

强震区小流域泥石流发育特征研究

——以四川省绵竹市罗家沟泥石流为例*

梁京涛^{1,2}, 唐川¹, 王军², 常鸣¹

(1. 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;

2. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

摘要: 小流域泥石流因流域面积小, 常被人们忽略或未引起足够的重视, 却往往造成较大灾害损失; 2010年8月13日绵竹市清平乡罗家沟暴发泥石流, 一次冲出量约30万m³, 而该沟流域面积仅1.4km²; 此次泥石流造成主沟沟口民房被掩埋, 1.5km的道路被毁, 3座涵洞、一座小桥被冲毁, 并使绵远河改道约200m左右, 直接经济损失约500万。根据现场调查和航空图像解译, 分析了泥石流成因, 讨论了泥石流形成、运动和堆积过程, 并计算了泥石流的力学参数; 罗家沟泥石流的实例表明汶川震区小流域泥石流具有较强的隐蔽性和破坏力。因此, 在对汶川震区泥石流开展调查和评估工作时, 尤其应注意小流域泥石流调查工作, 必要时应进行相应的工程治理措施。

关键词: 泥石流; 汶川震区; 小流域; 遥感; 绵竹市罗家沟

中图分类号: P642.23; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0100-05

汶川地震后, 流域内发育的崩塌、滑坡为泥石流的活动提供了丰富的松散固体物质来源, 使泥石流成为震后最为活跃的危害, 泥石流频发给灾区重建和人民生活带来严重威胁^[1-4]。在这些泥石流中, 小流域泥石流往往因流域面积小, 常被人们忽略或未引起足够的重视, 却造成较大灾害损失。研究表明^[5-6]小流域泥石流暴发大规模及活动特征, 与流域内丰富的物源条件和沟道堵塞的严重程度有关。在2010年“8.13”泥石流灾害中, 罗家沟一次泥石流冲出总量达30万m³^[7], 而罗家沟流域面积仅1.4km²。本文在现场调查的基础上, 结合震后航空影像和“8.13”泥石流灾后无人机航空影像, 分析了罗家沟泥石流沟的成因; 讨论了其形成、运动及堆积过程, 并对其力学特征进行了计算, 为今后此类小流域泥石流灾害的预测和防治提供了参考。

1 罗家沟流域概况

罗家沟位于四川省绵竹市西北部清平场镇北,

沟口地理坐标为31°33′56.1″N, 104°07′03.5″E。流域东西长2.55km, 南北宽0.96km, 面积1.4km²。该沟在区域构造上位于扬子准地台四川台地向斜西北部^[8], 属四川盆地西北部的龙门山推覆构造带前缘, 沟口距离陈家坪-白云山断裂(映秀-北川断裂)不足1km。受断裂活动影响, 该处岩石破碎, 出露地层由上往下依次为石炭系总长沟组第一段(Cz¹), 泥盆系上统沙窝子组(Ds), 泥盆系中统观雾山组第二段(Dg²), 寒武系磨刀垭组(εm), 寒武系清平组第三段(εqp³), 岩性为灰岩、白云岩及砂岩、粉砂岩。据震后修改的《中国地震动参数区划图》, 罗家沟流域所处区域处于极震区内, 地震烈度高达Ⅺ度。

汶川地震之前, 罗家沟未发生过泥石流; 汶川地震当时, 也没有激发泥石流。但地震使罗家沟中上游诱发大量崩塌、滑坡并堆积于沟道内, 使其成为一条潜在泥石流沟。并分别于2008年9月24日和2010年8月13日爆发两次较大规模泥石流, 造成严重损失。

* 收稿日期: 2012-10-22 修回日期: 2012-12-25

基金项目: 国家科技支撑计划“地震扰动区小流域泥石流滑坡灾害综合风险评价技术与示范”(2011BAK12B01); 科技基础性工作专项“西南地形急变带地质灾害综合调查与风险制图”(2011FY110103); 国土资源大调查项目(1212011014033)

作者简介: 梁京涛(1982-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事地质灾害、环境地质遥感与GIS应用研究。

E-mail: liangjingtao0419@163.com

表 1

罗家沟支沟基本特征统计表

沟 名	汇水面积/km ²	沟长/km	最低高程/m	最高高程/m	高差/m	平均比降/‰
罗家沟(主沟)	1.4	2.92	920	2 240	1 320	328
谢家沟(①号支沟)	0.13	0.73	1 044	1 440	396	542
付家坡沟(②号支沟)	0.30	1.28	964	1 600	636	497

