

文章编号: 1008-2786-(2019)5-787-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000469

# 震后泥石流活跃期的新认识 ——以四川汶川“8·20”灾害事件为例

靳文<sup>1,2</sup>, 张国涛<sup>1,2</sup>, 邹强<sup>1</sup>, 崔鹏<sup>1\*</sup>, 王昊<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 受 2019 年 8 月 19—20 日强降雨影响, 位于汶川地震灾区的都江堰和汶川地区(简称“都汶地区”)暴发群发性山洪泥石流灾害(简称“8·20”灾害), 造成 12 人遇难, 26 人失联, 直接经济损失约 36.26 亿元。通过遥感解译、野外现场调查等手段, 结合气象、地形、物源等数据分析, 对本次岷江流域泥石流成因与特征有了初步认识: (1) 汶川灾区泥石流活动性由震前低频非群发特征, 在震后 5 年内, 经历了高频、特大型、群发、粘性泥石流活动性发展阶段, 在震后 5~15 年间, 已经演化成低频、大中型、群发、粘-过渡性泥石流并伴生山洪, 震后 15~20 年, 汶川灾区泥石流将恢复或接近震前活动状态; (2) “8·20”灾害具有群发性特征, 涉及沟谷多达 23 条, 主要沿人类或工程活动相对集中的岷江河谷、都汶公路沿线呈条带状分布; (3) “8·20”灾害的激发雨强和有效降雨分别为 24.2 mm/h 和 116.4 mm, 高于震后初期激发雨强, 但略低于震前泥石流激发雨强; (4) 受控于主河水动力条件和泥石流流体搬运能力, “8·20”灾害中泥石流以侵蚀作用和堆积作用两种方式形成危害, 洪水表现为冲蚀破坏。“8·20”灾害活动是汶川“5·12”强震 10 年后出现的一次区域性山洪泥石流灾害, 加强对此类灾害的认识, 有助于为地震灾区灾害防治和减灾规划提供科学支撑。

**关键词:** 泥石流; 山洪; 群发性; 低频大规模; 震后效应; 都江堰; 汶川

**中图分类号:** P931.1

**文献标志码:** B

受 2019 年 8 月 19—20 日强降雨影响, 位于“5·12”汶川地震灾区的四川都江堰和阿坝州汶川县多处暴发山洪泥石流灾害。此次“8·20”山洪泥石流灾害共造成 12 人遇难, 26 人失联, 多个乡镇不同程度受灾<sup>[1]</sup>(图 1)。其中, 耿达、水磨、三江、草坡等乡镇民房被山洪泥石流严重冲毁, 超过 2 万游客和数百辆汽车被困, 渔子溪龙潭电站、岷江上游太平驿水电站、板子沟水电站以及杂谷脑河下庄水电站、沙牌水电站与草坡水电站等 6 个水电站严重受损。

灾害导致道路交通损坏严重或阻断, 尤其是都(江堰)汶(川)高速公路(213 国道)、303 省道(映秀—卧龙段)、水磨—三江县乡道以及国道 317 理县区段。“8·20”灾害造成直接经济损失达 36.26 亿元(含卧龙特区)<sup>[2]</sup>。

中科院山地灾害与地表过程重点实验室及时组织了“8·20”灾害调查工作, 通过现场测量、遥感解译、气象分析等研究手段, 获取了“8·20”山洪泥石流灾害分布(图 2), 进一步结合灾害背景及形成机

收稿日期(Received date): 2019-9-11; 改回日期(Accepted date): 2019-10-14

基金项目(Foundation item): 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC006); 四川省科技计划资助(2019YFH0040)。[Key Research Program of Frontier Sciences, CAS(QYZDY-SSW-DQC006); Sichuan Science and Technology Program (2019YFH0040)]

作者简介(Biography): 靳文(1994-), 女, 河南滑县人, 博士研究生, 主要研究方向: 山地灾害, 河道演变。[JIN Wen (1994-), female, born in Huaxian, Henan Province, Ph. D. candidate, research on mountain hazard and channel evolution.] E-mail: wenjin@imde.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 崔鹏(1957-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 山地灾害。[CUI Peng (1957-), male, Ph. D., professor, research on mountain hazard.] E-mail: pengcui@imde.ac.cn



图 1 “8·20”山洪泥石流危害

(a) 三江被破坏的房屋;(b)耿达被掩埋的车辆;  
(c)失去功能的太平驿水电站;(d)彻底关沟隧道被破坏  
Fig. 1 Damages caused by flash floods and debris flows on 8<sup>th</sup>  
August, Sichuan, China: (a) damaged buildings in Sanjiang;  
(b) cars buried in Gengda; (c) unfunctional Taipingyi  
hydropower station; (d) destroyed tunnel in the Chediguan Gully

制,调查分析“8·20”事件中松散物质补给、前期降雨和激发降雨情况,分析了灾害群发性特征以及泥石流演变规律,并总结了本次灾害事件对河道和工程设施的致灾模式。

1 成因分析

1.1 充分的能量条件

“8·20”灾害受灾区位于青藏高原东南缘地形急变带,地形垂直高差大,具有泥石流等灾害发生的能量条件<sup>[3]</sup>。据野外调查,此次受灾区域主要为流域面积小于 60 km<sup>2</sup> 的小流域和沟谷,流域内部相对高差均在 1000 m 以上,主河道平均纵比降大部分高于 100‰。巨大的高差、陡峭的地形为此次灾害的发生提供了充足的能量条件(表 1)。

