

汶川地震后肖家沟泥石流活动特征与灾害防治

张钰^{1,2}, 陈晓清¹, 游勇¹, 李昆^{1,2}

(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, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 肖家沟是汶川地震震中映秀镇近邻的一条典型泥石流沟, 位于渔子溪河左侧, 沟域面积 7.19 km², 沟床平均纵比降为 485‰。“5·12”地震后该沟多次暴发泥石流。2010 年 8 月 14 日, 肖家沟暴发特大规模泥石流, 一次冲出物方量约 6.50×10⁵ m³, 堵塞渔子溪, 堰塞湖溃决后造成洪水灾害。肖家沟泥石流物源条件非常丰富, 地区降水充沛, 危险性巨大, 一旦发生泥石流, 直接威胁 S₃₀₃ 映秀段公路, 造成交通中断; 若发生大规模泥石流堵塞渔子溪形成堰塞体, 堰塞体溃决之后, 大量泥沙被洪水带至下游, 抬高河床, 将对下游映秀镇产生严重的洪水灾害。目前肖家沟沟域内共有松散固体物源量 5.22×10⁶ m³, 可参与泥石流活动的动储量为 2.01×10⁶ m³。以肖家沟泥石流形成条件为基础, 分析震后连续发生的泥石流类型与活动特征, 并以此为依据探讨了肖家沟泥石流治理的简要思路。

关键词: 肖家沟; 泥石流; 汶川地震; 活动特征; 灾害防治

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0284-06

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.059

Activity Characteristics and Disaster Control of Xiaojia Gully Debris Flow After Wenchuan Earthquake

ZHANG Yu^{1,2}, CHEN Xiao-qing¹, YOU Yong¹, LI Kun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Xiaojia Gully is a typical debris flow gully in the earthquake zone near Yingxiu town which located in the left of Yuzi River, and has a drainage area of 7.19 km² and an average longitudinal slope of 485‰. Many debris flows occurred in this gully after Wenchuan earthquake. In August 14, 2010, a large scale debris flow (the volume is about 6.50 × 10⁵ m³) was triggered by heavy rainstorm, blocked the Yuzi River and caused dam-breaking disaster. Xiaojia Gully was risky because of its large amount of loose materials and abundant rainfall. The Yingxiu part of S₃₀₃ highway would be interrupted if the debris flow occurs. The Yuzi River would be blocked in the condition of large scale debris flow, and the dam-breaking flood could potentially cause damage to the newly constructed Yingxiu Town. At present, the gully still had 5.22×10⁶ m³ of solid materials, of which about 2.02×10⁶ m³ was prone to debris flow in the future when it encounters great rainstorms. Analyzing the activity characteristics of Xiaojia Gully debris flow after the earthquake based on formation conditions, the brief ideas for Xiaojia Gully debris flow control were discussed.

Keywords: Xiaojia Gully; debris flow; Wenchuan earthquake; activity characteristics; disaster control

2008 年 5 月 12 日四川省汶川县发生里氏 8.0 级大地震, 对龙门山断裂带东西横数十里, 南北长约 100 km 范围内造成了 7°以上的高烈度破坏。强烈主震和后续多次余震在该断裂带范围内造成了大量的滚石、崩塌、滑坡、泥石流、碎屑流、堰塞湖等次生山地

灾害^[1-2], 初步估算震区新增松散固体物源达 2.54×10⁹ m³^[3]。地震高烈度区山高谷深, 地质构造复杂, 断裂发育, 属于滑坡和泥石流等山地灾害多发区^[4], 肖家沟泥石流在震后活动频繁。根据泥石流易发程度等级划分, 汶川震后肖家沟泥石流达极易发等

收稿日期: 2013-09-25

修回日期: 2013-10-10

资助项目: 国家科技支撑计划项目“龙门山地震带崩塌滑坡泥石流灾害防治技术与示范”(2011BAK12B03)

