

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210220002

汶川震区绵虎镇“8·20”登溪沟泥石流灾害调查与分析*

丰强, 唐川, 陈明, 龚凌枫

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 2019年8月20日汶川县绵虎镇登溪沟暴发大型泥石流灾害, 导致沟口房屋、国道和高速公路损毁, 交通中断长达数月, 同时大量冲出物质堵塞岷江河道, 使岷江河道改道左岸, 水位抬升, 形成链式灾害。基于登溪沟泥石流形成条件、致灾特征以及泥石流事件前后现场调查和遥感影像解译进行了分析, 采用配重法和形态调查法计算获得泥石流的容重和动力特征。结果表明, 登溪沟泥石流是短历时强降雨、有利的地形条件及地震作用产生的丰富物源以及沟道强烈侵蚀多种因素共同作用的结果, 其成灾模式可总结为降雨快速汇流-沟道物质启动形成泥石流-泥石流沿程铲刮裹挟-岸坡坍塌堵塞-泥石流规模放大冲出沟口的运动过程, 泥石流事件前后影像解译显示坡面物源和沟道物源随着时间产生了显著演化, 流域内物源仍然丰富。汶川地震虽已过去十年以上, 泥石流活动性仍然较高, 因此针对登溪沟泥石流活动进行了详细调查分析以期加强对强震区震后中长期泥石流特征的进一步认识。

关键词: 泥石流; 登溪沟; 形成条件; 成灾特征; 发展趋势

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0051-09

Field Investigation and Research on Debris Flow on August 20, 2019 in Mianshi Town, Epicenter of Wenchuan Earthquake

FENG Qiang, TANG Chuan, CHEN Ming, GONG Lingfeng

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: On August 20, 2019, a large debris flow occurred in Dengxi valley, Miansi Town, Wenchuan County. As a result, a large number of houses, national highways and expressways were washed out at the mouth of the ditch, and traffic was interrupted for months. At the same time, a large amount of material rushed out blocked the main channel of Minjiang River, causing the channel of Minjiang River to be diverted to the left bank and the water level to rise, forming a chain disaster. Based on the formation conditions, disaster-causing characteristics of the debris flow in Dengxi valley, as well as the field investigation and remote sensing image interpretation before and after the debris flow event, the bulk density and dynamic characteristics of the debris flow, such as velocity, discharge and debris flow outflow, were calculated by using the weight method and morphological investigation method. The results show that the Dengxi valley debris flow is the result of the combined ac-

* 收稿日期: 2021-02-20; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501004) 资助

作者简介: 丰强 (1994-), 男, 硕士研究生。主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: 1374597148@qq.com

tion of many factors, such as short duration heavy rainfall, favorable topographic conditions, abundant provenance produced by earthquake and strong erosion of the channel. The disaster pattern is summarized as a movement process as follows :rapid confluence of rainfall-initiation-formation of debris flow by materials of the vally-erosion of materials at the bottom and both sides of the gully-collapse of bank slope and blockage and outburst- the scale of the debris flow becomes large and rushed out. The image interpretation before and after the debris flow event showed that the provenance of slope and channel evolved significantly with time, and the provenance in the basin was still rich. The activity of debris flow is still high in the Wenchuan earthquake area ten years after the earthquake. Although more than 10 years have passed since the Wenchuan earthquake, the activity of debris flow is still relatively high. Therefore, the detailed investigation and analysis of the debris flow activity in Dengxi valley are carried out in order to strengthen the further understanding of the characteristics of debris flow in the medium and long term after the earthquake in the strong earthquake area.

Keywords: debris flow; Dengxi gully; formation condition; infestation characteristics; development trend

引言

强震作用致使山地区域地质环境变得极其脆弱,2008年汶川地震后,汶川地区山地环境遭受强烈扰动,震后地质灾害频发,尤其以滑坡和泥石流灾害活动表现最为强烈^[1-2]。震后人口居住地及基础设施多聚集于流域沟口,因此长期处于泥石流活动的持续威胁中。汶川地震触发了大量的同震松散物质,为泥石流活动提供了充足的物质来源,在强降雨作用下,震后至今发生了多次大规模泥石流事件,2010年8月13日汶川县映秀镇红椿沟暴发了冲出量多达 $7.14 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的特大规模泥石流,冲出物质堵塞岷江造成洪水改道淹没映秀新镇,造成近百人失踪,映秀新镇大量群众被迫转移^[3]。2013年7月10日,汶川地区岷江干流及都汶公路沿线暴发群发性泥石流灾害,简称“7·10”泥石流,典型沟道有簇头沟泥石流、七盘沟泥石流等,此次灾害造成都汶公路及高速公路重大破坏,并对沟口居民区产生重大损害,经济损失上亿,有关学者通过地面调查,遥感解译,数值模拟等多种手段,从降雨、地形、物源等多个方面分析了泥石流形成条件、成灾特征和危险范围^[4-6]。2019年8月20日,距汶川震后第十一年,汶川地区再次暴发大规模群发性泥石流,震后地质灾害长期后效应仍然显著,震后地质灾害活动仍在持续,汶川绵虬镇都汶公路沿线再次暴发带状泥石流灾害,本文重点对沿线岷江右岸登溪沟泥石流沟道开展了调查,登溪沟在强降雨条件下产生了