1.2 丰富的震后松散物质补给

“8·20”灾害集中于汶川强震区(地震烈度为 IX 区、X 区和 XI 区)(图 3),源区松散物质储量、分布、物源供给方式等因素直接控制此次灾情。

“背坡面效应”、“断层错动效应”、“山脊放大效应”等同震滑坡效应作用下地表<sup>[4-7]</sup>产生大量松散物质(图 3a),为“8·20”泥石流灾害提供了充足的物源条件。例如,都汶高速沿线的彻底关沟、野牛沟、洱沟等沟谷,由于同震滑坡面积占比均在 1/4 以上甚至超过 1/2<sup>[8-9]</sup>,大量松散物质至今积存在沟

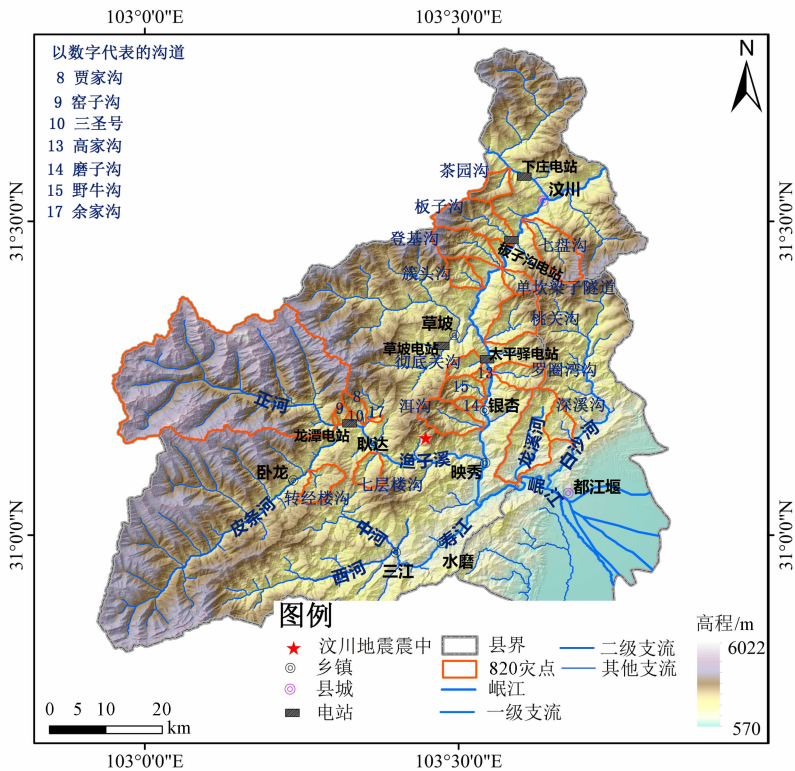


图 2 “8·20”山洪泥石流灾害分布图

Fig. 2 Distribution of flash floods and debris flows in the “8·20” event

表 1 流域地形条件

Tab.1 Characteristics of watersheds in the affected areas

| 编号 | 名称     | 沟口坐标                 | 流域面积/km <sup>2</sup> | 主沟平均纵比降/‰ | 灾害类型   |
|----|--------|----------------------|----------------------|-----------|--------|
| 1  | 深溪沟    | 103.627°E, 31.0851°N | 23.30                | 40.01     | 山洪     |
| 2  | 龙溪河    | 103.543°E, 31.0346°N | 79.20                | 130.00    | 山洪     |
| 3  | 茶园沟    | 103.526°E, 31.5304°N | 20.78                | 235.80    | 粘性泥石流  |
| 4  | 七盘沟    | 103.545°E, 31.4484°N | 52.29                | 103.30    | 稀性泥石流  |
| 5  | 单坎梁子隧道 | 103.515°E, 31.3715°N | 15.85                | 286.20    | 粘性泥石流  |
| 6  | 簇头沟    | 103.45°E, 31.3619°N  | 21.66                | 229.20    | 粘性泥石流  |
| 7  | 彻底关沟   | 103.486°E, 31.2234°N | 16.54                | 242.40    | 粘性泥石流  |
| 8  | 贾家沟    | 103.295°E, 31.1204°N | 10.99                | 194.00    | 粘性泥石流  |
| 9  | 窑子沟    | 103.257°E, 31.1218°N | 4.94                 | 309.55    | 稀性泥石流  |
| 10 | 三圣号    | 103.277°E, 31.1215°N | 1.52                 | 375.18    | 粘性泥石流  |
| 11 | 七层楼沟   | 103.317°E, 31.0759°N | 21.22                | 107.70    | 稀性泥石流  |
| 12 | 罗圈湾沟   | 103.496°E, 31.2051°N | 28.32                | 112.87    | 稀性泥石流  |
| 13 | 高家沟    | 103.494°E, 31.2063°N | 3.57                 | 325.70    | 稀性泥石流  |
| 14 | 磨子沟    | 103.484°E, 31.1518°N | 7.19                 | 366.60    | 过渡性泥石流 |
| 15 | 野牛沟    | 103.489°E, 31.1637°N | 24.09                | 159.84    | 稀性泥石流  |
| 16 | 洱沟     | 103.482°E, 31.1126°N | 39.17                | 184.47    | 稀性泥石流  |
| 17 | 余家沟    | 103.301°E, 31.1293°N | 1.45                 | 339.32    | 粘性泥石流  |
| 18 | 板子沟    | 103.531°E, 31.4068°N | 54.43                | 110.42    | 稀性泥石流  |
| 19 | 桃关沟    | 103.486°E, 31.2487°N | 50.63                | 145.00    | 稀性泥石流  |
| 20 | 登基沟    | 103.51°E, 31.3701°N  | 43.64                | 104.85    | 稀性泥石流  |
| 21 | 正河     | 103.252°E, 31.1207°N | 628.44               | 65.52     | 稀性泥石流  |
| 22 | 转经楼沟   | 103.225°E, 31.0274°N | 28.17                | 85.65     | 稀性泥石流  |

