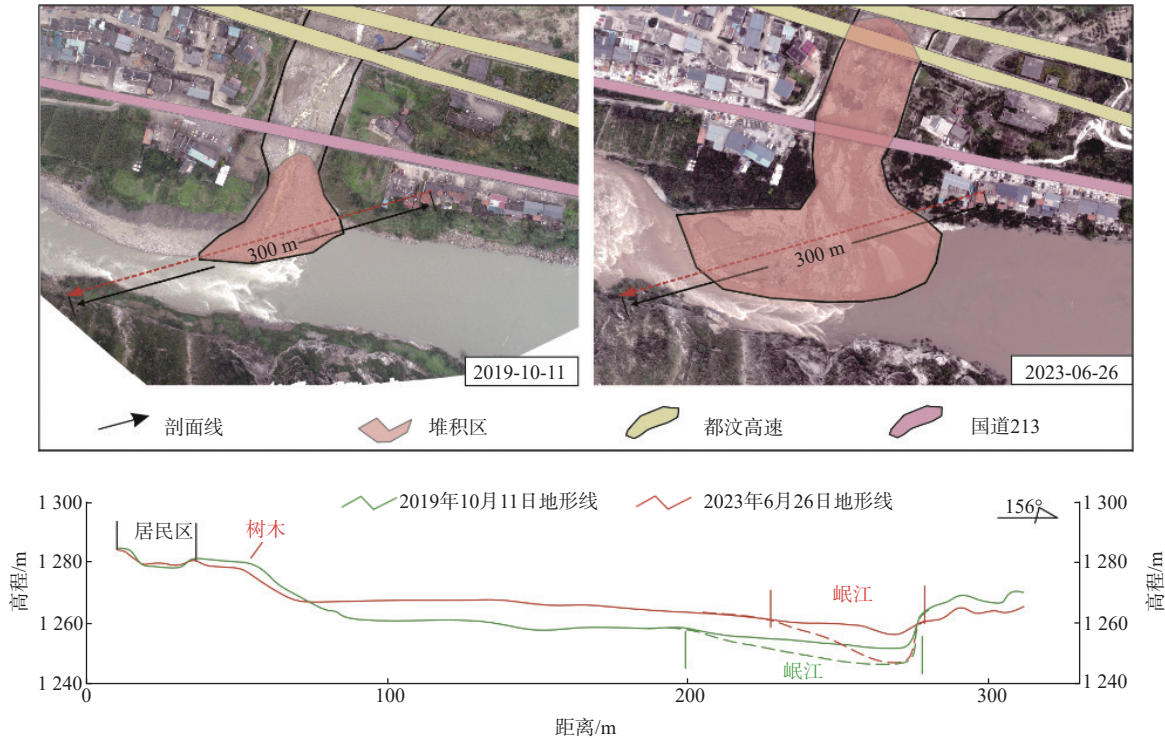


图 13 堆积扇形态及剖面图

Fig. 13 Shape and the profiles of debris fans

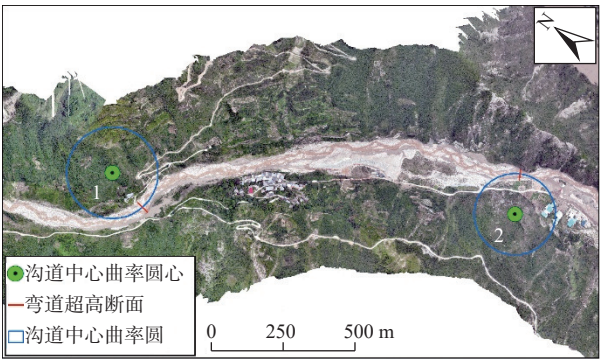


图 14 弯道超高断面分布图

Fig. 14 Distribution of profiles used for the calculation of forced vortex

15 a 内暴发 2 次泥石流。这些事件表明原低频泥石流沟活动性显著升高。

物源耦合输移是板子沟在汶川地震 15 a 内 2 次暴发泥石流的主要原因之一。物源耦合输移是指泥石流流域内坡面物源和沟道物源耦合转化运移的过

程。即坡面物源在降雨和重力作用下运移到沟道并沉积,变为沟道物源,随后沟道物源再被径流侵蚀搬运出沟口。2023 年泥石流主要物源补给以沟道侵蚀为主,该结论与 2019 年板子沟泥石流物源补给特征一致^[26]。前期研究表明,汶川县植被覆盖正逐步恢复到震前水平^[38],但是板子沟汇水区分布大量基岩裸露面,不利于植被恢复。汶川地震后,在降雨和重力作用下同震崩滑体逐步输移到沟道中,并在沟道宽缓处沉积变为沟道物源^[7]。当沟道物源积累到一定阈值时,可在强烈径流侵蚀作用下启动形成泥石流。