泥石流灾害(图1),在详细地面调查和遥感影像基础上,分析了此次大型泥石流灾害物源补给、形成条件、成灾特征、物源演化特征和发展趋势,以期认识震后泥石流灾害特征和防治规划提供重要参考。



图1 登溪沟泥石流堆积成灾区特征

Fig. 1 The characteristics of Dengxi gully debris flow in accumulation disaster areas

1 流域特征

登溪沟地处四川省阿坝州汶川县绵虬镇东北侧,沟口坐标为 $103^{\circ}30'36.9''\text{E}$ 、 $31^{\circ}22'37.7''\text{N}$,流域内水流从右岸汇入岷江,登溪沟沟口距离绵虬镇约1.7 km,沟口建有国道G213及都汶高速公路。根据中国地震局公开数据显示流域地处XI烈度区,地震

峰值加速度为0.2g,区内地震响应剧烈,逆冲推覆断层茂汶断裂带横穿流域沟口,由于上盘效应影响较大,流域内不同海拔高程位置受汶川地震强烈影响产生了大量规模不等的同震滑坡^[7]。登溪沟流域面积约43 km²,主沟整体走向为NW,长度15 km,支沟较多,主沟沟床平均纵坡降244‰,主沟源头最高点地处雪隆包山脉,海拔最高为4 497 m,沟口海拔1 240 m,最大相对高差3 257 m。研究区高低起伏较大,为高、中山峡谷地貌,出露地层主要为前震旦系黄河水群、下元古-太古界康定群、中元古代晋宁期,区内岩性组成主要含闪长岩,角闪片岩,千枚岩夹灰岩,黑云母花岗岩,流域内冲洪积物,第四系堆积物丰富,此外区域地质环境受汶川地震强烈扰动,登溪沟流域内存在丰富的崩滑堆积物,主要分布于坡面和流域沟道内。

研究区为亚热带湿润气候,夏季主要受西南与东南季风影响,气候相对潮湿,降雨主要集中在7~9月,降水特征以阴绵雨和秋绵雨为主(雨日较多,降水时间和落区相对集中的特点),据威州气象站23年实测,多年平均降水量为526.3 mm,最大年降水量为648.6 mm(1958年),最小年降水量369.8 mm(1974年),连续最大4个月(5~8月)降水量为324 mm,占年降水量62.1%,可见,该区降雨量年际变化大,且年内分布不均匀,出现集中降雨的可能性较大,成为该区引发泥石流等地质灾害的重要因素。登溪沟为岷江一级支流,自1956~1985年的30年间,汶川县姜舍坝记录的岷江最高洪峰流量为1 890 m³/s(1973-06-23),最低洪峰流量为639 m³/s(1970-07-08),历年洪峰流量为1 076 m³/s,据文献^[8]该沟为一条老泥石流沟,历史上曾暴发过多次泥石流,未曾记录到造成显著灾害,其中一次发生于20世纪90年代初期,泥石流暴发频率为5~10年一次。

2 泥石流形成条件

2.1 降雨特征

泥石流的暴发往往是伴随着强降雨,降雨是泥石流暴发不可或缺的激发因素之一,降雨数据最直接可靠的来源是雨量站,此次有记录的最近的雨量数据位于紧邻登溪沟流域左侧岷江上游板子沟沟口,其雨量站数据记录的8月20日前后的雨量数据可以作为登溪沟泥石流暴发的降雨持续时间及雨

强数据的重要参考,降雨数据如图2所示。泥石流发生于8月20日凌晨2点左右,持续时间1小时,暴发前后有强降雨,降雨数据显示泥石流暴发的前期累计雨量为15.2 mm,泥石流暴发时刻的激发雨强达到12.7 mm,泥石流暴发后的1小时之后的4点,雨量站记录到最大小时雨强达13.7 mm,19日0:00~22:00降雨量较少,主要入渗土体。降雨量较大时间段主要集中在8月19日23时至8月20日7时,这段时间内降雨量较大,土体饱和,流域内快速形成超渗产流,沟道及坡面物质快速启动形成泥石流。结合相关学者对汶川暴雨泥石流激发雨型的分析^[9],本次泥石流降雨特征符合短期突然降雨型,即泥石流暴发的前几小时降雨较少,小时雨量从较小值快速增至最大值,随后快速减小的降雨过程。短时强降雨为泥石流运移提供了充足的水源条件,本次泥石流过程前后,48 h累计降雨量达63.7 mm,结合对当地的居民走访调查显示,沟道中上游降雨强度明显强于沟道下游沟口,与山区气候降雨随着海拔升高而增加的情况相吻合,即沟道内激发降雨及累计降雨强度比沟口大,因此沟口降雨数据可以提供一定的降雨参考。