谷上游,在“8·20”事件中发育不同规模泥石流,图 3b 所示簇头沟是一个典型。一些沟谷,沟源松散物质少,植被恢复好,坡体固结程度高,多发育山洪灾害,例如龙溪河和深溪沟(图 3c)。

部分沟谷储备物质低,震后较少发生泥石流,但在此次强降雨激发下爆发严重泥石流灾害。茶园沟震前为低频活动性泥石流沟<sup>[10]</sup>,汶川地震在茶园沟谷两侧产生大量松散坡积体,堵塞河道,形成堰塞湖,震后缓慢泄流,但并没有激发泥石流,因此松散物源仍然积存(图 3d)<sup>[11]</sup>。在“8·20”事件中,茶园沟发生泥石流灾害,沟道堆积物质起动并引发大规模泥石流。

1.3 前期降雨充分,激发降雨强度大

“8·20”灾害形成的前期降雨充分,激发降雨

强度大,为山洪、泥石流灾害的形成提供了充足的水源条件和激发条件。考虑到前期降雨对土壤水分影响程度的差异,前期降雨按直接前期降雨(Direct Antecedent Precipitation, DAP)和间接前期降雨(Indirect Antecedent Precipitation, IAP)两种类型<sup>[12]</sup>分别进行分析。

野外收集了都江堰地面气象站数据<sup>[13]</sup>(图 4)和龙溪河流域气象站(中科院山地灾害与地表过程重点实验室自主安装的山区野外监测系统)的气象数据。“8·20”汶川山洪泥石流灾害的暴雨历时为:8月19日18:00—8月20日9:00;都江堰地面气象站点和龙溪河流域的 DAP 约为 63~65 mm,5 天 IAP(8月15日0:00—8月19日17:00)为 32~35 mm,30 日 IAP 约为 122.9 mm。因此,“8·20”事

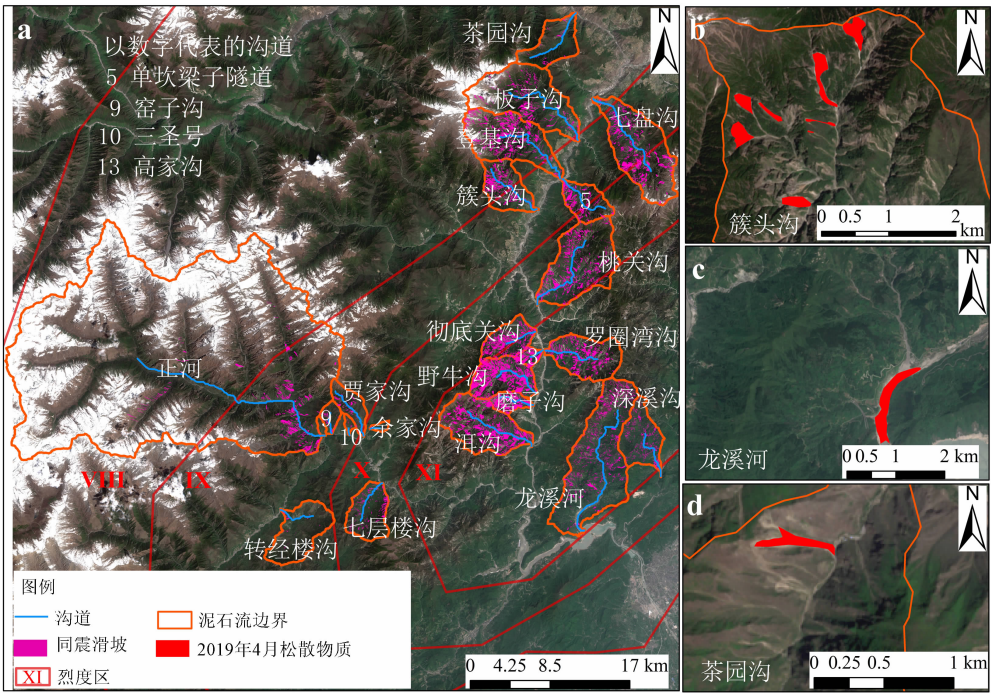


图 3 松散物质分布

(a)2008 年同震松散物质空间分布;(b)2019 年簇头沟上游松散物质;(c)2019 年龙溪河下游物质分布;(d)2019 年茶园沟静态松散物质

Fig. 3 Distribution of loose geo-material

(a) distribution of landslides after 2008 earthquake; (b) loose geo-materials in the upper reach of the Cutou gully in 2019;

(c) loose geo-materials in the downstream of the Longxi River in 2019; (d) loose geo - materials in the Chayuan gully in 2019