相比汶川县南部泥石流流域,板子沟泥石流活动性具有滞后性特征。滞后性指汶川县南部流域的泥石流高发期在震后约 5 a 之内,而板子沟泥石流在震后 11 a 开始活动。滞后性的原因可以从以下几方面考虑:一是相比于汶川县南部,板子沟流域内同震滑坡密度相对较小,即地震提供的同震滑坡物源量较少;二是相比于汶川县南部,板子沟所在区域降雨量相对较小,

表 2 泥石流洪峰流量计算参数及结果

Table 2 Calculation parameters and results of peak flow of debris flow									
编号	沟道宽度/m	泥石流平均高度/m	沟道转弯率半径/m	超高高度/m	沟道坡度/(°)	经验修正因子	泥石流流速/(m·s ⁻¹)	过流断面面积/m ²	泥石流流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	48.9	5.8	167.0	3.2	0.08	14.8	2.7	281.7	762.7
2	29.0	4.9	139.0	3.6	0.07	6.1	5.3	142.1	748.2



图 15 泥石流搬运直径超过 2.5 m 的巨石照片

Fig. 15 Photography showing the largest blocks deposited on the fan exceeded a diameter of 2.5 m

这导致坡面物源向沟道物源输移速率相对较低;三是板子沟流域面积大、沟道长而曲折,小规模泥石流通常会停留在沟道较宽缓处,在汶川县彻底关沟观察到了该现象^[39]。因此可以推断,在震后 11 a 内,板子沟处于沟道物源积累阶段,随着坡面物源不断向沟道内转移,沟道物源达到临界阈值时,即具备了暴发灾害性泥石流的物源条件。

板子沟泥石流活动性具有长期性特征。长期性指板子沟泥石流活动性可能会持续十几年以上的时间。判断为长期性的主要依据为板子沟泥石流的物源分布和补给特征:1)板子沟沟道内分布大量松散堆积物,这些堆积物为后期泥石流的主要补给物源;2)目前板子沟主要坡面物源为浅层侵蚀沟,侵蚀沟上方通常为地震导致的高陡基岩裸露面,这些基岩面在十几年内很难恢复植被,良好产流条件将长期存在,因此坡面物源将在很长一段时间内继续输移到沟道中,转化为沟道物源;3)坡面物源具有隐蔽性,虽然大部分同震崩滑体植被覆盖已恢复,但仍有被径流侵蚀启动的可能,如本次泥石流事件中的 1 号支沟,这表明已被植被覆盖的同震崩滑体抗侵蚀能力依然较差,且具有隐蔽性。

针对汶川震后 15 a,原低频泥石流活动性显著升高的流域,本文提出以下建议:1)建议重点对全流域沟道物源进行动态调查,加强物探方法的应用,以降低对震后地表植被恢复带来的“隐性”泥石流物源的误判;2)开展已有防治工程的防灾效果再评估,新增防治工程设计需参照历史最大规模泥石流事件校核其动力学参数;3)加强对山区微小河流域上游无人区、无信号区的气象监测,精准预报上游暴雨引发的泥石流过程,增加对下游危险区泥石流预警的时间提前量;4)加强泥石流堵江链式灾害风险的预判与应急预案制定,建立泥石流发生时撤离人员返回危险区的管控机制。

5 结论

(1)板子沟泥石流的触发降雨具有高强度和短历时特点,该类型降雨在短时间内通过地表径流快速汇集后形成沟道洪水,为泥石流启动提供水动力条件。

(2)板子沟泥石流以沟道物源启动为主,具有典型的水力类泥石流形成过程特征,在汶川震区特大型泥石流事件中具有典型性。

(3)此次泥石流冲出规模为 $8.28 \times 10^5 \text{ m}^3$,流体性质为黏性泥石流,洪峰流量高达 $755.5 \text{ m}^3/\text{s}$,接近主河岷江流量是导致泥石流堵江的主要原因。