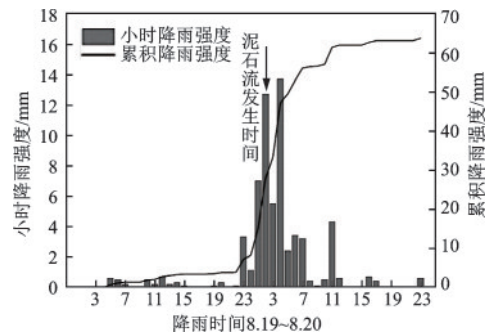


图2 2020年8月19~20日降雨数据

Fig.2 Rainfall data for 19 and 20 August 2020

2.2 地形条件

登溪沟流域面积大,较大的流域面积使得沟道具有良好的汇水能力,支沟较发育,多达7条且纵坡比降大,多数支沟分布于流域上游,海拔高度处于2 000~3 500 m,少数支沟分布于流域中游,中游支沟面积及数量少于上游支沟,上游形成区支沟多呈“V”型谷形态特征,中下游流通区蜿蜒曲折呈“U”型谷形态特征,部分区段较窄,水流湍急加之震后流域内崩塌滑坡活动使得沟道堆积和堵塞现象严重,为泥石流沟道强烈侵蚀冲刷提供了条件。通过GIS坡度分析流域内沟道两侧地形多在30°~

65°, 30°~65°以上坡体面积占流域面积70%以上, 实地调查部分山体近乎垂直陡立, 受强震影响, 流域内岩土体松散, 岩石裂隙节理裂隙较为发育, 陡峭的山坡和地形的高差起伏为崩塌、滑坡创造了良好的临空条件, 也促使大量松散堆积物在良好的汇水条件下可以相对快速参与到泥石流的形成中。

2.3 物源条件

基于GIS的遥感影像在解译震区滑坡及崩塌

堆积体已经较多^[10-12], 登溪沟处于汶川地震强震区, 受2008年汶川映秀强震作用影响, 流域内产生了大量崩滑堆积体, 部分崩滑堆积体从坡面直接划到流域沟道内, 在与沟道两岸居民实地调查中了解到, 该沟震后2015年至“8·20”泥石流暴发中间时间段未曾暴发过泥石流, 通过2015年与2019年实地调查对比发现, 泥石流暴发后沟道发生了显著变化, 沟道堆积体侵蚀严重, 另外可见旺盛生长的树木在“8·20”活动过后全部消失(图3)。



图3 泥石流灾害发生前后相同位置照片

Fig.3 Photos of the same location before and after the debris flow disaster

通过2015和2019年影像和两次调查照片可以分析出震后产生于沟道中的同震崩滑坡堆积体及震后长达11年雨季降雨流水迁移滑动的堆积物参与到此次泥石流运动过程中, 现场调查沟道下切侵蚀和侧蚀程度如图3所示, 反映了沟道堆积物被侵蚀成为本次泥石流流量大的重要原因之一。震后流域内崩滑体在震后有所恢复, 由于地震后效应坡面仍有不稳定崩滑体, 考虑到流域面积大支沟较多且海拔高程从沟口到最高处分水岭从300 m到3700 m持续上升, 本文获取登溪沟2019年泥石流暴发后较近时间段高精度遥感影像, 影像时间12月29日精度1 m, 数据来源于谷歌地球, 解译出流域内有尚未恢复及新产生的裸露崩塌滑坡体如图4所示, 解译结果统计显示在高精度影像上共计147处规模不等的崩塌滑坡体, 坡面滑坡崩塌体面积共计 $1.87 \times 10^6 \text{ m}^2$, 采用C·Tang等^[13]提出的计算流域崩滑体厚度统计模型, 获得流域内各崩滑体厚度(厚度见图4崩溃体数字), 公式适用性已在震区相同地震地貌条件北川和清平片区得到验证。该模型如下(公式1), 利用该模型计算崩滑体厚度, 利用厚度与面积乘积统计总体积。