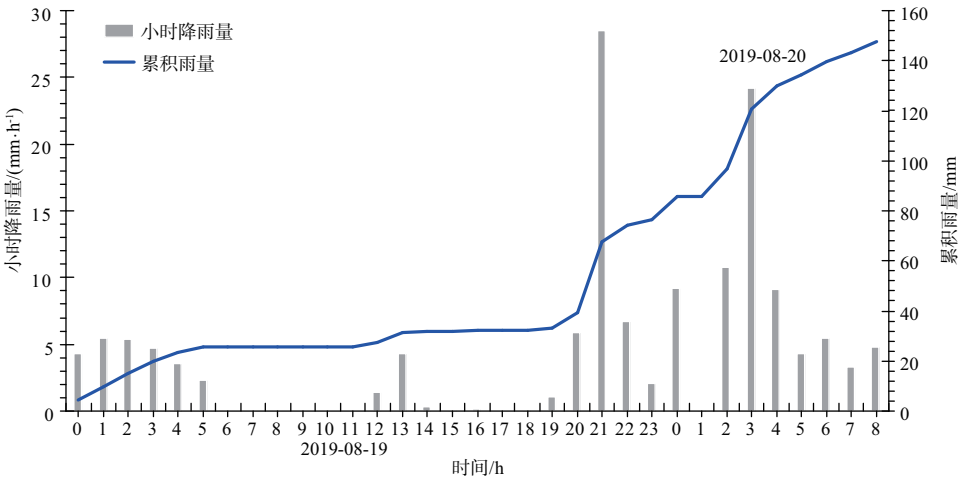


图 4 都江堰站点雨量数据

Fig. 4 Precipitation at the Dujiangyan station

件前期降雨充分,土壤内部水分饱和。

“8·20”灾害激发小时雨强为 24.2 mm/h。此次泥石流发生时累计降雨为 115.7 mm,有效降雨为 116.4 mm。对比分析龙门山区 11 个小流域泥石流降雨阈值<sup>[14]</sup>,此次降雨激发雨强和有效降雨较 2008 年—2013 年泥石流激发降雨条件有所提高。

2 灾害活动特征

2.1 群发性明显

“8·20”灾害集中于“5·12”汶川地震强震区,沿人类和工程活动集中的岷江河谷、都汶高速、303



省道(映秀—卧龙段)等区域呈条带状分布,涉及流域多达23条,呈现出明显的群发性特征。震后十余年来,汶川灾区各流域内固体松散物质储量与供给方式发生明显变化,致使“8·20”灾害表现出以泥石流群发为主,伴随山洪灾害发生的特征。山洪灾害主要分布于汶川东部的龙溪河、深溪沟、寿河等流域;泥石流灾害主要分布于都汶高速(213省道)沿线及303省道。磨子沟、野牛沟、洱沟、高家沟、茶园沟等沟泥石流几乎同时发生,灾害严重,簇头沟、单坎梁子泥石流沟等多条泥石流沟致使都汶高速公路等交通干线中断或限制通行多达2个月之久。

## 2.2 激发雨强增加

研究表明<sup>[15-17]</sup>,超过77%的泥石流由暴雨激发,降雨量和峰值雨强是诱发泥石流的关键因素,不同降雨参数对激发泥石流存在差异性作用。“8·20”灾害发生于岷江流域丰水期,前期降雨丰沛,激发雨强较震后初期明显增加。据统计<sup>[18-19]</sup>,在汶川地震之前,本区域泥石流激发雨强为5.46~17.14 mm/h(图5)。而此次山洪泥石流灾害的激发小时雨强为24.2 mm/h,可见,地震灾区泥石流的激发雨强呈上升趋势。作者认为,造成此现象的主要原因体现在两个方面:一是地表覆被变化导致水文过程发生改变。随着流域内部植被逐渐恢复,土壤入渗率逐渐升高,地表径流量减小。二是地表粗化导致起动条件提高。坡面表层细颗粒流失和沟道物质粗化,激发泥石流的临界径流量提高,降雨条件增大<sup>[15]</sup>。

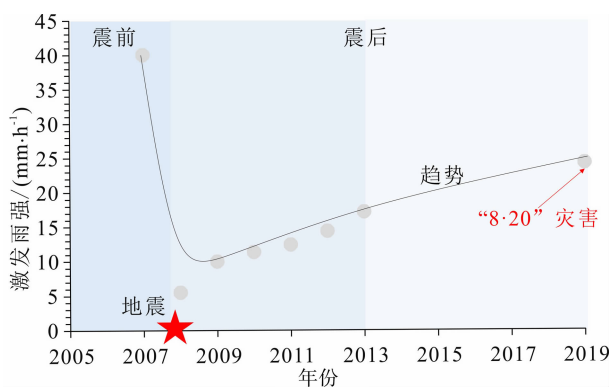


图5 泥石流激发雨强变化

Fig. 5 The change of triggering precipitations

## 2.3 泥石流活动出现转折

泥石流是汶川地震次生灾害主要类型之一,震后10~20年为泥石流活跃期<sup>[20]</sup>。地震灾区松散堆

积物质,经历了10多年降雨入渗和地表径流侵蚀搬运作用,土体力学性质逐渐稳定,植被对沟谷水文调控及边坡固结作用增加<sup>[20]</sup>,单沟泥石流逐渐由震后短期、高频、大规模活跃状态,向无外界强扰动状态下的低频群发性转化<sup>[21]</sup>(图6)。受控于土体力学性质、沟床表层土体粗化、物源补给等泥石流形成要素变化,单沟泥石流活动存在两种发展模式:一是震前低频大规模—震后高频大规模—震后低频大规模,例如彻底关沟;二是震前低频大规模—震后高频大规模—震后山洪,例如龙溪河。

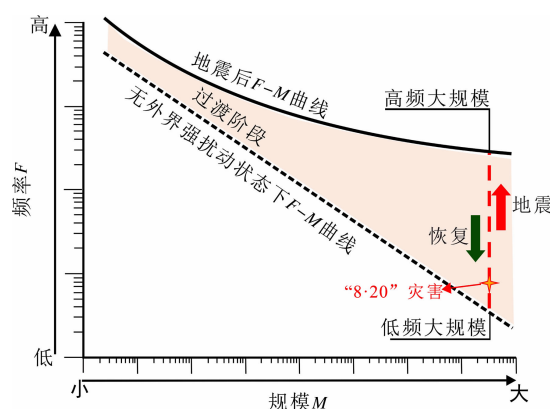


图6 泥石流活动频率-规模概念关系图

(修改自 HUNGR et al., 2008)<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Relationship between volume and frequency of debris flow  
(referred to HUNGR et al., 2008)