(4)降雨量随海拔高程变化大导致微小流域下游小雨、上游大雨并诱发泥石流的情况在四川山区极为普遍,其隐蔽性和致灾性极强,此次板子沟泥石流就极为典型。下一步需加强对微小流域天气动态监测,解决通达条件和信号传输差的山区泥石流精准预警难题。

鉴于目前板子沟流域内仍有大量松散物源分布,还具备发生大型泥石流的条件,建议加强对震区已有防治工程且人口密集区泥石流物源的动态调查评估,加强对震区泥石流防治工程维护和河道疏浚,最大程度降低泥石流灾害风险。

参考文献 (References) :

- [1] TANG Chuan, ZHU Jing, LI Weile, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 187–194.
- [2] CHEN Ming, TANG Chuan, ZHANG Xianzheng, et al. Quantitative assessment of physical fragility of buildings to the debris flow on 20 August 2019 in the Cutou gully, Wenchuan, southwestern China[J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106319.
- [3] TANG Chenxiao, LIU Xinlei, CAI Yinghua, et al. Monitoring of the reconstruction process in a high mountainous area affected by a major earthquake and subsequent hazards[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, 20(4): 1163–1186.
- [4] TANG Chuan, ZHU Jing, DING Jun, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake[J]. *Landslides*, 2011, 8(4): 485–497.
- [5] GUO Xiaojun, CUI Peng, MARCHI L, et al. Characteristics of rainfall responsible for debris flows in Wenchuan earthquake area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(17): 596.

- [6] 崔鹏, 韩用顺, 陈晓清. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 35 – 42. [CUI Peng, HAN Yongshun, CHEN Xiaoqing. Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 35 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 $M_s6.8$ 级地震地质灾害发育规律与减灾对策 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 1 – 12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the $M_s6.8$ earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [8] LI Yan, HU Wei, WASOWSKI J, et al. Rapid episodic erosion of a cohesionless landslide dam: Insights from loss to scour of Yangjia Gully check dams and from flume experiments[J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105971.
- [9] FAN Xuanmei, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421 – 503.
- [10] DOMÈNECH G, FAN Xuanmei, SCARINGI G, et al. Modelling the role of material depletion, grain coarsening and revegetation in debris flow occurrences after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2019, 250: 34 – 44.
- [11] ZHANG Shuai, ZHANG Limin. Impact of the 2008 Wenchuan earthquake in China on subsequent long-term debris flow activities in the epicentral area[J]. *Geomorphology*, 2017, 276: 86 – 103.
- [12] YANG Fan, FAN Xuanmei, SUBRAMANIAN S S, et al. Catastrophic debris flows triggered by the 20 August 2019 rainfall, a decade since the Wenchuan earthquake, China[J]. *Landslides*, 2021, 18(9): 3197 – 3212.
- [13] ZHU Jing, TANG Chuan, CHANG Ming, et al. Field observations of the disastrous 11 July 2013 debris flows in Qipan gully, Wenchuan area, southwestern China[C]//Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Cham: Springer, 2015: 531 – 535.
- [14] DAI Lanxin, SCARINGI G, FAN Xuanmei, et al. Coseismic debris remains in the orogen despite a decade of enhanced landsliding[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(19): e2021GL095850.
- [15] TANG Chenxiao, VAN WESTEN C J, TANYAS H, et al. 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*, 2016, 16(12): 2641 – 2655.
- [16] 李明威, 熊江, 陈明, 等. 汶川震区植被恢复与同震滑坡活动性动态演化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 182 – 192. [LI Mingwei, XIONG Jiang, CHEN Ming, et al. Vegetation restoration and dynamic evolution analysis of landslide activity in the Wenchuan earthquake area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 182 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [17] YUNUS A P, FAN Xuanmei, TANG Xiaolu, et al. Decadal vegetation succession from MODIS reveals the spatio-temporal evolution of post-seismic landsliding after the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111476.
- [18] HOVIUS N, MEUNIER P, LIN C W, et al. Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 347 – 355.
- [19] YANG Yu, TANG Chenxiao, TANG Chuan, et al. Spatial and temporal evolution of long-term debris flow activity and the dynamic influence of condition factors in the Wenchuan earthquake-affected area, Sichuan, China[J]. *Geomorphology*, 2023, 435: 108755.
- [20] ZHANG Xianzheng, TANG Chenxiao, LI Ning, et al. Investigation of the 2019 Wenchuan County debris flow disaster suggests nonuniform spatial and temporal post-seismic debris flow evolution patterns[J]. *Landslides*, 2022, 19(8): 1935 – 1956.
- [21] 王晓迪. 汶川地震三大片区崩滑堆积体植被恢复研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020. [WANG Xiaodi. Research on vegetation restoration of landslide in three area of Wenchuan Earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [22] XIONG Jiang, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. How landslide sediments are transferred out of an alpine basin: Evidence from the epicentre of the Wenchuan earthquake[J]. *CATENA*, 2022, 208: 105781.
- [23] 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等. 青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(2): 151 – 175. [PAN Guitang, WANG Liquan, YIN Fuguang, et al. Researches on geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau: A review, recent advances, and directions in the future[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(2): 151 – 175. (in Chinese with English abstract)]