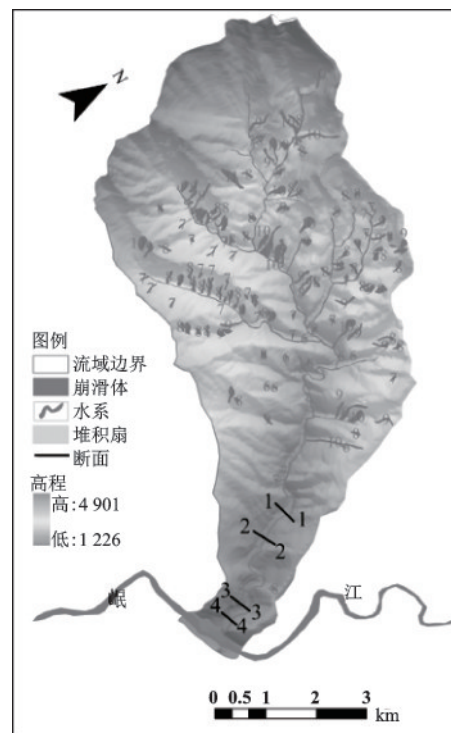


图4 泥石流流域崩滑体物源解译结果

Fig.4 The interpretation results of provenance of landslide bodies in debris flow basin

$$t = \ln(S_L) - 4.985 \quad (1)$$

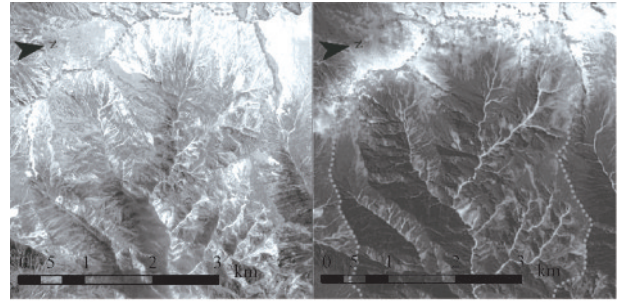
式中, t 为崩滑体平均厚度(m); S_L 为崩滑体面积(m^2)。通过计算得到崩滑体厚度为 0~10 m, 整个研究区崩滑体平均厚度为 8.11 m, 崩滑体总量约 $1.67 \times 10^7 m^3$, 即流域内坡面崩滑体储量仍然丰富。

3 泥石流成灾特征

现有资料未曾记录有登溪沟震后泥石流灾害, 此次灾难性泥石流发生于汶川地震震后的第 11 年, 即 2019 年 8 月 20 日 2 时左右, 震后流域内物源相比震前增加, 坡面堆积体稳定性低, 震后泥石流活动性提高, 该沟也成为高危险性沟, 根据居住在沟口右岸村民讲述, 泥石流发生之前沟口降雨较大, 沟口水流量逐渐增加蔓延至居住的房屋, 随着降雨的持续及水流变得逐渐混浊, 村民紧急撤离沟口, 半小时后泥石流夹杂大量砂石泥土冲出沟口。

3.1 形成-流通区特征

登溪沟流域面积较大, 泥石流形成区海拔位置较高, 对比分析泥石流灾害前后遥感影像可知, 在海拔 3 200 m 的影像上灾害后区别于灾害前图像特征, 表现在色彩方面更加亮白, 沟道具有显著的扩宽, 基于高清影像对比泥石流发生前后可见上游各支沟有明显的启动图像特征(图 5), 沟道内表现为白色条带状, 且流域沟道内相较于泥石流暴发前沟道均有不同程度的扩宽及延展, 可见各支沟均有明显的启动。流域内各支沟快速汇流形成沟道径流, 如同“消防管效应”^[14-15], 水流快速集中, 使得泥石流沿着主沟不断裹挟沟道中的堆积物, 强烈冲刷沟道两侧, 下蚀和侧蚀作用剧烈, 在沟道较窄处冲刷出裸露基岩, 沿途沟道两侧坡脚产生强烈侵蚀(图 6), 侵蚀深度达 6 m, 在主沟弯道处泥石流泥痕高度高达 17 m, 在凸岸形成堆积, 导致居民房屋淤埋。泥石流强大的运动能力使通过河道用于通行的乡村渡河桥梁冲毁, 沿途共计 11 座跨河桥梁被完全冲毁(图 7(c))。主沟沟道部分段括宽 10~20 m, 泥石流沿程铲刮裹挟沟道堆积物导致流量沿程放大, 最后冲出沟口, 造成泥石流灾害, 其成灾模式可总结为降雨快速汇流-沟道物质启动形成泥石流-泥石流铲刮裹挟沟道底部侧面物质-岸坡坍塌堵溃-泥石流规模放大冲出沟口。