2 泥石流成因分析

2.1 降雨条件

根据设置在天池乡雨量站的实测数据,在“8.13”泥石流发生前的半个月时间内,未发生泥石流,但前期累积雨量达到 207 mm。2010 年 8 月 13 日凌晨,罗家沟流域雨强达到 70 mm/h,大规模泥石流暴发。罗家沟泥石流是前期累计雨量和短时强降雨共同作用的结果,对于震后罗家沟而言,短时强降雨对于泥石流的形成起着至关重要的作用。

2.2 地形条件

罗家沟流域沟谷呈 V 型,纵坡比降大,上游段及沟源处比降多在 700‰以上。该沟由一条主沟和 2 条较大的支沟组成(表 1),沟内两侧山体坡陡, >35°的急陡坡占流域面积的 57.86%,流域上游海拔 1 700 ~ 1 900 m 处为一陡崖,接近临空;流域最高处海拔 2 240 m,沟口海拔 920 m,相对高差达 1 320 m,巨大的地形高差使处于坡面和沟床内的松散堆积物拥有较大的势能,同时这种陡峻地形条件利于雨水的快速汇集,为泥石流提供动力条件。

2.3 物源条件

受汶川地震影响,沟内崩塌、滑坡异常发育。通过遥感解译和野外实地调查,罗家沟流域内物源分布呈现出以下特点:①崩塌滑坡同时发育且发育数量多,分布面积大;②流域内植被破坏严重,32%区域由植被覆盖区转化为岩土体裸露区;③沟道物源集中分布在流域主沟道上游,高程范围在 1 100 ~ 1 700 之间,沟道内松散堆积堵塞沟谷,对泥石流规模起了间接放大作用。

通过对 2008 年 5 月 18 日拍摄的 0.5 m 分辨率的航空图像(图 1)进行解译,流域内发育大小规模滑坡体共 13 处,滑坡面积为 $4.67 \times 10^4 \text{ m}^2$,厚度变化较大,从 3 m 到 20 m 不等,估算滑坡体积可达 $55 \times 10^4 \text{ m}^3$;发育大小崩塌 56 处,面积为 $33.98 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度 1 ~ 2 m 左右,估算崩塌体积可

达 $70 \times 10^4 \text{ m}^3$;解译沟道内较大规模松散堆积 9 处,面积为 $6.23 \times 10^4 \text{ m}^2$,厚度 5 ~ 8 m 不等,估算松散堆积物源方量 $31 \times 10^4 \text{ m}^3$;由此估算流域内物源总方量约 $156 \times 10^4 \text{ m}^3$,流域内丰富的物源是罗家沟发生泥石流灾害的根本原因。

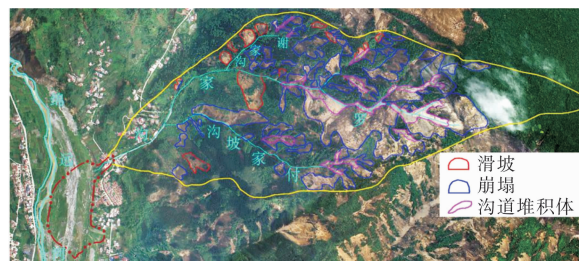


图 1 航空影像遥感解译(拍摄日期:2008 年 5 月 18 日)

3 泥石流形成、运动及堆积特征

罗家沟流域从 2010 年 8 月 12 日午后开始降雨,16 ~ 18 时转为大雨,而后 18 ~ 24 时一直为小雨,8 月 13 日零时开始,转为大雨。据沟口盐井村 4 组居民付世秀回忆,当晚 12:13 分绣花结束后,刚刚上床休息,便听到隆隆之声,地面微微颤抖,起身后发现大量泥浆奔涌而下,部分已经涌入家中,待其下楼时,屋内泥石流已经淤积约 0.5 m 深,无奈从邻居家逃出一劫。在此期间泥石流与洪水流量呈很好的相关性,以阵流的形式一直持续到 02:30 分,水量减少,泥石流随之结束。家住流域上游的盐井村 5 组村民谢喜昌和盐井村 4 组的马亭员也回忆了泥石流发生时的情况,罗家沟先是主沟发生泥石流,0.5 h 后支沟谢家沟也暴发泥石流,付家坡沟发生泥石流的时间要晚 40 min 左右,整个泥石流大概持续到 2:30 结束。因此,罗家沟泥石流发生的时间应该在 2010 年 8 月 13 日 00:15 ~ 02:30 左右。图 2 为 2010 年 8 月 12 日罗家沟泥石流发生后无人机航空影像。

