

doi:10.3799/dqkx.2011.018

# 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查

唐川, 李为乐, 丁军, 黄翔超

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:** 2010年8月14日强降雨过程导致汶川震区映秀镇红椿沟泥石流暴发, 泥石流堰塞堆积体堵塞岷江主河道, 导致河水改道冲入映秀新镇, 引发洪水泛滥; 造成映秀镇13人死亡、59人失踪, 受灾群众8000余人被迫避险转移。由于这场泥石流灾害发生在汶川地震震中区, 是地震与降雨共同作用下的结果, 研究其形成与成灾过程对于进一步认识强震区泥石流发育特征具有重要的意义。根据现场调查和航空图像解译, 分析了红椿沟泥石流流域特征, 特别是地震条件下的泥石流物源特征, 在此基础上讨论了泥石流起动过程和堆积过程。红椿沟泥石流典型实例表明了汶川震区泥石流已进入一个新的活跃期。因此, 应该开展对汶川地震区的泥石流风险评估和监测、早期预警等研究, 采取有效的工程措施控制泥石流的发生和危害。

**关键词:** 泥石流; 堰塞堆积体; 洪水泛滥; 汶川地震; 映秀镇。

中图分类号: P315; X141

文章编号: 1000-2383(2011)01-0172-09

收稿日期: 2010-07-29

## Field Investigation and Research on Giant Debris Flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, Epicenter of Wenchuan Earthquake

TANG Chuan, LI Wei-le, DING Jun, HUANG Xiang-chao

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

**Abstract:** A rainstorm triggered debris flow hazard occurred in Hongchun valley, Yingxiu town, epicenter of the Wenchuan earthquake on August 14, 2010. This event transported huge material sediment to the watercourse of the Minjiang River and produced a natural dam, resulting in flash flood in the new Yingxiu town. The flood claimed 13 lives, with a further 59 listed as missing. About 8000 local residents were rapidly evacuated from their homes. The debris flow resulted from the coaction of the rainfall and earthquake. Therefore, it is significant for better understanding of development characters of debris flows to conduct the research on the initiation and movement process in high seismic intensity area. This paper studies characteristics of the initiation conditions and depositional fans of the debris flow based on field reconnaissance and interpretations of aerial photographs, focusing on loose sediment supply in source areas of debris flows. On the basis of the above analysis, the initiation and deposition process of debris flows are discussed. The catastrophic event indicates that the areas impacted by the Wenchuan earthquake become more prone to debris flow occurrences in the future. So it is important to assess debris flow risk and take measures to enhance hazard monitoring and offer early warnings for debris flows in the earthquake areas. The control work is also necessary for debris flow hazard mitigation.

**Key words:** debris flow; barrier dam; inundation; Wenchuan earthquake; Yingxiu town.

### 0 引言

强烈地震导致山地区域的地质环境更加脆弱, 导致泥石流活动更加频繁、危害更加严重; 大量事实表明, “5·12”汶川地震后, 整个震区滑坡、泥石流活

动异常强烈, 泥石流活动极为旺盛 (Tang *et al.*, 2009; 唐川等, 2010)。汶川大地震发生至今已2年多, 经历了近3个雨季, 震后的暴雨过程诱发了群发性泥石流灾害, 造成大量人员伤亡, 并给灾区的恢复重建带来了许多新的困难。特别是2010年8月强降

基金项目: 国家重点基础研究发燕尾服计划“973”项目 (No. 2011CB409903); 国家自然科学基金 (No. 40772206); 地质灾害防治地国家重点实验室自主研究基金 (No. SKLGP2009Z2004)。

作者简介: 唐川 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害、环境地质遥感与 GIS 应用研究。E-mail: tangc@cdut.edu.cn

雨天气的影响,2010年8月7日甘肃省舟曲县城后山三眼峪沟及罗家峪沟突发大规模泥石流,造成了重大的生命财产损失。截至2010年8月17日,遇难人数为1270人,失踪人数为474人;泥石流冲毁房屋5500余间,掩埋、冲毁耕地1400余亩;受灾最严重的月圆村几乎被全部掩埋。泥石流还穿过舟曲县城,冲毁县城一部分街道和房屋,毁坏公路桥、人行桥共8座,在白龙江内形成长约550m,宽约70m的堰塞坝,堰塞坝堵塞白龙江并形成回水长3km的堰塞湖,堰塞湖使县城一半被淹,城区电力、通信、供水中断。尽管舟曲县城处于汶川地震 $6^{\circ}$ 烈度区,但是山地环境受汶川地震的影响亦非常明显,汶川地震导致流域内产生了更多的固体物源,还形成了新的堆石坝,使泥石流流量和规模特别大。根据笔者实地调查和计算,三眼峪沟和罗家峪沟泥石流的洪峰流量分别达 $1712\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $564\text{ m}^3/\text{s}$ ,泥石流冲出总量和泥沙总量分别为 $144.2 \times 10^4\text{ m}^3$ 和 $97.7 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