(a) 2015年12月7日泥石流发生前影像 (b) 2019年10月29日泥石流发生后影像

图 5 泥石流发生前后遥感影像

Fig. 5 Remote sensing images before and after debris flow occurrence



图 6 沟道强烈侵蚀铲刮

Fig. 6 Strong erosion scraper in channel

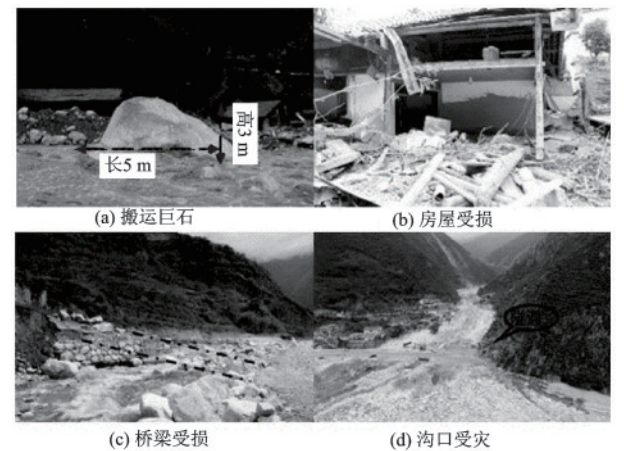


图 7 受灾特征

Fig. 7 Disaster characteristics

3.2 沟口堆积区成灾特征

受震区地形条件的限制, 山区人民居住选址及生产活动多聚集于沟口老冲积扇位置, 登溪沟口右岸及沟口岷江对岸有登溪沟组大量村民, 另都汶高速公路 G213 线和省道 S9 线也从沟口沿岷江和沿河修建。承灾体两者高度集中于沟口, 此次泥石流对其造成严重损坏, 沟口 S9 线约 50 m 简支梁桥被完全冲毁, 都汶高速公路 G213 线往返双线约 370 m 路段被淤埋冲毁, 造成长达数月的交通受阻。沟口泥石流致使数间砖结构房屋不同程度受损, 大量房

屋受淤埋,其中靠近沟道的五户房屋完全冲毁。泥石流表现出强大的搬运能力,堆积扇直径1 m以上的巨石较为常见,受灾特征如图7所示。泥石流沟口冲出范围较大,现场调查泥石流呈扇形堆积,泥石流堆积扇子前缘宽340 m,中部宽180 m,堆积范围面积多达3 700 m²,堆积深度约3~8 m,估测堆积体积多达3.00 × 10⁵ m³。此次泥石流表现出链式灾害特征,登溪沟泥石流沟口大量堆积物冲入岷江,造成岷江超过一半河道堵塞,随之岷江水位上升产生回水现象,原主河道改道沟口岷江左岸,造成次生灾害,左岸房屋,生产设施,岷江左岸岸坡被改道后的河流严重冲刷,随后拐弯淘蚀都汶高速公路,路面处于悬空状态,通过无人机正射影像测量到河道中心线在登溪沟泥石流冲出堆积的挤破作用下向岷江左岸偏70~120 m,沟口堆积范围特征如图8所示。

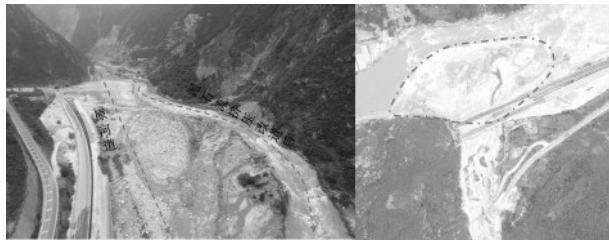


图8 河道挤压及堆积范围

Fig. 8 Channel extrusion and accumulation range

3.3 泥石流动力特征

登溪沟“8·20”泥石流暴发过后,第一时间到现场进行调查,根据村民的描述配置与泥石流暴发后的泥石流浆体即配浆法计算泥石流容重,结合现场泥痕,采用形态调查法计算流速、流量和泥石流冲出量。重度计算公式为:

$$\gamma_c = \frac{G_c}{V} \quad (2)$$

式中, γ_c 为泥石流重度(t/m³); G_c 为配制泥浆重量(t); V 为配制泥浆体积(m³)。

现场实验共测量了三个点,测得泥石流平均重度为1.817 t/m³,流量是泥石流在沟道中的运动特征之一,本次泥石流调查共调查了4个断面(图4)。根据现场泥石流泥痕高度,使用下述公式(3~6)计算各剖面流速流量,流量计算结果显示,沿程流量从1号断面4号断面呈现出显著的放大特征,这与沟道沿途调查结果一致,即泥石流在形成运动过程中,沿程裹挟沟床沟道堆积物及侧蚀沟道两侧崩滑堆积体等松散堆积物,导致泥石流规模沿程增大。此外,由于泥石流对沟道两岸的淘蚀,沟道两侧产生较多浅层小滑坡,滑坡堵塞参与到泥石流活动中对泥石流的放大效应也起到了积极的补充作用。流速流量冲出量根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》^[16]采用下述各公式计算:

$$V_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$Q_c = W_c V_c \quad (4)$$

$$Q = 0.264 T Q_c \quad (5)$$

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (6)$$

式中, V_c 为泥石流断面平均流速(m/s); n_c 糙率系数; H_c 为泥石流平均泥深(m); I_c 为泥位纵坡率,以沟道纵坡率代替; Q_c 为泥石流断面峰值流量(m³/s); W_c 为泥石流过流断面面积(m²); T 为泥石流历时(s); Q_H 为一阵泥石流冲出固体物质总量(m³); Q 为一阵泥石流过程总量(m³); γ_c 为泥石流重度(t/m³); γ_w 为水的重度(t/m³); γ_H 为泥石流固体物质的重度(t/m³)。

各断面计算结果见表1。结合调查泥石流历时1.5 h,计算得泥石流冲出固体物质总量为3.28 × 10⁵ m³,与常鸣等^[17]提出的泥石流冲出量估算模型计算得到的泥石流总量2.93 × 10⁵ m³结果较为吻合,因此计算结果具有可靠性,形态调查法适用于反映本次泥石流活动的动力特征。

表1 泥石流流速流量计算结果

Table1 Debris flow velocity and flow calculation results

断面编号	纵坡降 I_c	糙率系数 $\frac{1}{n_c}$	平均泥深 H_c/m	流速 $V_c/(m \cdot s^{-1})$	平均宽度/m	断面面积/m ²	断面流量 $Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$
1	0.08	15	2.0	6.7	28	56.0	377
2	0.08	15	1.8	6.2	38	68.4	429
3	0.08	15	1.6	5.8	47	75.2	436
4	0.08	15	1.6	5.8	50	80.0	464

4 泥石流物源演化特征及发展趋势

4.1 物源演化特征

通过获取流域泥石流灾害前后两期遥感影像(2015年与2019年),利用 arcgis 解译了坡面物源和沟道物源,从大尺度及局部分析了流域物源演化特征(图9),统计结果显示泥石流灾后坡面物源面积为 $187.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,沟道物源面积为 $88.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,泥石流灾前坡面物源面积为 $324.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,沟道物源面积为 $56.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,其中沟道物源的解译以影像裸露沟道为依据。通过对比,2019年相较于2015年流域坡面崩滑体物源呈减少趋势,面积减少了 $137.1 \times$

10^4 m^2 ,减少42%,对滑坡局部分析也显示震后坡面崩滑体良好的恢复趋势(图9);沟道物源面积具有增加趋势,面积增加了 $31.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,增加55.6%,现场调查灾后沟道物源平均厚度约1~2 m,预估沟道物源量达 $132.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。即震后该流域在长达11年的时间尺度上,随着植被的恢复和松散滑坡体的固结,裸露的坡面物源呈现良好的恢复趋势,一方面整个流域内滑坡数量减少,另一方面滑坡的面积也在减少,但另外值得重视的是在其恢复过程中存在这一个坡面崩滑体物源在多个降雨年中不断向沟道输送物源,从而转变为沟道堆积物的过程。沟道物源增加,使得沟床物质在良好的降雨条件下易启动形成沟道型泥石流。