在强降雨与沟谷形态变化等多因素综合作用下,震后次生地质灾害表现为区域性群发,例如在同一降雨条件下,同一区域多条沟谷同时爆发泥石流,呈片状分布<sup>[21]</sup>。“8·20”事件表明,汶川地区泥石流活动性由震前低频大规模非群发特征,在震后5年内,经历了高频、特大型、群发、粘性泥石流活动性发展阶段,在震后5~15年间,随着泥石流物源持续减少,已经演化成低频、大中型、群发、粘性-过渡性泥石流并伴生山洪。因此,作者认为,震后15~20年,汶川灾区泥石流激发条件、分布规律、活动特征等泥石流定性或定量指标将恢复或接近震前状态(图6)。“8·20”灾害中大量泥石流和山洪伴生现象,是灾后泥石流发展变化的一个直接证据。

## 3 致灾特征

“8·20”灾害对山区河道、建筑设施造成严重

破坏。受河流水动力条件及物质挟带能力的影响,山洪和泥石流对河道形态、建筑设施的破坏具有典型的表现形式。

### 3.1 泥石流致灾模式

#### 3.1.1 侵蚀作用造成危害

泥石流冲击对交通设施造成程度不同的破坏<sup>[23]</sup>。在泥石流流通区,固体物质沿程补给泥石流,泥石流密度增大,流速增加,以侵蚀作用为主,严重破坏道路设施,破坏模式可分为两类:

(1)侧蚀破坏:泥石流流线与交通主线平行或斜交,对沿程沟道岸坡或路基侧蚀和下蚀,掏空坡岸和公路路基,造成交通设施损毁,例如渔子溪中游区段(图7a);

(2)冲击破坏:公路主线以桥隧、管涵等方式以接近直角穿越泥石流沟道,泥石流正向冲击主体设施,造成工程损毁,例如彻底关沟隧道(图7b)。

#### 3.1.2 堆积作用造成危害

泥石流冲出沟口,因地形开阔,流面增宽,流速下降,发生扇状淤积<sup>[24-25]</sup>。“8·20”灾害,泥石流堆积作用主要出现于岷江主-支流交汇处。根据主



图7 泥石流流通区造成的破坏

(a) 渔子溪中游道路路基被侧蚀;(b)彻底关沟隧道被破坏

Fig. 7 Damage caused by debris flows along their flow sections

(a) a eroded roadbed in the middle reaches of the Yuzi River;

(b) a destroyed tunnel in the Chediguan Gully

支沟关系、物质供给和水流动力条件,破坏模式可划分为三类:

(1)淤积破坏:泥石流冲出沟口—挤压河道—河流主流线推向对岸—侧蚀对岸路基。泥石流搬运堆积量大于主河输送能力,但不足以堵塞主河,造成河道淤积,如磨子沟(图8);

(2)溃决破坏:泥石流冲出沟口—堵塞抬高河床—形成短暂性堰塞湖—溃决洪水冲毁下游设施。一次性泥石流冲出量大,堵塞沟口或短期截断河道,形成堰塞湖,溃决洪水冲蚀下游设施,如彻底关沟

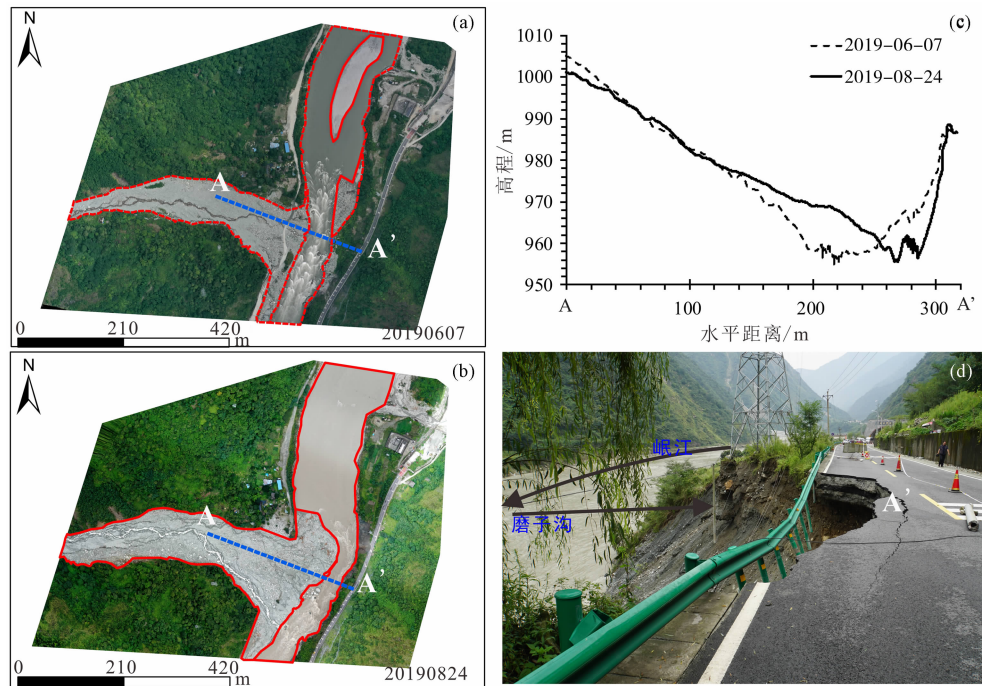


图8 泥石流堆积扇对河道的挤压(磨子沟)

(a) 2019年6月7日拍摄无人机影像;(b)2019年8月24日拍摄无人机影像;

(c)“8·20”事件磨子沟口变化断面;(d)“8·20”事件侵蚀路基

Fig. 8 Extrusion of channel caused by the fan of debris flow (the Mozi Gully)

(a) image took by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in 7<sup>th</sup> June, 2019; (b) image took by UVA on 24<sup>th</sup> August, 2019;

(c) change of the cross section during the event in the Mozi Gully; (d) destroyed road during the event