2010年8月13日在汶川地震高烈度区的四川省绵竹市清平乡的文家沟暴发特大泥石流灾害,形成长达3500m,宽350~450m的超大型泥石流堆积扇,其冲出泥砂石块达 $400 \times 10^4\text{ m}^3$ ,这也是国内近20多年来有记录的规模最大的一次泥石流灾害。这场泥石流过程共造成7人死亡,7人失踪,特别是冲下来的泥石流堆积体淤平了下游3.5km的绵远河河道,迫使主河道改道,由左岸向右岸推移300m左右,由此导致洪水大范围泛滥,淹没清平乡场镇,受灾人数6000多人。2010年8月13日在汶川地震的震中区映秀镇的红椿沟也暴发了特大规模的泥石流灾害,其冲出的堆积物堵断了岷江河道形成堰塞湖,由于泥石流堆积扇的强烈顶托,迫使岷江洪水冲向映秀镇,新建的映秀镇被淹,洪水泛滥造成映秀镇13人死亡、59人失踪,受灾群众8000余人被迫避险转移。由于映秀镇地处于汶川地震的震中位置,是地质灾害高强度区,国土资源部门开展了大量调查工作,例如,2008年7月四川省广汉地质工程勘察院完成了《四川省“5·12”特大地震后汶川县地质灾害应急排查报告》,其结论是红椿沟为一条老泥石流沟,沟口由于修建草坡变电站沟道受挤压,虽修建了简易排导槽但仍不能满足泥石流过流的要求;“5·12”地震后,沟道内大量松散物质进入沟道,致使沟道多处堆积堵塞严重,易发生泥石流,暴雨季节建议撤离沟口居住村民。2009年2月该院又完成了《四川省阿坝州汶川映秀镇灾后恢复重建规划区地

质灾害危险性评估报告》及《四川省阿坝州汶川映秀镇灾后恢复重建规划区地质灾害专项防治规划》,评估结论为红椿沟受汶川地震影响,沟道两侧斜坡变形破坏严重,沟内物源增加,原沟道堵塞严重,加之沟道汇水面积大,如遇暴雨,极易产生规模较大的泥石流,危害性及危险性大,建议对其进行勘查治理。本文根据对映秀镇“8·14”红椿沟特大泥石流灾害的应急调查,结合前人的调查数据资料,分析了泥石流灾害特征、成因和成灾过程,计算泥石流动力学参数,为进一步认识汶川震区泥石流规模、频率和危险性等特征提供了重要参考,也为汶川震区泥石流灾害的预警预报及工程治理提供了科学依据。

## 1 流域特征

红椿沟位于汶川县映秀镇东北侧,岷江左岸,沟口坐标北纬 $31^{\circ}04'01''\text{N}$ ,东经 $103^{\circ}29'33''\text{E}$ ,沟口堆积扇区为映秀镇场镇灾后恢复重建规划区,都江堰至汶川高速公路及G213国道亦穿越泥石流堆积区。映秀属于中山河谷地区,位于四川台地的边缘与龙门山准地槽南延部分的过渡带上,汶川地震的发震断裂——映秀—北川断裂正好从该区通过(图1),其地势以中滩堡大断层分界,西北高而东南低,断层西北为平武茂汶褶皱带火山岩区,山高坡陡,河谷深切,断层东南属四川台地边缘,山体较低。境内以花岗岩为主,中细粒闪长岩次之。映秀镇所在地为岷江及其支流渔子溪河的一级阶地及斜坡台地,地势平坦开阔,一级阶地海拔约920m,与江面的高差约5~10m。

红椿沟流域地形总体上属深切切割构造侵蚀低山和中山地形,总体上具有岸坡陡峻,切割深度较大的特点,中上游呈深切切割“V”型谷,下游沟口段沟床较宽缓,呈“U”型谷。沟域面积 $5.35\text{ km}^2$ ,主沟纵长3.6km,最高点望乡石高程2168.4m,沟口与岷江交汇处高程880m,相对高差1288.4m,主沟平均纵坡降约358‰,其中上游新店子沟段纵坡较大,达538‰,以下沟段总体上纵坡略缓,且呈现陡缓相间的空间变化特征(图1)。

映秀镇属四川盆地边缘亚热带湿润季风气候区,属川西多雨中心区,是暴雨常出现的地区之一,四季分明,气候温和,映秀镇多年平均降水量为1253.1mm,最大年降水量为1688mm(出现在1964年),最小年降水量为836.7mm(出现在1974年),夏季暴雨频繁,强度大、历时短,6~9月降雨量站全年

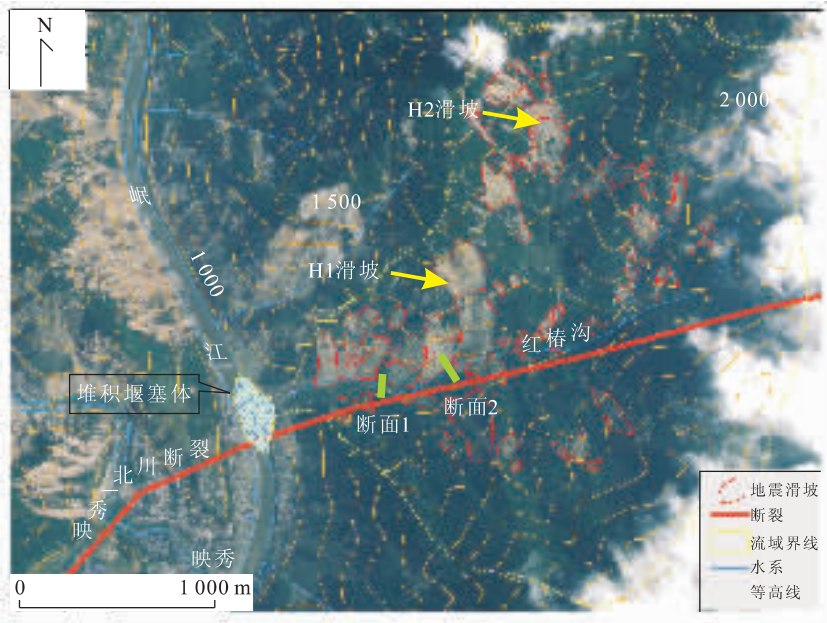


图 1 摄于 2008 年 5 月 18 日的航空影像反映的红椿沟泥石流流域特征及地震诱发的滑坡特征

Fig. 1 Aerial photograph taken on 18 May, 2008 shows the drainage area of the Hongchun debris flow and characterization of the earthquake induced landslides