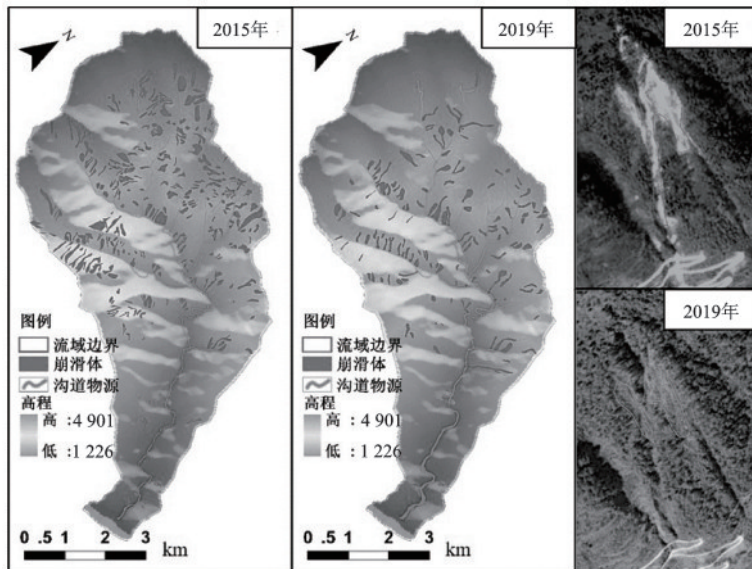


图9 物源演化特征

Fig. 9 Provenance evolution characteristics

4.2 发展趋势

汶川地区泥石流震后暴发频率相比震前有明显提高,继2010年群发性泥石流和2013年群发性泥石流后,又于2019年在强降雨条件下多条沟道暴发泥石流。相比于震前两场群发性泥石流,本次泥石流暴发过程与其既相似又有不同,相似点在于泥石流暴发均受震后影响较大,物源均来自坡面崩滑体和沟道物源,不同点在于坡面同震滑坡在震后的时间线上稳定性逐年增加,坡面物源在泥石流形成过程中逐渐减少。以登溪沟为例,本次调查发现沟道大量沟床堆积物侵蚀启动成为了此次沟道泥石流活动固体物质重要的物源补给。泥石流暴发

后,沟道中仍有大量堆积,泥石流对河道两岸的淘蚀使得部分岸坡堆积在未来降雨条件下可能失稳再次活动,堵塞挤压沟道(图10),补充沟道物源。

调查发现登溪沟流域内缺少泥石流拦挡坝,仅在沟口设立一座拦挡坝,相比于同地区其他泥石流沟道数量严重偏少,库容及拦挡能力设计不足,仅大约有 $4.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 库容(图11),且在前期河流输沙活动中已消耗了部分库容,在本次泥石流活动中,坝后淤满,起到了一定的拦挡作用,但相较于庞大的冲出量而言,仍然缺乏。对流域的物源解译调查显示,泥石流活动后流域内仍然存在较多坡面崩滑体物源和沟道堆积物源,物源总量相对丰富。另外,近几年来夏季雨量有增大趋势,山洪形势严峻,

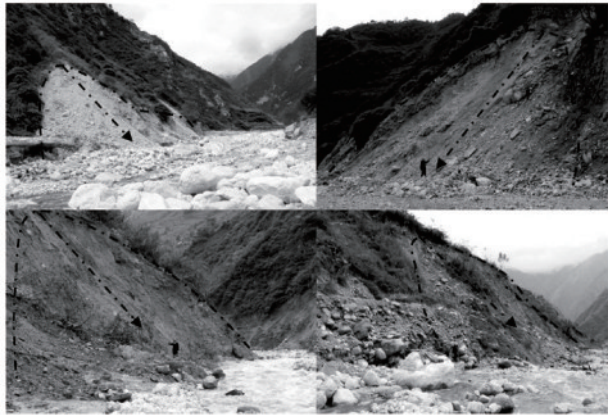


图10 流域部分活动滑坡特征
Fig.10 Partial active landslide

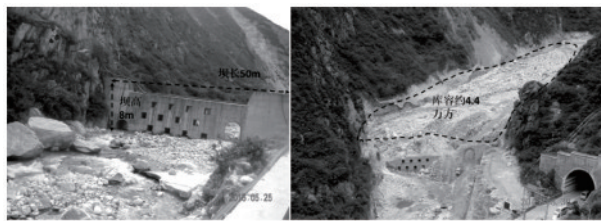


图11 拦挡坝受损及库容
Fig.11 Debris flow dam damage and storage capacity

未来沟道仍有暴发泥石流活动的可能性,泥石流活动可能再持续数年,直到沟床物质被不断带出,达到一定的稳定水平,因此应充分做好物源调查和防灾规划以应对潜在泥石流灾害。

5 结 论

(1)根据降雨数据的分析,“8·20”登西沟泥石流是在短时强降雨条件下发生的,强降雨过程是诱发泥石流灾害的动力因素,降雨激发雨型属于短期突然降雨型,主要降雨时间集中在8月19日23时至8月20日7时,泥石流暴发于8月20日2时,泥石流前期累计雨量15.3 mm,激发雨强为12.7 mm。

(2)强烈的沟道侵蚀是本次泥石流冲出固体物质的重要物源补给,堆积于沟道两侧和沟道中的物质在洪水和泥石流的裹挟作用下不断并入到泥石流活动中,扩大了泥石流规模,同时侵蚀作用表现为强烈下蚀和侧蚀,对灾后现场测量沿程泥石流沟道均有明显不同程度的加深和扩宽,部分段落基岩裸露,坡脚遭受侵蚀,产生大面积坍塌,坍塌的物质继续补充到泥石流活动中,致使最终泥石流冲出规模较大。本次泥石流沟道运动模式为降雨快速汇

流-沟道物质启动形成泥石流-泥石流铲刮裹挟沟道底部侧面物质-岸坡坍塌堵溃-泥石流规模放大冲出沟口。

(3)对登溪沟典型断面泥石流流速和流量的计算显示,泥石流最大流速可达6.7 m/s,最大流量约464 m³/s,冲出规模达3.28 × 10⁵ m³,较大的流速、流量与冲出规模对应了本次泥石流的强大破坏力,冲毁房屋、省道、高速路,堵塞沟口岷江,形成局部水位上升,致使岷江改道,形成了破坏严重的灾害链式效应。