作者简介: 张钰(1989—), 女(土家族), 湖北省恩施市人, 硕士研究生, 研究方向为泥石流防治。E-mail: zy-8902@163.com。

通信作者: 陈晓清(1974—), 男(汉族), 四川省遂宁市人, 博士, 研究员, 主要从事泥石流滑坡减灾理论与技术研究。E-mail: xqchen@imde.ac.cn。

级^[5-7]。本文拟分析肖家沟泥石流的形成背景条件及其活动特征,探讨泥石流的防治思路,以期震后肖家沟泥石流的防灾减灾提供参考依据。

1 自然环境背景

1.1 流域概况

肖家沟位于四川省汶川县映秀镇,国道 213 线和省道 303 线交汇处以西约 5 km 处,为渔子溪左岸的一

条泥石流沟,沟口地理位置为 103°26′20″E,31°04′32″N。该流域位于龙门山中央断裂(映秀断裂)与后山断裂(茂汶断裂)之间,距“5·12”地震震中较近,地震活动较为频繁。肖家沟流域地势北高南低,主沟自北向南汇入岷江一级支流渔子溪。流域内有 4 条支沟汇入,地震产生的大量松散堆积物和滑坡体是肖家沟泥石流的主要物源。肖家沟及其支沟的流域特征详见表 1。

表 1 肖家沟主沟及主要支沟基本特征

| 沟名 | 流域面积/km ² | 主沟长度/km | 主沟比降/% | 沟口高程/m | 最大高程/m | 相对高差/m |
|-------------------|----------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 肖家沟 | 7.19 | 4.50 | 485 | 1 055 | 3 483 | 2 428 |
| 1 [#] 支沟 | 1.39 | 2.10 | 634 | 1 198 | 2 600 | 1 402 |
| 2 [#] 支沟 | 1.06 | 2.00 | 566 | 1 569 | 2 800 | 1 231 |
| 3 [#] 支沟 | 1.15 | 2.12 | 610 | 1 739 | 3 100 | 1 361 |
| 4 [#] 支沟 | 0.21 | 0.90 | 832 | 1 850 | 2 638 | 788 |

1.2 地形地貌

肖家沟地处九顶山华夏系构造带,属深切构造侵蚀低山—中山地形。肖家沟流域面积 7.19 km²,主沟长 4.5 km,流域宽度在 1 600~2 400 m,两侧斜坡坡度较陡,一般在 30°~70°,≥45°的陡急临空危险坡面发育,局部为陡崖地貌。如表 2 统计所示,主沟 25°~35°和≥35°的坡地面积达 6.39 km²,占流域总面积的 88.87%,表明流域内主要以陡坡为主,沟谷纵坡较大,有利于降雨的汇集。地震前沟道宽度约 10~30 m,地震造成两侧沟岸发生崩塌,导致沟道抬升拓宽。其中,1[#]支沟汇口以下主沟抬升 10~15 m,沟道拓宽至灾前的 2 倍。在 2010 年“8·14”泥石流及后续泥石流作用下,沟道抬高并发生下切,切割深度 3~5 m,侧蚀作用则导致两侧沟岸发生失稳垮塌,导致沟道物源增加。在泥石流形成流通区,沟床纵坡比降约为 420‰;在沟口堆积区,沟床纵坡比降约 240‰。

表 2 肖家沟山坡坡度分级统计

| 项目 | 山坡坡度/(°) | | | | 合计 |
|----------------------|----------|-------|-------|-------|--------|
| | <15 | 15~25 | 25~35 | ≥35 | |
| 坡地面积/km ² | 0.69 | 0.11 | 0.47 | 5.92 | 7.19 |
| 所占比例/% | 9.60 | 1.53 | 6.54 | 82.33 | 100.00 |