的 60%~70%，日最大降水量 269.8 mm。岷江由银杏乡、佛堂坝、东界脑地区流入映秀镇，河谷深切，水流湍急，河面宽度一般在 80~100 m 左右，河床平均坡降 9.7‰，最大流速 6.9 m/s，最小流速 1.44 m/s；岷江常年水位 878.37 m，最高水位 880.57 m（1985 年测），最低水位 877.65 m（1985 年测）；汛期主要为降水补给，枯季为融雪和地下水补给。

据 2009 年四川省广汉地质工程勘察院对红椿沟泥石流灾害访问调查，该沟是一条老泥石流沟，历史上曾发生过两次规模较小的泥石流过程，一次为 20 世纪 30 年代初期，未造成灾害；另一次为 1962 年 8 月，泥石流冲出沟口，部分堵塞岷江河道，顶托岷江水流向对岸偏移，造成局部洪水泛滥。根据笔者现场访问，“5·12”地震后的 2009 年 7 月 17 日出现暴雨过程，据距离映秀镇最近的都江堰气象站降水资料，全天总降雨量达 336 mm，但是此次的降雨仅诱发了红椿沟上游 3 条支沟发生小规模泥石流。

## 2 成因分析

震区泥石流的形成发育最显著而典型的特点就是强震作用下为泥石流流域提供大量松散固体物质来源，更有利于泥石流沟的活动(Lin *et al.*, 2004; Lin *et al.*, 2006)。映秀镇红椿沟泥石流灾害的形成

主要受地形地貌、地层岩性、地质构造以及地震活动的控制，特别是在强烈地震作用的基础上又叠加暴雨作用，导致了这场灾害性泥石流的暴发。

### 2.1 降雨条件

根据设置在映秀镇气象台的实测数据，2010 年 8 月 12 日 17:00 时映秀镇范围开始降雨，当日累计降雨量为 19.9 mm；13 日降雨时段较长，累计降雨量为 126.8 mm，最大小时雨强为 32.2 mm；2010 年 8 月 14 日泥石流暴发(3:00 时)前的累计降雨量为 23.4 mm，即红椿沟泥石流发生的前期降雨量总计达 162.1 mm，可能最终诱发红椿沟泥石流的激发降雨出现在 2010 年 8 月 14 日凌晨 2:00~3:00 时，其小时最大雨强仅为 16.4 mm。图 2 说明了诱发泥石流发生的整个降雨过程和强度特征。

关于降雨对泥石流的激发作用，也即泥石流发生的临界雨量问题，很多学者进行了大量研究(谭万沛和韩庆玉, 1992; 崔鹏等, 2003; Liu *et al.*, 2008)，谭万沛和韩庆玉(1992)对四川省泥石流发生的临界雨量进行了研究，龙门山地区泥石流发生的临界雨量为 80~100 mm，小时雨强为 30~50 mm(谭万沛和韩庆玉, 1992)。对比这次映秀镇“8·14”泥石流发生的降雨条件，其前期的雨量大于此值，而激发雨强却降低 45%~67%。在强降雨作用下，引起红椿沟上游多处滑坡强烈活动，在中游沟道两岸坡松散残坡积堆积层发生大面积滑塌，在局部较狭窄的沟段

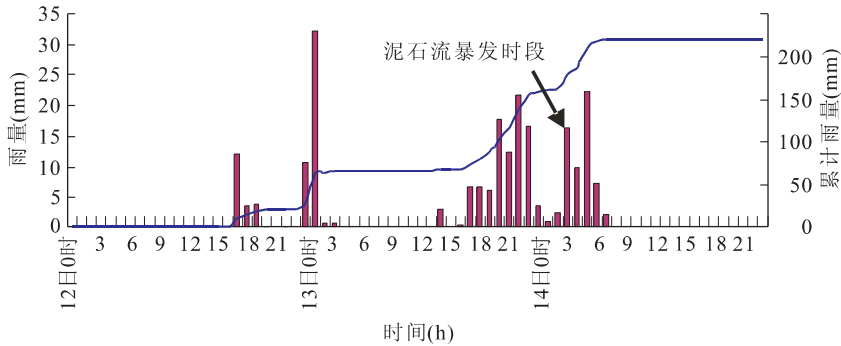


图 2 泥石流暴发前后映秀镇降雨累积

Fig. 2 Cumulative curve of rainfall prior to and after debris flow occurrence in the Yingxiu town