罗家沟泥石流起动首先是流域上游主沟沟道内堆积的松散堆积体,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 m ~ 1 700 m 处,海拔 1 700 m 处为

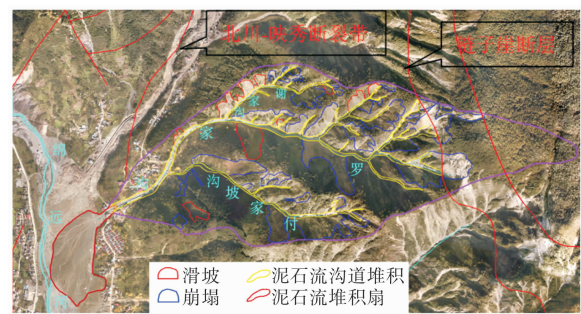


图2 无人机航空影像遥感解译(拍摄日期: 2010 年 11 月 23 日)

链子崖断层, 该处上方地形陡峻, 斜坡表面形成的水流经 200 m 落差的急剧加速后, 强烈冲刷沟道内的松散物质, 受其影响, 沟道内物质快速启动形成泥石流。在运动过程中主沟道内的崩滑堆积体及其它松散固体物质对泥石流运动造成堵塞, 局部溃决后对泥石流规模间接放大, 进而携带更多的物质向下游运动。泥石流运动至沟口处, 由

于瞬间堆积范围扩大, 运动速度降低, 使得物质大量堆积, 形成了长 440 m、最大宽度 500 m、总面积为 $9.88 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的堆积扇。泥石流形成的堆积扇导致绵远河约 200 米宽的河道全部淤满, 堵断河道, 河水水位上涨。

根据该地区汶川震后 2010 年 9 月 24 日泥石流发生之前 1: 2 000 地形图和“8.13”泥石流后测绘的 1: 2 000 地形图, 可以算出“8.13”泥石流后, 罗家沟堆积区(绵远河河床)地形高度平均升高了 8.4 m; 采用 Arcgis 软件对前后两个 DEM (图 3) 进行计算, 堆积区共增加了 83 万 m^3 堆积物(部分来源于绵远河上游泥石流沟)。如此大方量的堆积和河床快速抬升, 说明汶川地震后, 该地区泥石流异常活跃且具有极强的搬运能力, 同时也说明汶川地震后泥石流在主河河床演变中起着重要作用。

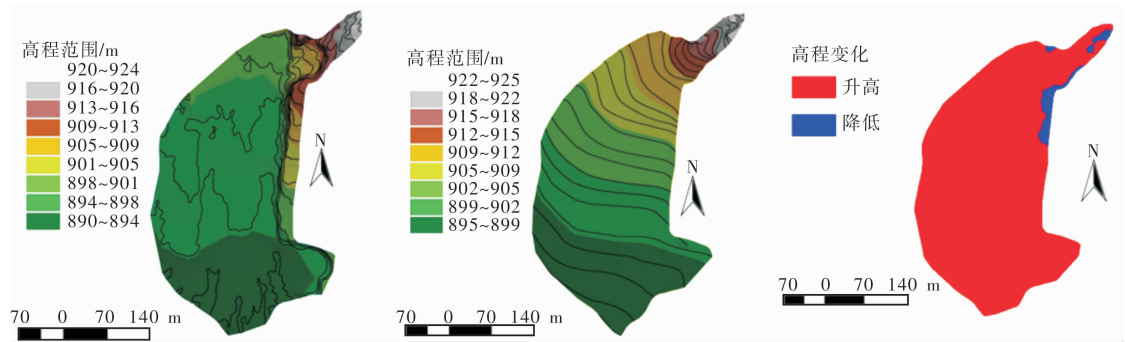


图3 罗家沟堆积区数字高程模型(左: 震后 DEM, 中: “8.13”后 DEM, 右: 前后 DEM 变化)