1.3 地质条件

据区域地质资料显示,肖家沟在区域上夹持于九顶山华夏系构造带的茂汶断层(I_1)和映秀断层(I_9)之间的彭灌复背斜上(I_{30})。地层属于马尔康分区的九顶山小区,具有过渡地层的性质。

区域新构造运动表现为区域性地壳急剧上升并伴随断裂活动,在上升中有短暂间歇,上升幅度随时

间推移递减。流域内出露的元古界地层是晋宁—澄江期的岩浆岩,主要有斜长花岗(γ_2^4)、花岗闪长岩(γ_2^3)和闪长岩(δ_2^3),岩体强度高,表层 1—2 m 为强风化层,岩体节理裂隙发育,裂隙面显平直,岩体破碎,多呈块状,易形成危岩体进而产生崩塌。流域内第四系松散物质丰富,主要为泥石流堆积物、崩坡积物和冲洪积物。

1.4 气候条件

肖家沟流域属四川盆地边缘亚热带湿润季风气候区,为川西多雨中心区,是暴雨常出现的地区之一,具有气候温暖湿润,多雨多涝,秋绵雨危害严重,四季分明,夏季湿热,冬季温和,年气温差较小,无霜期长等气候特点。夏季暴雨频繁,强度大、历时短,6—9 月降雨量占全年的 60%~70%,每年 5—9 月为汛期,为滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的高发期。

根据渔子溪水文站 25 a 实测资料,映秀镇多年平均降雨量为 1 253.1 mm,年平均降水天数为 202.7 d,最大年降雨量为 1 688 mm(出现在 1964 年),最小年降雨量为 836.7 mm(出现在 1974 年),连续最大 4 个月(6—9 月)降水量为 853.2 mm,占年降水量的 68.2%,日最大降水量为 269.8 mm。根据汶川县降雨量等值线图,工作区年平均降雨量在 925~950 mm。

1.5 人类活动情况

肖家沟位于省道 S_{303} 沿线,沟谷内无人口居住。附近主要人类工程活动为省道 S_{303} 保通的抢修和维护工作,新公路隧道修建以及沟口河道疏浚和采砂等。流域内人类工程活动较为单一,未对地质环境造成大的破坏和影响;道路的抢通和保通等都是利用原路恢复重建,对环境无不利影响。

2 泥石流活动情况

2.1 震前肖家沟泥石流活动情况

“5·12”汶川地震前,肖家沟内植被覆盖良好,可启动并参与形成泥石流的松散物源发育稀少。震前沟谷内雨季以山洪为主,泥石流活动频率低。根据调查,震前肖家沟 50 a 内仅在 1991 年 4 月 26 日发生过一次规模较大的泥石流,冲出物堵断渔子溪,形成小型堰塞湖,在主河水流漫顶作用下溃决。该泥石流的物源为修建渔子溪电站开挖引水隧洞堆放在沟道的弃渣。因此,在缺少足够的物源基础条件下,肖家沟在汶川震前大多以山洪或高含沙水流为主,泥石流活动较弱。

震前肖家沟主沟汇入渔子溪处的沟道宽约 5 m (图 1a),雨季季节的洪痕宽度可延伸至沟道两侧的植被覆盖区,据估算平均最大水深约 30~50 cm,平均最大清水流量为 10~20 m³/s。其形成的山洪泥石流最终经沟口的排导槽汇入渔子溪(图 1c),该防治工程已于 2010 年的“8·14”特大泥石流中淤埋失效。