造成严重堵塞,流域上游洪水迅速汇流后,猛烈冲刷沟谷和斜坡松散固体堆积物,特别是导致了沟道中上游地震滑坡堵塞体突然溃决,导致大规模泥石流的暴发。

## 2.2 物源条件

“5·12”汶川地震的发震断裂,即映秀—北川主断裂起始于映秀,并沿红椿沟沟谷主方向穿越整个流域,震后在沟口位置可见明显的地表破裂,最大垂直位移量达 2.3 m,并右行位错 0.8 m。汶川地震作用诱发了大量的崩塌、滑坡,为泥石流的形成提供了重要的松散物质,处于映秀—北川发震断裂带的红椿沟由寒武系花岗岩、闪长岩组成的斜坡体受汶川地震强烈作用导致沟谷两岸坡体大面积失稳,形成较大规模滑坡体。这些滑坡堆积物胶结和固结很差,在流水冲刷下,极易产生底蚀和侧蚀,使泥砂迅速发生输移流动。笔者利用震后 2008 年 5 月 18 日拍摄的 0.5 m 分辨率的航空图像进行了解译和分析,红椿沟流域内发育大小规模滑坡体共 70 处(图 1),滑坡平面总面积为  $76.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,厚度变化较大,从 1~18 m 不等,估算流域滑坡总体积可达  $384.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这些滑坡相对集中分布于沟谷的右岸坡面,该地段恰处于映秀—北川断裂的上盘,说明上盘效应对斜坡稳定影响很明显。这里需要特别强调的是导致“8·14”特大泥石流灾害流量瞬时放大效应的根源在于沟内发育的滑坡堰塞体溃决作用。调查发现在海拔 1 080 m 和 1 500 m 处分别形成有一定规模的滑坡堰塞体(图 1),海拔 1 080 m 处的滑体(H1)位于主沟中游右侧岸坡,滑坡体顺坡长约 590 m,平均宽约 210 m,滑坡平均厚度 4~12 m,滑坡总方量约  $65 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该滑坡整体下滑并严重堵塞沟道,沿沟道堆积长度约 150 m,堆积高 10~40 m(图 1)。分布在 1 500 m 处的滑坡(H2)位于主沟上游右侧岸坡,滑坡体顺坡长约 280 m,平均宽约

140 m,滑坡厚度 3~8 m,滑坡总方量约  $24 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,该滑坡下滑也堵塞沟道,沿沟道堆积长度约 60 m,堆积高 10~30 m(图 1)。此外,在泥石流物源区 70% 以上的沟道都堆积了大量松散堆积物,这些大量的松散固体物质是泥石流强烈活动的重要补给源。

## 2.3 地形条件

红椿沟沟谷呈 V 型谷,纵坡比降大,沟道上游跌坎多,显出新构造运动期间山体强烈抬升的特征。特别是汶川地震后,沟谷地形发生了明显变化,部分山坡由凸形坡转为凹形坡,沟道堆积和堵塞现象严重,物源区扩大。此外,该流域的形成区与流通区沟道较顺直,有利于雨水的快速汇流,使得松散物质容易起动,并在运动过程中流速快、能量消耗少,有利于泥石流物质的流通。整条流域支沟不发育,仅发育 2 条支沟,沟域内两侧山高坡陡,坡度在  $35^\circ \sim 50^\circ$  之间,由于地形陡峻,表层土体结构松散及岩石节理裂隙发育,多被切割成块状,为崩塌、滑坡等不良地质现象的发育提供了有利条件。沟道内常年有流水,较大的地形高差,使处于斜坡高处的风化岩体具有较大势能,为形成崩塌、滑坡创造了有利临空条件;在地震影响下,陡峻的山坡和沟床为坡面和沟床松散堆积物能的释放和势能转化为动能提供了有利条件,为沟中洪水强烈冲刷坡面和沟床松散堆积物、形成高速泥石流汇流形成了巨大的动能条件。

## 3 泥石流形成、运动和堆积特征

红椿沟曾于 20 世纪 30 年代和 1962 年暴发过较小规模的泥石流,属于活动性较弱的低频泥石流沟;汶川地震后,由于流域地形条件和物源条件发生较大的变化,泥石流转为高危险性泥石流沟。据对目击者访问,这场灾难性泥石流始发于 2010 年 8 月





图 3 泥石流起动区的滑坡体被表层水流冲蚀成的沟道  
Fig. 3 Surface-flow eroded the gully in the landslides deposits of debris flow initiation area



图 4 H1 滑坡溃决后的沟道特征  
Fig. 4 Channel features after outburst of H1 landslide in debris flow basin

14 日凌晨 3 时左右,居住在沟口附近民工描述此时沟内响声如雷,地面颤动,大规模泥砂石块冲入岷江河道,到了凌晨 4 点以后沟内泥石流声音渐小,随后是山洪过程,整个泥石流过程大约持续了约 90 min. 红椿沟流域的泥石流起动首先是以“拉槽”方式侵蚀坡面上松散滑坡堆积体,形成山洪、泥石流过程。根据对泥石流沟上游物源区调查,泥石流起动发生在海拔 1 500~1 900 m 处,位于沟谷右岸斜坡上的滑坡体表面和前缘松散物质在强降雨作用形成的地表径流强烈冲刷侵蚀下,首先在松散的滑坡体两侧相对低凹部位水流快速集中,迅速冲蚀成沟道,随着沟道不断加深加宽,山洪携带的泥沙也增多而转化为泥石流流体(图 3);同时,主沟形成的洪水也冲刷沟道中滑坡堰塞堆积体及其他松散固体物质,使沟中滑坡堆积物大量被掀动或发生局部溃决,迅速与新冲蚀沟道中的泥石流汇合并向下游运动。