- [24] 郭孟周. 汶川县绵虬镇板子沟村 2 组板子沟泥石流治理工程勘察报告 [R]. 成都: 武汉地质工程勘察院. 2019. [Guo Mengzhou. Investigation report of Banzi gully debris flow control project of Group 2 on Banzi gully Village, Miansi Town, Wenchuan County [R]. Chengdu: Wuhan Institute of Geological Engineering Exploration, 2019. (in Chinese)]
- [25] 吕小波, 游勇, 李道凌, 等. “8·20”板子沟泥石流特征及防治措施 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 12 – 23. [LYU Xiaobo, YOU Yong, LI Daoling, et al. Characteristics and mitigation measures of Banzi gully debris flow on August 20th, 2019, in Wenchuan County, Sichuan [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 12 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李明威, 唐川, 陈明, 等. 四川省汶川县板子沟 8·20 泥石流成因与易损强度分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 238 – 245. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Formation and vulnerability analysis for debris flow occurred on 20 August 2019 in Banzi catchment, Wenchuan County, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(2): 238 – 245. (in Chinese with English abstract)]
- [27] XU Chong, XU Xiwei, YAO Xin, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis [J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 441 – 461.
- [28] TANG Chuan, 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.
- [29] PROCHASKA A B, SANTI P M, HIGGINS J D, et al. A study of methods to estimate debris flow velocity [J]. *Landslides*, 2008, 5(4): 431 – 444.
- [30] SCHEIDL C, MCARDELL B W, RICKENMANN D. Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(3): 305 – 317.
- [31] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究 [J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789 – 796. [YU Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 789 – 796. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王东伟, 游勇, 李道凌, 等. 汶川县绵虬镇板子沟“8·20”大型泥石流堵河特征及危害性预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 58 – 66. [WANG Dongwei, YOU Yong, LI Daoling, et al. The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town, Wenchuan County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 58 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [33] GE Yonggang, CUI Peng, ZHANG Jianqiang, et al. Catastrophic debris flows on July 10th 2013 along the Min River in areas seriously-hit by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(1): 186 – 206.
- [34] 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/CAG1HP006—2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018. [China Geological Disaster Prevention Engineering Association. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: T/CAG1HP006—2018[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018. (in Chinese)]
- [35] 宋志. 泥石流堵断主河临界条件研究进展 [J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(3): 109 – 112. [SONG Zhi. Progress in the research of the critical conditions of river blocking by debris flows [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2015, 35(3): 109 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 崔鹏, 何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响 [J]. 山地学报, 2006, 24(5): 539 – 549. [CUI Peng, HE Yiping, CHEN Jie. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(5): 539 – 549. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 杨彬. 紫坪铺水库上游流域径流变化趋势及水文情势变化分析 [J]. 四川水利, 2021, 42(增刊 1): 89 – 93. [YANG Bin. Analysis of runoff change trend and hydrological situation change in the upper reaches of Zipingpu Reservoir [J]. *Sichuan Water Resources*, 2021, 42(Sup 1): 89 – 93. (in Chinese)]
- [38] CHEN Ming, TANG Chuan, LI Mingwei, et al. Changes of surface recovery at coseismic landslides and their driving factors in the Wenchuan earthquake-affected area [J]. *CATENA*, 2022, 210: 105871.
- [39] LI Ning, TANG Chuan, ZHANG Xianzheng, et al. Characteristics of the disastrous debris flow of Chediguan gully in Yinxing Town, Sichuan Province, on August 20, 2019 [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 23666.

编辑: 汪美华
刘真真