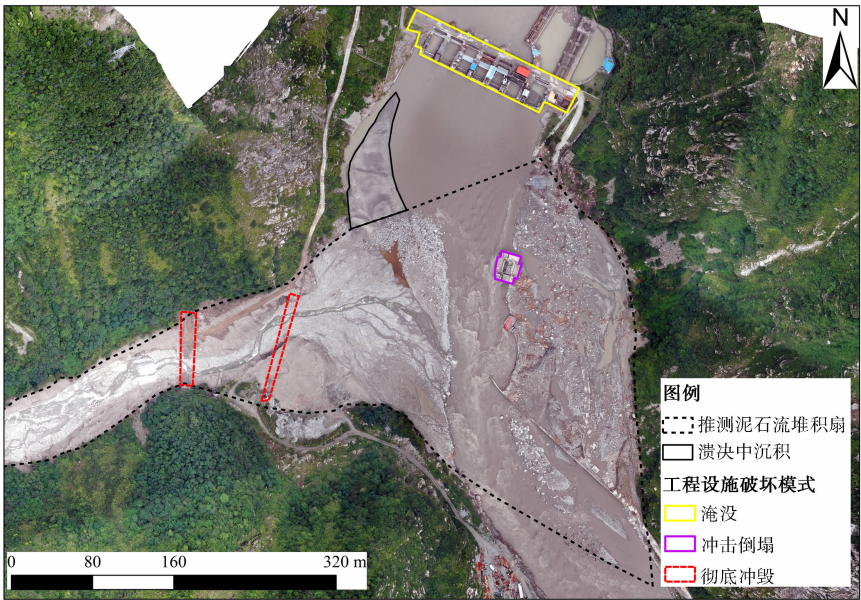


图 9 彻底关沟泥石流堆积扇堵塞岷江

Fig. 9 Blockage of the Minjiang River by debris flow at the Chediguan Gully

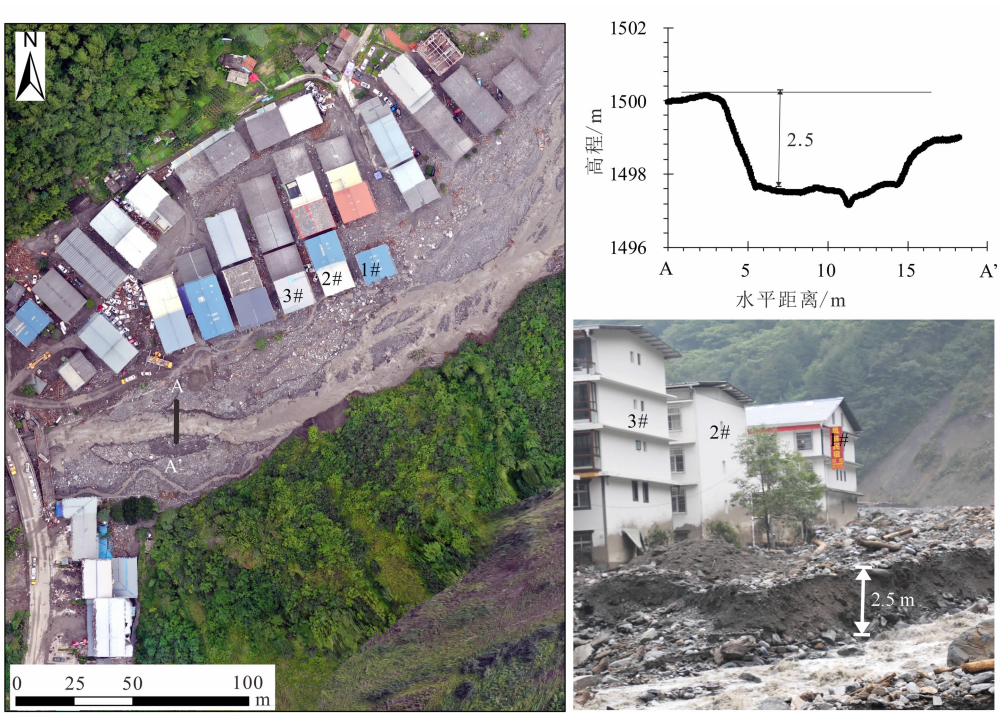


图 10 耿达贾家沟泥石流致沟口淤积抬高

Fig. 10 Ground lift of gully mouth caused by debris flow in the Jiajia Gully

(图 9)；

(3)堵塞破坏：泥石流沟口停积一抬高沟口河床—泥石流侧积淤积房屋或溯水淹没上游设施，如高家沟(图 10)。

3.2 山洪致灾特征

“8·20”事件中，山洪对工程设施主要表现为

切蚀破坏。山洪冲蚀沿河路基，路面悬空或崩岸，造成道路中断。例如，龙溪河爆发山洪，下蚀坡岸老泥石流堆积体，切槽厚度约 2 m，部分河段可达 4 m 左右(图 11)。此外，由于山区河道淤高，山洪淹没沿河线道路，浸润路基，软化路面，造成公路路面设施损毁。

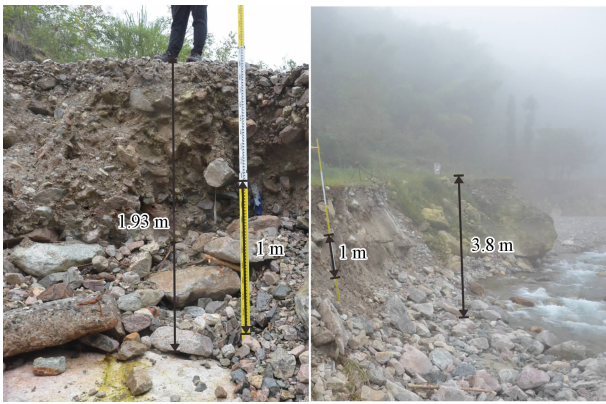


图 11 龙溪河山洪侵蚀老泥石流堆积体

Fig. 11 Incision of deposit by flash flood of the Longxi River in Dujiangyan

## 4 结论

受 2019 年 8 月 19—20 日强降雨影响,四川都江堰和阿坝州汶川县多处突发山洪、泥石流灾害。群发性山洪、泥石流灾害大规模改造岷江及沿线支流河道形态,并造成交通等基础设施损毁严重。通过野外考察、遥感调查、气象分析等手段,解析了震后灾害事件活动性特征,得出以下主要结论:

(1)群发性特征明显。“8·20”灾害期间暴发山洪泥石流的沟谷流域多达 23 条,主要沿人类或工程活动频繁集中的岷江河谷、都汶高速公路沿线呈条带状分布。山洪主要发生在都江堰的龙溪河、白沙河的深溪沟以及水磨、三江的寿河流域。泥石流灾害主要发生于都汶高速(213 省道)沿线及 303 省道,例如磨子沟、野牛沟、洱沟、高家沟、茶园沟等。

(2)泥石流激发雨量明显提高,但仍低于震前。“8·20”灾害形成的激发雨强和有效降雨分别为 24.2 mm/h 和 116.4 mm,激发雨强高于 2013 年的 17.14 mm/h,但较震前的 30~50 mm/h,依旧略低,说明“5·12”汶川地震对泥石流形成的影响依旧存在。

(3)“8·20”灾害是震后泥石流活动性发生阶段性转变的事件。“8·20”事件表明,汶川地区泥石流活动性由震前低频非群发特征,在震后 5 年内,经历了高频、特大型、群发、粘性泥石流活动性发展阶段,在震后 5~15 年间,随着泥石流物源持续减少,已经演化成低频、大中型、群发、粘-过渡性泥石

流并伴生山洪。今后 15~20 年,汶川灾区泥石流将恢复或接近震前活动状态。

(4)受控于主河水动力条件和泥石流流体携带能力,“8·20”灾害中泥石流以侵蚀作用和堆积作用两种方式形成危害,洪水表现为冲蚀破坏。

致谢:《山地学报》编辑部朱颖彦同志参与了本文主要观点的讨论,并对中英文写作做了大量修改,特此感谢。中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所的王姣助理研究员、雷雨助理研究员、伍纯昊博士提供部分野外考察数据,特此感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国地震局. 汶川 8.0 级地震烈度分布图 [EB/OL]. <https://www.cea.gov.cn/>. (2008-9-2) [2019-11-16]. [China Earthquake Administration, Intensity distribution map of Wenchuan M8.0 Earthquake [EB/OL]. <https://www.cea.gov.cn/>. (2008-9-2) [2019-11-16]]
- [2] 四川省人民政府. 汶川“8·20”强降雨特大山洪泥石流灾害遇难同胞悼念活动举行 [EB/OL]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2019/8/26/dfcb21321ee04011a9d9fbb5dd4159a.shtml>. (2019-8-26) [2019-11-16]. [The people's Government of Sichuan Province, Mourning for the victims of Wenchuan “8·20” heavy rainfall and mudslide disaster [EB/OL]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2019/8/26/dfcb21321ee04011a9d9fbb5dd4159a.shtml>. (2019-8-26) [2019-11-16]]
- [3] 崔鹏,邓宏艳,王成华. 山地灾害 [M]. 北京:高等教育出版社, 2018:14-18. [CUI Peng, DENG Hongyan, WANG Chenghua, et al. Mountain hazards [M], Beijing: Higher Education Press, 2018:14-18]
- [4] 聂娟,连健,胡卓玮. 汶川地震灾区滑坡空间特征变化分析 [J]. 地理研究, 2014, 33(2):214-224. [NIE Juan, LIAN Jian, HU Zhuwei. Spatial variation of landslides in Wenchuan Earthquake-stricken areas [J]. Geographical Research, 2014, 33(2):214-224]
- [5] WANG Jiao, JIN Wen, CUI Yifei, et al. Earthquake-triggered landslides affecting a UNESCO Natural Site: the 2017 Jiuzhaigou earthquake in the World National Park, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(7):1412-1428.
- [6] 许强,李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究 [J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(S1):7-14. [XU Qiang, LI Weile. Study on the Direction Effects of Landslides Triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(S1):7-14]
- [7] XU Chong, XU Xiwei, YU Guihua. Landslides triggered by slipping-fault-generated earthquake on a plateau: an example of the