根据降雨历程和雨量分析(图 2),2010 年 8 月

13 日晚 21:00 时至 14 日凌晨 1:00 时的 4 h 连续降雨,其累计雨量 68.5 mm,此时段的流域已形成山洪,开始产生冲刷侵蚀作用,在上游支沟或滑坡侧缘新沟道已出现小规模泥石流,当大量泥砂石块运动到海拔 1 080 处的滑坡堰塞体处严重受阻,于是高挟砂洪水从滑坡堰塞体顶部和之前冲刷的狭窄沟道下泄,直到 14 日凌晨 2:00~3:00 时再次出现较大的降雨,滑坡堰塞体受到上游更强烈冲刷,于是整体发生突然完全溃决。图 4 是 H1 滑坡溃决后的沟道特征,沟谷两侧原滑坡堰塞体的残留体,溃决后沟道拓宽至 25~35 m。

溃决后导致泥石流洪峰流量瞬时放大,沿途强烈侵蚀两岸滑坡堆积物,掏蚀沟床松散物质,沿下游沟道直倾岷江,不仅冲毁淤埋在建的都江堰至汶川高速公路及 G213 国道,更是堵断了岷江干流河道形成壅塞体,图 5 是泥石流堆积扇全貌。泥石流形成的堆积扇总长 470 m,最大宽度 350 m,总面积为 96 500 m<sup>2</sup>,



图 5 红椿沟泥石流发生前后堆积扇特征

Fig. 5 Depositional characteristics of the Hongchun valley prior to and after “8·14” debris flow occurrence  
a. 泥石流发生后形成的大型堆积扇,阻断岷江河道,掩埋公路;b. 泥石流发生前的老堆积扇



图 6 摄于 2010 年 8 月 15 日的航空照片反映了红椿沟泥石流扇及其壅塞堆积体,以及映秀新镇洪水泛滥灾情(由四川省地质环境监测总站提供)

Fig. 6 Aerial photo taken on August 15, 2010 shows the Hongchun debris flow fan and natural dam, and inundation in newly reconstructed Yingxiu town



图 7 映秀新镇被洪水泛滥,洪水水深 2.0~3.5 m,水淹时间长达 7 日

Fig. 7 Newly reconstructed Yingxiu town was flooded due to debris flow dam. Flood water-depth was estimated at 2.0—3.5 m and flood duration lasted 7 days

导致岷江约 150 m 宽的河道全部淤满,堵断岷江河道,河水水位上涨,改道右岸形成 20~30 m 宽的溢洪道冲入映秀新镇,造成映秀镇的洪水泛滥(图 6 和图 7)。根据笔者对壅塞体测量结果,在岷江河道处最深大约 9 m,堰塞体高出岷江上游水面近 3 m,沿河从上游到下游长达 350 m,面积大约 42 576 m<sup>2</sup>,壅塞体的应急处理难度非常大,直至 2010 年 8 月 19 日壅塞体左岸泄洪槽基本挖通泄洪。

这次红椿沟泥石流的搬运输送移动能力巨大,所搬运的直径 1 m 以上粗大石块随处可见,在流通区发现的最大巨石长、宽、高分别为 8.5 m × 4.5 m × 4.0 m(图 8),堆积扇上最大巨石为 3.3 m ×



图 8 泥石流搬运的最大巨石,其长、宽、高分别为 8.5 m × 4.5 m × 4.0 m

Fig. 8 Maximum size boulders with length, width and height of 8.5 m × 4.5 m × 4.0 m, transported by debris flow

2.5 m × 2.4 m,泥石流中的巨石是造成建筑物被毁的主要原因。据现场调查,红椿沟泥石流过程持续约 90 min。利用泥石流发生前的 1:2000 地形图及发生后航拍照片,可以计算出“8·14”特大泥石流活动的泥石流总量为 71.1 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,其中冲出 G213 国道以下形成壅塞体的堆积物方量为 39.7 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,仍然停留于 G213 国道以上宽谷段的堆积体方量为 31.4 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,属特大泥石流(表 1)。

#### 4 泥石流的静力学和动力学特征

泥石流的沉积特征为混杂沉积,有明显的反粒径分布,初步判断泥石流为粘性泥石流。根据调查时在红椿沟的取样实验分析,绘制出泥石流堆积物颗粒分布曲线(图 9),利用余斌(2008a)提出的如下粘性泥石流容重公式(余斌,2008a),对红椿沟泥石流的 2 处断面(图 1)的容重进行计算:

$$\gamma_d = \gamma_0 + P_2 P_{05}^{0.35} \gamma_v, \quad (1)$$

式中: $\gamma_d$  为粘性泥石流容重(g/cm<sup>3</sup>); $\gamma_v$  为粘性泥石流最小容重(=2.0 g/cm<sup>3</sup>); $\gamma_0$  为泥石流最小容重(=1.5 g/cm<sup>3</sup>); $P_2 \geq 2$  mm 的粗颗粒百分含量(小数表示); $P_{05} \leq 0.05$  mm 的粗颗粒百分含量(小数表示)。计算结果见表 2。