(4)近年来,震区泥石流活动随着流域内坡面崩滑体的恢复,物源的演化转移,逐渐有从坡面物源启动为主的泥石流向沟道型泥石流转变的趋势。随着物源的演化,泥石流活动的形成机制及运移过程发生了变化。对登溪沟泥石流活动调查显示尽管离地震爆发已有12年,流域内植被和大量崩塌体逐渐恢复,但一次泥石流活动只是带出了少量的物质,流域内仍然有丰富的物源储量可能形成泥石流活动,该区域仍然有暴发泥石流的风险,必须加强该地区的物源调查和防灾规划以应对下次可能暴发的泥石流活动。

参考文献:

- [1] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68 (2): 187-194.
- [2] 许强.汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J].地质灾害与环境, 2009, 20(2): 86-93.
Xu Q. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(2): 86-93. (in Chinese)
- [3] 唐川,李为乐,丁军,等.汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J].地球科学(中国地大学报), 2011, 36(1): 172-180.
Tang C, Li W L, D J, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2011, 36(1): 172-180. (in Chinese)
- [4] 龚柯,杨涛,夏晨皓,等.基于FLO-2D的泥石流危险性评价——以四川省汶川县绵虬镇簇沟为例[J].水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 134-138.
Gong K, Yang T, Xia C H, et al. Assessment on the

- hazard of debris flow based on FLO-2D: a case study of debris flow in Cutou gully, Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Water Resources Water Engineering, 2017, 28(6):134-138. (in Chinese)
- [5] 向国萍,张丹丹,常鸣,等.七盘沟堰塞体溃决后水动力特征及沟内泥石流启动条件分析[J].水电能源科学, 2015, 33(4):143-146.
Xiang G P, Zhang D D, Chang M, et al. Hydrodynamics and debris dam break flow-triggering conditions after in Qipangou gully [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4):143-146. (in Chinese)
- [6] 黄成.震后都汶高速“7·10”群发泥石流形成特征及物源演化规律[D].绵阳:西南科技大学, 2019.
Huang C. Formation characteristics and evolution of sediment of “7·10” group debris flow in Duwen expressway after the earthquake [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 许冲,徐锡伟,吴熙彦,等.2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J].工程地质学报, 2013, 21(1):25-44.
Xu C, Xu X W, Wu X Y, et al. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1):25-44. (in Chinese)
- [8] 刘希林,王全才,孔纪名,等.都(江堰)汶(川)公路泥石流危险性评价及活动趋势[J].防灾减灾工程学报, 2004, 24(1):41-46.
Liu X L, Wang Q C, Kong J M, et al. Hazard assessment of debris flows and their developing trend along Dujiangyan-Wenchuan highway [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1):41-46. (in Chinese)
- [9] 常鸣,窦向阳,范宣梅,等.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 M, Dou X Y, Fan X M, et al. Critical rainfall patterns for rainfall-induced debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. Geoscience, 2018, 32(3):623-630. (in Chinese)
- [10] 黄润秋,李为乐.“5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J].岩石力学与工程报, 2008, 27(12):2585-2592.
Huang R Q, Li W L. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2585-2592. (in Chinese)
- [11] 朱静,唐川.遥感技术在我国滑坡研究中的应用综述[J].遥感技术与应用, 2012, 27(3):458-464.
Zhu J, Tang C. An overview of remote sensing applications for landslide research in China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(3):458-464. (in Chinese)
- [12] 唐川,梁京涛.汶川震区北川9·24暴雨泥石流特征研究[J].工程地质学报, 2008, 16(6):751-758.
Tang C, Liang J T. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):751-758. (in Chinese)
- [13] Tang C, Zhu J, Chang M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. Quaternary International, 2012, 250:63-73.
- [14] Coe J A, Glancy P A, Whitney J W. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain Nevada [J]. Geomorphology, 1997, 20:11-28.
- [15] Griffiths P G, Webb R H, Melis T S. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109:321-336.
- [16] 泥石流灾害防治工程勘察规范(试行):T/CAGHP006-2018[S].北京:中国地质灾害防治工程行业协会, 2018.
- [17] 常鸣,唐川,夏添,等.强震区泥石流堆积物的演化特征与方量估算模型[J].水利学报, 2012(增2):117-121.
Chang M, Tang C, Xia T, et al. Debris flow deposits model and accumulation evolution in seismic area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012 (Sup2):117-121. (in Chinese)

(本文责编:池营营)