2.2 震后肖家沟泥石流活动情况

汶川地震后,肖家沟松散固体物质量大大增加,在暴雨的作用下,引发泥石流的可能性非常高。2010

年 8 月 13 日至 14 日凌晨,流域遭遇 130 a 一遇的特大暴雨,8 h 降雨量达到 163 mm 左右,强降雨诱发肖家沟所在的映秀至耿达段暴发特大规模的群发性泥石流。泥石流堆积体的扇体前缘宽度达到 350 m,扇体长度约 150 m,平均厚度约 15 m,一次冲出物体积方量共约 6.50×10^5 m³,导致路基和桥梁被淤埋,并阻塞渔子溪形成堰塞湖,上游水位抬高约 31 m(图 1b,图 1d)。据统计,泥石流冲出物及形成的堰塞湖将掩埋或淹没公路路基约 1 100 m,淤埋原沟口堆积台地的施工单位拌和场及拌和设备、项目部、试验室驻地等,造成该区唯一的交通道路 S₃₀₃ 中断长达 1 个月之余。2010 年 9 月 6 日,暴雨再次诱发肖家沟发生小规模泥石流活动,给泥石流后的省道 S₃₀₃ 应急抢险工作造成障碍。2011 年 7 月 3 日上午 8 时至 7 月 4 日凌晨 5 时,汶川县境内普降暴雨,一场历时近 20 h 的暴雨再次诱发肖家沟所在的映秀—耿达段多处暴发泥石流、垮塌等地质灾害,省道 S₃₀₃ 再次被阻断。“7·03”特大山洪泥石流期间,肖家沟冲出固体物质方量约 10 000~30 000 m³,为中小规模等级,主要造成的危害是淤埋通过沟口堆积扇的公路便道导致交通中断,未堵断渔子溪形成堰塞湖。



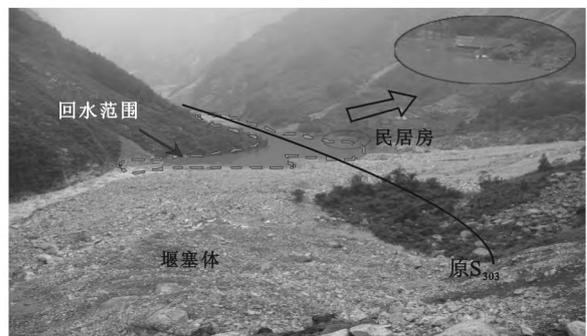
a 20050716肖家沟沟口



b 20050716泥石流未淤埋省道S₃₀₃



c 20090330肖家沟排导槽未失效



d 20100816“8·14”泥石流堵塞渔子溪形成堰塞体

图 1 肖家沟沟口形态

3 泥石流性质和类型

3.1 泥石流沟道特征

根据主沟纵坡比降及物源分布特征,将全流域分

为清水区、形成流通区和堆积区。清水区位于流域上游,海拔 2 700 m 以上区域,沟谷两侧山坡坡度较陡,植被发育,松散堆积层覆盖较薄,为泥石流形成汇集水源和提供水动力条件(图 2a)。形成流通区位于流

域中下游,高程分布在 1 100~2 700 m,沟床纵比降较大,沟谷两侧坡度较陡,一般在 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$,沟道两旁大部分岸坡基岩裸露,沟内有常流水。由于地震、风化和陡峭岩岸重力卸荷等的影响,两岸崩塌、滑坡发育,松散固体物质堆积于沟道内,造成局部堵塞(图 2b-2e)。堆积区位于沟口至渔子溪段,地形开阔,平

面形态呈扇形,偏向渔子溪下,最大石块尺寸为 $7\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。该段坡度约 $8^{\circ}\sim 11^{\circ}$,坡度相对较缓,有利于泥石流的堆积和停留(图 2f),现有的省道 S_{303} 从泥石流堆积体上通过,公路路面因肖家沟泥石流多次淤积而抬高,堆积区的泥石流堆积物为良好的建筑材料,部分已被挖除。



a 上游清水区沟谷岸坡



b 形成流通区基岩裸露



c 主沟右侧崩滑体



d 主沟左侧堆积物



e 主沟右侧大型滑坡堆积体



f 堆积区形态

图 2 肖家沟沟道地貌

3.2 泥石流物源特征

肖家沟流域距离“5·12”汶川地震震中仅 7 km,山体表层风化壳与岩体之间受到地震的强烈震动卸荷作用而被“剥皮”,流域植被覆盖完好区域骤然转变为大规模崩塌发育的地区,形成了大量松散物质,为泥石流活动提供丰富物源。根据遥感影像分析和现场勘察,肖家沟泥石流松散固体物质分布较为分散,主要的物源类型包括崩滑体、沟道堆积物等两大类。