表 2 所列的泥石流容重为 2.05 g/cm<sup>3</sup>,表明“8·14”特大泥石流是典型的粘性泥石流,泥石流的泥沙体积浓度  $C$ (计算公式见公式 7)大于 0.6,即泥石流流体中 62% 都是泥沙。红椿沟泥石流流体中的粘粒含量平均为 2.3%。

表 1 映秀镇红椿沟“8·14”特大泥石流总量计算

Table 1 Calculated results of total volume of debris flows

堆积扇总面积 (m <sup>2</sup> )	壅塞体面积 (m <sup>2</sup> )	壅塞体高度 (m)	壅塞体泥砂量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	扇体上段堆积面积 (m <sup>2</sup> )	扇体上段堆积厚度 (m)	扇体上段扇堆积泥砂量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	泥石流总量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
96 510	49 700	7~9	39.7	78 500	2.0~6.0	31.4	71.1

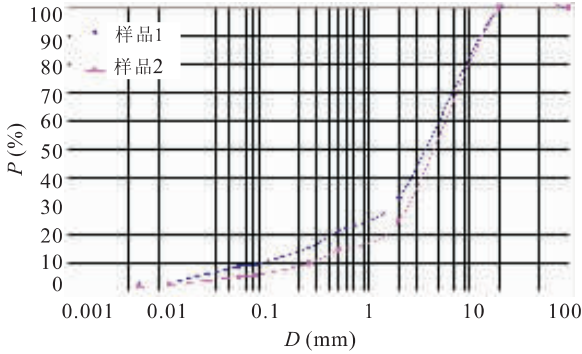


图 9 颗粒分布曲线

Fig. 9 Particle distributions of sediment in debris flows

表 2 泥石流容重计算

Table 2 Calculation of densities of debris flows

	$P_2$ (%)	$P_{05}$ (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C$
断面 1-1'	67.1	8.6	2.07	0.629
断面 2-2'	75.4	5.1	2.03	0.606
平均	71.25	6.85	2.05	0.618

泥石流的屈服应力是反映泥石流,特别是粘性泥石流特征的重要参数,根据在红椿沟的调查可以得到粘性泥石流的屈服应力(余斌,2010):

$$\tau_b = \gamma' g h \sin \theta, \quad (2)$$

式中  $\tau_b$  为泥石流流体屈服应力(Pa);  $\gamma'$  为  $(\gamma_c - \gamma_0)$ , 泥石流相对容重(kg/m<sup>3</sup>);  $\gamma_c$  为泥石流容重(=2 050 kg/m<sup>3</sup>),  $\gamma_0$  为环境容重,在陆面  $\gamma_0 \approx 0$ ,在水中  $\gamma_0$  为 1 000 kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度(=9.819 m/s<sup>2</sup>);  $\theta$  为坡度(=8.50),  $h$  为泥石流的最大堆积厚度(=3 m). 由式(2)得到  $\tau_b = 8 918$  Pa.

根据公式(2)计算,红椿沟泥石流的屈服应力为 8 918 Pa,具备较大的屈服应力,反映了泥石流堆积体有很强的抵抗上游岷江洪水冲刷侵蚀能力,这是泥石流能堵塞岷江主河道的重要原因之一.

泥石流的运动速度、流量和总量是泥石流重要的动力学特性,也是泥石流防治的重要参数,通过对红椿沟流通段中残留的典型泥痕断面的测量及泥石流颗粒分析参数,按余斌(2008b)提出的模型计算粘性泥石流运动速度(余斌,2008b):

$$V = 1.1(gR)^{1/2} S^{1/3} \left[ \frac{D_{50}}{D_{10}} \right], \quad (3)$$

$$Q = VA, \quad (4)$$

式中:  $R$  为水力半径(m);  $S$  为沟道坡度(绝对值);  $g$  为重力加速度(=9.81 m/s<sup>2</sup>);  $D_{50}$  为泥沙颗粒中百分比小于 50%的颗粒粒径(mm);  $D_{10}$  为泥沙颗粒中百分比小于 10%的颗粒粒径(mm);  $V$  为泥石流断面平均流速(m/s);  $A$  为泥石流过流面积(m<sup>2</sup>);  $Q$  为泥石流流量(m<sup>3</sup>/s). 计算结果见表 3.

本次泥石流为溃决型泥石流,一次泥石流过程流体总量的计算方法采用水量平衡原理分析出的概化过程线,按下式计算(陈晓清等,2004):

$$W_c = 0.2TQ, \quad (5)$$

式中:  $W_c$  为一次泥石流流体总量(m<sup>3</sup>);  $T$  为泥石流历时(s).

按《泥石流防治工程勘查规范》推荐方法计算泥石流冲出的固体物质总量:

$$W_s = CW_c, \quad (6)$$

$$C = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_w), \quad (7)$$

式中,  $W_s$  为通过计算断面的固体物总量(m<sup>3</sup>),  $\gamma_s$  为泥石流中固体颗粒比重(g/cm<sup>3</sup>);  $\gamma_w$  为水的重度(g/cm<sup>3</sup>);  $\gamma_c$  为泥石流容重(g/cm<sup>3</sup>).

根据上述 2 个断面的计算,泥石流流速分别为 8.67 m/s 和 7.85 m/s; 最大洪峰流量分别为 745.76 m<sup>3</sup>/s 和 696.45 m<sup>3</sup>/s, 此值高出岷江映秀段日常流量为 400 m<sup>3</sup>/s 近一倍,也高于当天(8月14日)的岷江洪峰流量 570 m<sup>3</sup>/s. 表 3 中计算的泥石流总量( $W_c$ )比表 1 中调查的这条沟泥石流冲出的泥石流体积量略高,说明对红椿沟的泥石流运动速度、流量、流体总量及固体物质总量等参数的计算基本合理.