- 14 April 2010, Ms 7. 1, Yushu, China earthquake [J]. Landslides, 2013, **10**(4): 421–431.
- [8] LI Gen, WEST A. J., DENSOMORE A. L. et al. Seismic mountain building: landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, **15**: 833–844.
- [9] LI Gen., WEST A. J., DENSOMORE A. L., et al. Connectivity of earthquake - triggered landslides with the fluvial network: Implications for landslide sediment transport after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, **121**: 703–724.
- [10] 张金山, 沈兴菊, 谢洪. 低频泥石流特征及防治——以四川汶川县茶园沟为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, **16**(3): 37–41. [ZHANG Jinshan, SHEN Xingju, XIE Hong. The characteristics and control of the low frequency debris flows flowof the Chayuan gully debris flow Wenchuan County, Sichuan Province as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, **16**(3): 37–41]
- [11] 李丽, 余斌, 张健楠, 等. 基于震后堰塞湖演化的泥石流危险性分析——以汶川县茶园沟堰塞湖演化为例[J]. 桂林理工大学学报, 2011, **31**(3): 357–363. [LI Li, YU Bin, ZHANG Jiannan. Risk analysis based on the evolution of earthquake dammed debris flow—a case from the evolution of barrier lake in Chayuan Gully, Wenchuan [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2011, **31**(3): 357–363]
- [12] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1**(1): 11–15. [CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia Gully as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, **1**(1): 11–15]
- [13] 中国气象局气象数据中心. 地面数据气象资料[EB/OL] [2019–11–16]. <http://data.cma.cn/>. [National Meteorological Information Center. Surface meteorological data [EB/OL] [2019–11–16]. <http://data.cma.cn/>]
- [14] 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.
- [15] 郭晓军, 范江琳, 崔鹏, 等. 汶川地震灾区泥石流的诱发降雨阈值[J]. 山地学报, 2015, **33**(5): 579–586. [GUO Xiaojun, FAN Jianglin, CUI Peng, et al. Thresholds of rainfall trigoericy debris flows in Wenchuan Earthquake area [J]. Mountain Research, 2015, **33**(5): 579–586]
- [16] 常鸣, 窦向阳, 范宣梅, 姚成. 汶川震区暴雨泥石流激发雨型特征[J]. 现代地质, 2018, **32**(3): 623–630. [CHANG Ming, DOU Xiangyang, FAN Xuanmei, YAO Cheng. Critical rainfall patterns for rainfall-induced debris flows in the Wenchuan Earthquake Area [J]. Geoscience, 2018, **32**(3): 623–630]
- [17] 钟燕川, 郭海燕, 徐金霞, 等. 四川省泥石流活动与降水因子特征[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 394–400. [ZHONG Yanchuan, GUO Haiyan, XU Jinxia, et al. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 394–400]
- [18] FAN Xuanmei, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms and impacts [J]. Reviews of Geophysics, 2019, **57**: 421–503.
- [19] GUO Xiaojun, CUI Peng, LI Yong, et al. Intensity - duration threshold of rainfall-triggered debris flows in the Wenchuan Earthquake affected area, China [J]. Geomorphology, 2016, **253**: 208–216.
- [20] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, **42**(5): 10–19. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5): 10–19]
- [21] 崔鹏. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 73–84. [CUI Peng, et al. Formation mechanics and risk management of mountain hazards caused by Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2011: 73–84]
- [22] HUNGR O, MCDUGALL S, WISE M, et al. Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief [J]. Geomorphology, 2008, **96**(3/4): 355–365.
- [23] 邹强, 郭晓军, 朱兴华, 等. 岷江上游“7·10”泥石流对公路的危害方式及成因[J]. 山地学报, 2014, **32**(6): 747–753. [ZOU Qiang, GUO Xiaojun, ZHU Xinghua, et al. Hazard characteristics and causes of “7·10” debris flow along highways in the upper reaches of Minjiang River [J]. Mountain Research, 2014, **32**(6): 747–753]
- [24] 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, (5): 539–549. [CUI Peng, HE Yiping, CHEN Jie. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area [J]. Mountain Research, 2006, (5): 539–549]
- [25] BENDA L E, TERRANCE W C. Predicting deposition of debris flows in mountain channels [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **27**(4): 409–417.

# A New Understanding of the Activity Behavior of Post-earthquake Debris Flow—Taking the “8 · 20” Event in Wenchuan, Sichuan, China as an Example

JIN Wen<sup>1, 2</sup>, ZHANG Guotao<sup>1, 2</sup>, ZOU Qiang<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>1\*</sup>, WANG Hao<sup>2, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Due to heavy rainfall from August 19 to 20, 2019 in the Wenchuan area (Dujiangyan City and Wenchuan County, Aba Prefecture, Sichuan Province, China), a well-known place stricken by mega earthquake in 2008 (the 5 · 12 Wenchuan Earthquake), it broke out massive debris flows and flash floods (referred to as “8 · 20” Event). Twelve people were killed and 26 people missing, with a direct economic loss about 3.626 billion Chinese Yuan. It is quite concerned that the “8 · 20” Event occurred at the time of a decade after the Quake, which has been widely recognized as a watershed time for differentiating post-quake debris flow activity. In order to understand the activity behavior of post-earthquake debris flow, the “8.20” Event was taken as a case study. By remote sensing interpretation, field survey, meteorological and geophysical data analysis, a preliminary understanding of debris flow situation in the Wenchuan area was achieved. (1) The activity of debris flow in the Wenchuan area before the Quake was characterized by low-frequency and non-clustered occurrence. In the ensuing 5 years of 2008, Wenchuan subjected to massive outbreak of viscous debris flows, characteristic of high-frequency, mega-scale, clustered occurring. In the 5 ~ 15 years of the Earthquake, debris flows has evolved into a pattern of low frequency, medium-large-scale, viscous-transitional combined geophysical property, accompanying by simultaneous flash floods. It suggests that in the 15 ~ 20 years after the Quake, debris flows in the region would be gradually recovering to the pre-earthquake state; (2) The “8 · 20” Event behaved in a collective formation, involving up to 23 river basins mainly distributed along the Minjiang River valley and the Dujiangyan—Wenchuan Highway, where human or engineering activities are relatively concentrated; (3) The critical rainfall intensity and effective rainfall in the 8.20 Event were 24.2 mm/h and 116.4 mm respectively, which are higher than the values obtained in the early days after the Earthquake, but slightly lower than the value before the Earthquake; (4) Controlled by the local hydrodynamic conditions and debris flow carrying capacity, debris flows in the “8 · 20” Event incurred damages to local infrastructure by two manners: erosion damage or accumulation damage, but the floods manifest only as erosion damage. This “8 · 20” Event was a large-scale geological consequence in a decade after the Wenchuan earthquake, dominated by debris flows and flash floods. This new understanding of the Event—behavior of post-earthquake debris flows would be helpful to the researchers with similar interests to further study the post-seismic effects on the evolution of debris flows.

**Key words:** debris flow; flash flood; clustering; low frequency; high magnitude; post-seismic effect; Dujiangyan; Wenchuan