松散固体物源中仅处于沟道内可能被山洪侵蚀

和处于超过临界稳定边坡的部分是能参与泥石流活动的物源量,一般称为动储量^[8]。根据勘察统计(见表 3),肖家沟流域内累积松散固体物源总量 $5.22\times 10^6\text{ m}^3$,可参与泥石流活动的动储量为 $2.02\times 10^6\text{ m}^3$ 。其中,崩滑堆积固体物源量为 $3.39\times 10^6\text{ m}^3$,可参与泥石流活动的动储量为 $1.14\times 10^6\text{ m}^3$;沟床堆积固体物源量为 $1.83\times 10^6\text{ m}^3$,可参与泥石流活动的动储量为 $8.75\times 10^5\text{ m}^3$ 。

表 3 肖家沟泥石流物源储量 m^3

| 泥石流物源类型 | 总储量 | 动储量 |
|------------|-----------|-----------|
| 崩滑体物源量 | 3 391 400 | 1 832 000 |
| 沟道及两侧沟床物源量 | 1 141 000 | 875 200 |
| 合计 | 5 223 400 | 2 016 200 |

3.3 泥石流的激发条件

肖家沟纵坡比降大,震后物源丰富,短历时集中降雨和汇流高速水流冲蚀为肖家沟泥石流启动的激发条件。根据现场配浆法测得肖家沟泥石流重度平均值为 $2.0 t/m^3$,属于暴雨沟谷型黏性泥石流。其流体具有结构性,中粗巨石相互多点接触,巨大岩块进行浮托运动,有强烈的侵蚀和搬运能力。

肖家沟泥石流大多在雨季发生,如“8·14”特大山洪泥石流在爆发前 8 h 降雨量达到 163 mm 左右(图 3),强降雨诱发肖家沟所在的映秀至耿达段暴发了特大规模的群发性泥石流^[9]。

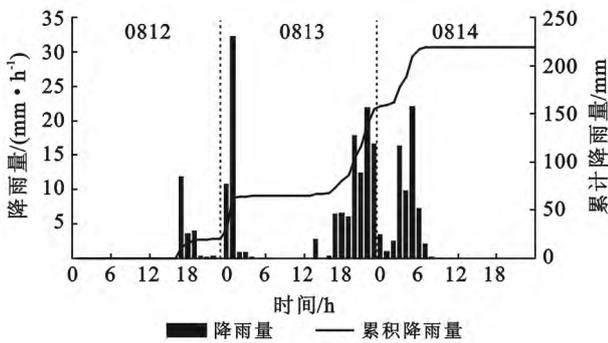


图 3 “8·14”特大山洪泥石流发生后映秀的降雨情况

因此,暴雨是肖家沟泥石流形成的主要激发因素。根据震后现场调查和以往泥石流的发生历史,在暴雨的激发下,堆积于沟道中及岸坡不稳定的松散物质易于转化形成泥石流。

4 泥石流防治讨论

4.1 泥石流的发展趋势

肖家沟位于龙门山新构造断裂带中的北川—映秀断裂带内,地震造成流域内松散固体物质剧增,并使得原有土体结构与组成发生变化,空隙度增加、固结度降低,启动的临界条件也随之降低,致使泥石流的活动性增强。若再次发生强烈地震,剧烈的震动会使山坡进一步破碎松动,降低边坡的稳定性,直接引起崩塌滑坡等重力侵蚀,进一步增加沟床内的松散固体物质,为泥石流的形成提供更加丰富的物源,促使泥石流活动性增强,泥石流暴发的频率会大大增加。若遭遇大暴雨袭击,极有可能暴发特大规模泥石流。