4 泥石流力学特征

4.1 泥石流容重

根据调查时在罗家沟的取样实验分析, 绘制出泥石流堆积物颗粒分布曲线(图 4), 利用余斌(2008)提出粘性泥石流容重公式(1)^[9], 对罗家沟泥石流的容重进行计算:

$$\gamma_D = \gamma_0 + P_2 P_{05}^{0.35} \gamma_V \quad (1)$$

式中: γ_D = 粘性泥石流容重(g/cm^3); γ_V = 粘性泥石流最小容重($= 2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$); γ_0 = 泥石流最小容重($= 1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$); $P_2 \geq 2 \text{ mm}$ 的粗颗粒百分含量(小数表示); $P_{05} \leq 0.05 \text{ mm}$ 的粗颗粒百分含量(小数表示)。计算结果见表 2。

野外调查时, 笔者对罗家沟沟口段进行了现场取样, 并询问曾见过泥石流发生性状的村民, 通过计算, 罗家沟主沟泥石流重度为 $2.04 \text{ g}/\text{cm}^3$,

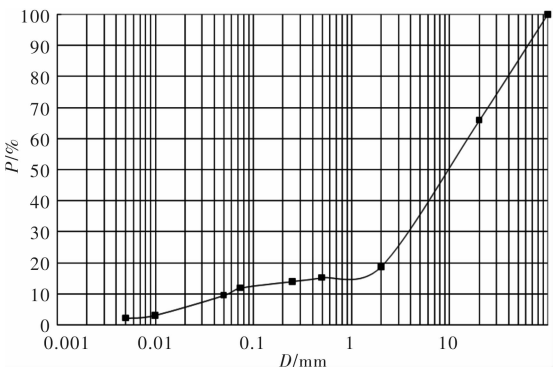


图4 颗粒分布曲线

表 2 泥石流容重计算

颗粒级配	$P_2/\%$	$P_{0.5}/\%$	$\gamma_D/(\text{g}/\text{cm}^3)$
	81.3	9.5	2.20
配浆法	配浆重量 G_c/kg	配浆体积 V/l	$\gamma_D/(\text{g}/\text{cm}^3)$
	16.7	9.5	2.04
综合取值	\	\	2.12

考虑到实际操作和取样时存在误差,实际容重值采用二者平均值 2.12 g/cm^3 ,罗家沟“8.13”泥石流为粘性泥石流。

4.2 泥石流流量

本文按照雨洪法对其流量进行计算。该方法假设泥石流与暴雨同频率且同步发生,先按照水文方法计算出断面不同频率下小流域暴雨洪峰流量,然后选用堵塞系数,按式(2)计算泥石流流量^[10]:

$$Q_c = (1 + \phi) Q_B \cdot D_C \quad (2)$$

式中: Q_c 为频率为 P 的泥石流洪峰值流量 (m^3/s); Q_B 为频率为 P 的暴雨洪水设计流量 (m^3/s); D_C 为泥石流堵塞系数,此处取值 2; ϕ 为泥石流泥沙修正系数,此处取 2.8; 计算所得泥石流最大流量如表 3 所示。

表 3 泥石流洪峰流量计算结果

项目	计算结果				
设计频率 $P/\%$	1	2	5	10	20
暴雨洪峰流量 $Q_B/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	40.9	36.4	30.5	20.7	13
泥石流峰值流量 $Q_c/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	310.8	276.6	231.8	157.3	98.8

4.3 一次泥石流过程总量

一次泥石流总量 Q 按泥石流暴涨暴落的特点,将其过程线概化成五角形,按式(3)计算^[10]

$$Q = 0.264 T Q_c = K T Q_c \quad (3)$$

一次泥石流冲出的固体物质总量 $Q_H (\text{m}^3)$ 按式(4)计算:

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_s - \gamma_w) \quad (4)$$

式中: T 为泥石流持续时间 ($= 8\ 100 \text{ s}$)。

根据天池乡雨量站的实测数据,罗家沟“8.13”泥石流降雨强度为 5 年一遇,计算结果(表 4)表明在 5 年一遇情况下,一次泥石流冲出总量为 21.1 万方,10 年一遇情况下为 33.6 万方。对比实测数据,罗

表 4 泥石流一次过程总量及固体物质冲出量计算结果

项目	计算结果				
设计频率 $P/\%$	1	2	5	10	20
一次泥石流过程 总量 $Q/\text{万 m}^3$	66.5	59.2	49.6	33.6	21.1
一次泥石流固体 物质总量 $Q_H/\text{万 m}^3$	43.9	39	32.7	22.2	13.9