泥石流的冲击力,特别是泥石流中巨石的冲击力是造成建筑物毁坏的主要原因,“8·7”特大泥石流中巨石冲击力计算如下(章书成等,1996):

$$F = \rho_d C_1 V_d A_d, \quad (8)$$

式中:  $C_1$  为纵波波速(m/s);  $A_d$  为石块与被撞物体的接触面积(m<sup>2</sup>);  $F$  为石块冲击力(N);  $V_d$  为石块运动速度,通常和流体等速(m/s);  $\rho_d$  为石块密度(kg/m<sup>3</sup>). 表 4 中红椿沟的泥石流冲击力 3 225 t,可见其破坏力的巨大.



表 3 泥石流的运动速度、流量和总量计算

Table 3 Calculation of velocity, discharge and volume of debris flows

	$R(\text{m})$	$S$	$D_{50}(\text{mm})$	$D_{10}(\text{mm})$	$A(\text{m}^2)$	$V(\text{m}/\text{s})$	$Q(\text{m}^3/\text{s})$	$T(\text{s})$	$W_c(10^4 \text{ m}^3)$	$W_s(10^4 \text{ m}^3)$
断面 1-1'	1.15	0.15	3.7	0.08	86.0	8.67	745.76	5 400	80.5	49.7
断面 2-2'	2.61	0.16	4.3	0.25	88.7	7.85	696.45	5 400	75.2	46.5

表 4 泥石流冲击力计算

Table 4 Calculation of impact force of debris flows

$C_1(\text{m}/\text{s})$	$A_d(\text{m}^2)$	$V_d(\text{m}/\text{s})$	$\rho_d(\text{kg}/\text{m}^3)$	$F(\text{t})$
4 500	0.6	4.34	2 700	3 225

注:石块与被撞物体的接触面积按堆积扇上最大石块的中、短径所在平面面积的 10% 计算;泥石流速度按沟口以内沟道速度(表 3)的 50% 计算。

## 5 汶川震区泥石流灾害减灾对策

大量事实表明,汶川震区已进入一个新的活跃期,未来 5~10 年内泥石流发生更加频繁、活动强度更大。面对汶川震区泥石流灾害出现的新特点,今后泥石流的防治工作更加严峻,其难度更大;因此,需要进一步强化震区泥石流的减灾防灾工作,除了继续做好常规性的泥石流防治工作外,还应特别重视以下几点问题:

(1) 紧急开展汶川震区地质灾害隐患点的详细排查和编目工作,尤其是对Ⅸ及以上地震烈度区的大型泥石流沟谷进行再次排查和复核,进一步研究泥石流的发育特征、形成条件和演化规律。针对汶川震区泥石流出现的新特点,急需建立更准确合理的泥石流危险性评价新方法和危险范围预测的新模型,也可探讨利用已成功应用于日本、台湾强震区泥石流危险性 and 风险评估的新方法进行区划预测。

(2) 针对威胁城镇和人口集中区的泥石流沟,总结汶川震区已发生的泥石流规律和特征开展泥石流频率和规模评估,在进行泥石流治理工程可行性研究和施工图设计中,应认真复核泥石流的参数,特别是泥石流容重、流速、流量等与工程设计密切相关的参数。例如设计洪峰流量计算时,应充分调查沟道地震滑坡堵塞程度,在此基础上提高堵塞系数,保证设计流量及冲出量计算的合理性;在对上述问题充分论证和科学分析基础上,提高强震区泥石流灾害的防治标准。

(3) 由于泥石流具有夜间突发性,不能完全依赖于区域性临灾预报和群测群防,还应重点加强潜在危险性大、频率较低的泥石流灾害群专相结合的预警,充分利用泥石流预警仪进行专业监测预警,目前

已开发的泥位超声波警报仪、次声波预警仪和雨量法预警仪可以达到一定防灾减灾效果。由于汶川地震后,滑坡、泥石流发生所需的前期雨量和激发雨量大大降低,应该尽快根据震后 3 个雨季数据资料,重新划定泥石流发生的临界雨量;在此基础上开展雨季区域性地质灾害气象临灾预报工作。

(4) 强震区的泥石流防治工作应该充分考虑时机问题,因为在极重灾区部分大型泥石流流域已积累了特别丰富的滑坡物质来源,近几年内活动性极强,采取常规的泥石流防治工程难于有效控制泥石流的发生和运动。因此在震后 5 年内对强震区的部分活动性强大型泥石流沟不宜实施防治工程或在充分可行性科学论证基础上进行工程治理;待流域侵蚀、搬运强度有所降低,斜坡土砂趋于基本稳定后,再实施全面的防治工程。

## 6 结论

由于映秀镇红椿沟泥石流灾害发生在汶川地震震中区,泥石流的发生是地震与降雨共同作用下的结果。研究其形成与成灾过程对于进一步认识汶川震区泥石流特征有重要意义。通过对 2010 年 8 月 14 日暴雨诱发的泥石流灾害现场调查和分析,得出以下认识:

(1) 汶川地震作用诱发了大量的崩塌、滑坡,为泥石流的形成提供了重要的松散物质。处于映秀—北川发震断裂的上盘的红椿沟流域内由寒武系花岗岩、闪长岩组成的斜坡体受汶川地震强烈作用完整性被破坏,导致沟谷两岸坡体大面积失稳,形成较大规模滑坡,并在沟床堆积了大量松散堆积物,成为泥石流固体物质补给源。

(2) 地震后的强降雨过程是诱发泥石流的动力因素,泥石流暴发是前期累积雨量和当次激发雨强共同作用下的结果。泥石流暴发的前期累积雨量为 162.1 mm,激发泥石流是 2010 年 8 月 14 日凌晨 16.4 mm 的小时雨量。

(3) 红椿沟泥石流形成是由于降雨作用形成的地表径流侵蚀导致斜坡上的地震滑坡体表面和前缘



松散物质向下输移,进入沟道后转为泥石流过程;此外,流域上游暴雨产生的山洪强烈冲刷沟道中滑坡堆积体及其他松散固体物质,使沟槽内的松散堆积物被掀动或遭受揭底而形成大规模泥石流过程。

(4)这次大规模泥石流形成原因是沟床中的地震滑坡堰塞体溃决效应,导致泥石流瞬时洪峰流量放大,计算的最大流量高达  $745.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 。此值高出岷江映秀段日常流量为  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  近一倍,也大大高于当天上午(2010年8月14日)的岷江洪峰流量  $570 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泥石流形成的堆积扇堵塞岷江河道,强烈顶托岷江水流向对岸偏移,造成映秀镇的洪水泛滥。

研究表明汶川地震导致高烈度区泥石流源地的滑坡更加发育,松散物质更加丰富,强降雨过程使泥石流源地滑坡进一步复活,并产生大量新滑坡,从而使强震区泥石流发生频率增高,规模增大。2010年在汶川震区发生的灾难性泥石流的实例表明了汶川震区已进入一个新的活跃期,未来5~10年该区域泥石流发生仍将更加频繁。因此,应该紧急开展汶川震区山洪泥石流隐患点的详细排查和编目工作,进一步加强对汶川震区的泥石流沟的危险源识别调查,开展重视山洪泥石流的灾害链效应研究,重点开展城镇泥石流灾害风险评估;在潜在高危险泥石流流域建立实时监测及早期预警系统;采取更有效的工程措施控制泥石流的发生和危害。

## References

Chen, X. Q., Chen, N. S., Cui, P., 2004. Calculation of discharge of debris flow induced by glacier lake outburst. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(3): 357—362 (in Chinese with English abstract).

Cui, P., Yang, K., Chen, J., 2003. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation; taking the Jiangjia Gully as an example. *Science of Soil and Water Conservation*, 1(1): 11—15 (in Chinese with English abstract).

Lin, C. W., Liu, S. H., Lee, S. Y., et al., 2006. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in Central Taiwan. *Engineering Geology*, 86(2—3): 87—101. doi:10.1016/j.engeo.2006.02.010

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. *Engineering Geology*, 71(1—2): 49—61. doi:10.1016/S0013-7952(03)00125-X

Liu, C. N., Huang, H. F., Dong, J. J., 2008. Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in Central Taiwan. *Natural Hazards*, 47

(3): 349—368. doi:10.1007/s11069-008-9223-9

Tan, W. P., Han, Q. Y., 1992. Study on regional critical rainfall indices of debris flow in Sichuan Province. *Journal of Catastrophology*, 7(2): 37—42 (in Chinese with English abstract).

Tang, C., Qi, X., Ding, J., 2010. Dynamic analysis on rainfall-induced landslide activity in high seismic intensity areas of the Wenchuan earthquake using remote sensing image. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 317—323 (in Chinese with English abstract).

Tang, C., Zhu, J., Li, W. L., et al., 2009. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 68(2): 187—194. doi:10.1007/s10064-009-0201-6

Yu, B., 2008a. Research on the calculating density by the deposit of debris flows. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 789—796 (in Chinese with English abstract).

Yu, B., 2008b. Study on the mean velocity of viscous debris flows. *Advances in Earth Science*, 23(5): 524—532 (in Chinese with English abstract).

Yu, B., 2010. Study on the method for deposition depth calculation of debris flow with different densities. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 23(2): 207—211 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. C., Hungr, O., Slaymaker, O., 1996. The calculation of impact force of boulders in debris flow. In: Du, R., ed., *Debris flow observation and research*. Sciences Press, Beijing, 67—72 (in Chinese).

## 附中文参考文献

陈晓清,陈宁生,崔鹏,2004.冰川终碛湖溃决泥石流流量计算.冰川冻土,26(3):357—362.

崔鹏,杨坤,陈杰,2003.前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例.中国水土保持科学,1(1):11—15.

谭万沛,韩庆玉,1992.四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究.灾害学,7(2):37—42.

唐川,齐信,丁军,2010.汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析.地球科学——中国地质大学学报,35(2):317—323.

余斌,2008a.根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究.沉积学报,26(5):789—796.

余斌,2008b.粘性泥石流的平均运动速度研究.地球科学进展,23(5):524—532.

余斌,2010.不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究.防灾减灾工程学报,23(2):207—211.

章书成, Hungr, O., Slaymaker, O., 1996. 泥石流中巨石冲击力计算.见:杜榕桓编,泥石流观测与研究.北京:科学出版社,67—72.