由于肖家沟流域内无洪峰实测资料,无法按数理

统计方法计算设计洪峰流量,因而利用《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》计算设计暴雨,进而推求设计洪峰流量,采用配方法计算泥石流流量计相关的泥石流运动参数^[1,10]。其计算公式为:

$$Q_c = (1 + \varphi_c) Q_B D_u \quad (1)$$

式中: Q_c ——泥石流洪峰流量(m^3/s); Q_B ——清水洪峰流量(m^3/s); D_u ——堵塞系数,取 $1.2 \sim 1.3$; φ_c ——泥石流洪峰流量增加系数,采用下式进行:

$$\varphi_c = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_c) \quad (2)$$

式中: γ_c ——泥石流容重(t/m^3); γ_w ——清水容重(t/m^3); γ_s ——固体物质重度(t/m^3)。

根据计算,在不同频率暴雨条件下,肖家沟泥石流流量等基本参数(计算时未考虑地震对泥石流的影响)见表 4。从表 4 中可以看出,在不同频率暴雨条件下,泥石流洪峰流量均大于 $200 m^3/s$,属于特大型泥石流^[11],产生的危害巨大。尤其是在 50 和 100 a 的暴雨条件下,泥石流冲出物将堵断渔子溪形成堰塞湖,并淤埋沟口 S_{303} 公路造成交通中断,在遭遇多年平均流量情况下的堵溃洪水将会超过下游映秀镇的堤防工程的设防标准,从而导致映秀镇被洪水淹没,对人民的生命财产安全造成严重危害。

表 4 不同频率暴雨作用下肖家沟泥石流基本参数

| 频率/ % | 洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 一次泥石流冲 出物总量/ m^3 | 堰塞体 高度/m | 上游堰塞湖 回水/km |
|----------|---------------------------------|-----------------------|-------------|----------------|
| 1 | 632.4 | 651 000 | 32 | 1.58 |
| 2 | 546.1 | 562 000 | 29 | 1.44 |
| 5 | 431.3 | 341 000 | 20 | 1.02 |
| 10 | 345.3 | 219 000 | 14 | 0.72 |

4.2 泥石流的危害对象

肖家沟泥石流目前的威胁对象主要是下游 7 km 处的映秀镇,以及沟口段的 S_{303} 映秀段公路,成灾方式主要为:(1)泥石流堵塞渔子溪形成堰塞体,上游水位上涨,淹没上游段公路和其他建筑、设施;(2)堰塞体溃决后形成的洪水对下游映秀镇的危害。

根据初步调查,泥石流在沟口段的直接影响区范围约 $5.50 \times 10^6 m^2$ 。肖家沟泥石流物源条件非常丰富,且该地区降水十分充沛,暴雨频繁,泥石流易发程度较高,危险性和危害性巨大。一旦发生泥石流,直接威胁 S_{303} 映秀段公路,造成交通中断,严重影响当地群众的正常生产生活。若发生大规模泥石流堵塞渔子溪形成堰塞体,堰塞体溃决之后,大量泥沙被洪水带至下游,抬高河床,对下游映秀镇产生严重的洪水灾害。

4.3 泥石流的防治讨论

肖家沟泥石流的工程防治治理目标是保护下游

映秀镇的安全,为映秀镇的经济建设和发展创造有利的条件和良好的环境,同时减轻泥石流对省道 S₃₀₃ 映秀段公路的危害。防治工程体系采用“稳+固+拦+停淤”方案。在主沟修建 1# 拦砂坝和 2# 拦砂坝以稳固沟床、沟岸,并防止沟床的下切和沟岸的垮塌,控制泥石流中的大颗粒向下游的输移,减小进入下游沟道的泥石流规模,同时为了增加主坝的稳定性,在坝体下游修建相应的副坝和潜槛;主沟中下游布置 3 道潜槛以稳固沟床、沟岸,防止沟床的下切;堆积区地段坡度(8°~11°)相对较缓,在沟口布置一道停淤挡墙与左右岸山体连接围成停淤场,停淤场挡墙高为 10 m,面积约为 42 000 m²,停淤库容约为 4.35×10⁶ m³,可停蓄 5% 设计标准的泥石流,有效保护省道 S₃₀₃。