家沟“8.13”泥石流一次冲出总量为 30.2 万 m^3 ^[7],说明实测数据值接近罗家沟 10 年一遇情况下的理论计算值。这表明雨洪法计算结果偏小于实测数值,究其原因应该与地震后流域内物源丰富、沟道堵塞较为严重情况有关。

5 结论

(1) 罗家沟泥石流物源丰富,据遥感解译,流域内发育滑坡 13 处,崩塌 56 处,较大规模松散堆积 9 处,估算流域内物源总方量约 156 万 m^3 ,流域内丰富的物源是罗家沟发生泥石流灾害的根本原因。

(2) 罗家沟泥石流是前期累计雨量和强降雨共同作用的结果,对于震后罗家沟流域而言,短时强降雨对于泥石流的形成起着至关重要的作用。

(3) 罗家沟泥石流暴发后形成了长 440 m 、最大宽度 500 m 、总面积为 9.88 万 m^2 的堆积扇,汶川地震后罗家沟堆积区地形高度平均升高了 8.4 m ,沟口堆积物共增加了 83 万 m^3 ,如此大方量的堆积和河床快速抬升,说明汶川地震后,该地区泥石流异常活跃且具有极强的搬运能力,同时也说明泥石流在主河河床演变中起着重要作用。

(4) 罗家沟“8.13”泥石流降雨强度为 5 年一遇,泥石流容重在 $2.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右,为粘性泥石流;采用雨洪法对泥石流流量进行计算后发现,实测数据值接近罗家沟 10 年一遇的理论计算值,说明雨洪法计算结果偏小于实测数值,这与地震后流域内物源丰富、沟道堵塞较为严重的情况有关。

研究表明,汶川地震灾区小流域泥石流具有较强的隐蔽性和破坏力,此类泥石流沟内物源丰富,沟道堵塞严重,在短时间强降雨作用下,容易爆发较大规模泥石流。因此,在对汶川震区泥石流开展调查和评估工作时,尤其应注意小流域类泥石流调查,必要时应进行相应的工程治理措施。

参考文献:

- [1] 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研究[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(1):172-180.
- [2] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区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.
- [3] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 924 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 751–758.
- [4] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501–509.
- [5] 游勇, 柳金峰. 汶川 8 级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响[J]. 四川大学学报: 工程科学版. 2009, 41(Sup 1): 16–22.
- [6] 柳金峰, 游勇, 陈兴长. 震后堵溃泥石流的特征及防治对策研究—以四川省平武县唐房沟为例[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 68–75.
- [7] 重庆蜀通岩土工程有限公司. 绵竹市清平乡“8. 13”罗家沟特大泥石流应急补充勘查报告[R]. 重庆: 重庆蜀通岩土工程有限公司, 2010.
- [8] 四川省地质矿产局化探队. 1: 5 万清平幅区域地质调查报告[R]. 成都: 四川省地质矿产局, 1995.
- [9] 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.
- [10] 四川省水利厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[Z]. 成都: 四川省水利厅, 1984.

Development Characteristics of Small Watershed Debris Flows in Meizoseismic Area

——A Case Study of Luojiagou Gully in Mianzhu City in Sichuan Province

Liang Jingtao^{1, 2}, Tang Chuan¹, Wang Jun², Chang Ming¹

(1. *State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 2. *Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China*)

Abstract: Small watershed debris flows, being not valued enough or even neglected for its little basin area, could sometimes cause great disaster and losses. A debris flow occurred suddenly in Luojiagou Gully of Qingping Town in Mianzhu City on 13 August 2010, with an outburst flow of 300 000 m³. This is just a small watershed debris flow with a basin area of 1.4 km² only. In this disaster process, houses were buried, 1.5 km-long road was ruined, 3 culverts and 1 bridge were destroyed with an instant economic loss of about 5 000 000 Yuan. And the channel of the Mianzhu River displaced about 200 meters far away from its original location. Based on field investigation and interpretations of aerial photographs, origin characteristics of the debris flow are analyzed, and the initiation, moving, and deposition process of debris flows are discussed, and mechanics parameters of debris flows are calculated. The research result shows that small watershed debris flows in Wenchuan Earthquake area are of relatively great concealment and destructiveness. Therefore small watershed debris flows need to be valued particularly in the surveying and assessing the debris flows in Wenchuan Earthquake areas, and measures are suggested to be taken to whenever need.

Key words: debris flow; Wenchuan seismic area; small watershed; remote sensing; Luojiagou Gully of Mianzhu City