肖家沟出露的岩性主要以斜长花岗、花岗闪长岩和闪长岩为主,是良好的建筑材料。目前,肖家沟原有堆积扇处建有采砂场,修建停淤场后,采砂场可继续开采,以便停淤场的部分堆积物开发为建筑材料,极大减少了后续停淤场的清淤工作。同时,也保证了停淤场外围公路的安全。

5 结论

(1) 肖家沟流域的自然环境背景条件十分有利于泥石流的形成,地震导致山体发生崩塌,产生大量松散物质,为泥石流的形成提供了丰富的物源条件。在集中强降雨作用下,肖家沟已多次发生泥石流,造成了严重的淤埋和堵塞。

(2) 肖家沟属于暴雨沟谷型泥石流,沟谷内物源丰富,沟道纵坡比降大,在强降雨条件下,极易容易暴发泥石流。据测算,100 a 的暴雨条件下,泥石流洪峰流量为 632.4 m³/s,一次泥石流冲出物总量为 6.51×10⁶ m³;50 a 的暴雨条件下,泥石流洪峰流量为 546.1 m³/s,一次泥石流冲出物总量为 5.62×10⁶ m³。

(3) 震前的肖家沟以雨季山洪为主,泥石流活动强度弱,“5·12”汶川地震改变了泥石流的形成条件,导致震后流域频繁发生泥石流灾害。该沟位于北川—映秀地震断裂带内,若再次发生强烈地震,剧烈的震动会使山坡更加破碎松动,进一步降低边坡的稳定性,直接引起崩塌滑坡等重力侵蚀,进而大大增加

沟床内的松散固体物质,为泥石流的形成提供更加丰富的物源,促使泥石流活动性增强。

(4) 为了保护省道 S₃₀₃ 以及下游映秀镇的安全,有必要在该流域布设相应的泥石流防治工程,上游重点在于稳固沟床并避免沟道进一步的被下切侵蚀,要充分利用下游沟口有利的地形条件,运用广阔的停淤空间,有效防止泥石流冲出沟口淤埋公路堵塞河道。

致谢:本文在撰写过程中得到了李德基老师的宝贵意见和帮助,在此表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.
- [2] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (12 May 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. Nature Hazards, 2011,56(1):19-36.
- [3] 陈晓清,游勇,崔鹏,等.汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45(1):14-22.
- [4] 崔鹏,韦方强,何思明,等.“5·12”汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J].山地学报,2008,26(3):280-282.
- [5] Chen Hongxin, Zhang Limin, Chang Dongsheng, et al. Mechanisms and runout characteristics of the rainfall-triggered debris flow in Xiaojiagou in Sichuan Province, China [J]. Nature Hazards, 2012,62(3):1037-1057.
- [6] 向灵芝,崔鹏,钟敦伦,等.汶川地震区泥石流危害道路的定量分析[J].西南交通大学学报,2012,47(3):387-393.
- [7] 唐垒庆,彭昌翠,何瑜.肖家沟泥石流发育特征及危险性评价[J].甘肃水利水电技术,2011,47(10):5-8.
- [8] 杨东旭,陈晓清,游勇,等.汶川地震区绵竹小岗剑沟泥石流发展趋势[J].山地学报,2012,30(6):701-708.
- [9] Tang Chuan, Zhu Jing, Cui Xiaofei, 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.
- [10] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004:50-55.
- [11] 葛文彬,唐炳炎,唐邦兴,等.泥石流灾害防治工程勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2006.