

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 89 - 09

强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的 遥感动态演变

常 鸣 唐 川 蒋志林 马国超

(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: “5 · 12”汶川大地震导致大量碎屑物质在陡峭的斜坡积累,当遇到强降雨时极易成为泥石流的物源地。2010 - 08 - 13 一场暴雨导致都江堰市 48 条沟同时暴发泥石流。选择汶川地震高烈度区的龙池镇境内 12 条泥石流沟为研究区,采用基于遥感的手段研究“5 · 12”震前、震后、“8 · 13”暴雨后泥石流流域内物源的变化特征。强震后研究区泥石流流域物源重要变化是大量的崩滑体被诱发。暴雨后研究区泥石流流域物源变化是震后产生的滑坡产生了不同程度的滑移扩张。通过开展遥感解译,结合野外调查,详细论述了研究区泥石流物源的变化情况。将“5 · 12”汶川地震前(2007 - 09 - 18)经波段融合后 15 m 的 TM 影像与地震后(2009 - 02 - 10)的 2.5 m 全色 SPOT5 影像相比较,发现泥石流流域内的滑坡体积由震前的 $0.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ 增加到地震后的 $42.30 \times 10^6 \text{ m}^3$,即汶川高烈度区经过地震后新增滑坡体积达 4 835.94%。而经过暴雨后(2011 年 7 月)的 0.5 m 全色波段 WorldView - 2 影像,泥石流流域内的滑坡体积又增加到 $68.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,即研究区经过暴雨后新增滑坡体积达 62.76%。研究结果表明,汶川震区在地震及暴雨下物源量猛增,导致泥石流暴发的概率很高。

关键词: 汶川地震; 泥石流; 滑坡; 动态演变; 遥感

中图分类号: P692.23

文献标志码: A

“5 · 12”汶川地震后,为了快速准确的判别各种地质灾害体,遥感技术被广泛的应用^[1-2],为震后地质灾害的评估、城镇风险性的分析以及应急处理提供了有力的技术支持。在泥石流领域,高分辨率的遥感图像已经得到了广泛的应用,成为调查、监测、预警最有力的手段。例如唐川等利用高精度的 Quickbird 的图像进行了城市泥石流风险性的评估^[3]。台湾在 1999 年集集地震后,充分利用 SPOT 影像详细解译了震后泥石流流域内的崩塌、滑坡等松散物源,并且在随后的台风导致的泥石流灾害中得到充分的利用,根据获取的参数建立了泥石流发生严重程度的统计模型^[4]。在西藏等高海拔地区,可以利用高精度的遥感影像实时监控冰湖的变化,

一旦冰湖溃决形成泥石流后,可在影像上有效的判别堆积扇的范围。由于在第一时间内获取了由台湾“福卫二号”提供的北川光学遥感影像,及时的发现了唐家山大滑坡导致的堰塞湖,为抢险救灾赢得了宝贵的时间^[5]。2010 - 08 - 13 暴雨(简称“8 · 13”暴雨),在四川省绵竹市清平乡绵远河流域产生群发性泥石流,其携带的泥沙淤埋冲毁沿河两岸百所房屋。最为典型的文家沟泥石流因携带大量的砂砾,直接在交汇绵远河后堵塞河道并形成堰塞湖,威胁整个清平场镇,迫使沿途居民紧急逃离^[6-7]。与此同时,位于都江堰市龙池镇的龙溪河流域也遭到暴雨袭击,导致流域内 48 条沟同时暴发泥石流,最为典型的水打沟泥石流将沟口 4 户农家乐淤埋并且

收稿日期(Received date): 2013 - 03 - 08; 改回日期(Accepted): 2013 - 03 - 23。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划课题(2011BAK12B01) 和地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究项目(SKLGP2011Z008)。[This research is supported by the National Science and Technology SupportPlans Program (2011BAK12B01) and SKLGP independently research projects(SKLGP2011Z008) .]

作者简介(Biography): 常鸣(1985 -),男,博士研究生,研究方向:环境地质、地质灾害、遥感与 GIS 应用。[Chang Ming (1985 -), male ,Ph D ,majoring in environment geology , "3S" technologies and geological hazards.]E - mail: changmxq@ 126. com

损毁公路 100 m ,对下游龙池镇构成极大威胁^[8]。据统计 ,15 000 处崩滑体在汶川大地震中被诱发 ,间接造成约 2 万人伤亡。为了进一步分析“5·12”汶川地震对泥石流形成带来的影响 ,对比分析“8·13”暴雨后对泥石流物源变化的影响 ,本文对比了研究区泥石流流域在“5·12”汶川地震前(2007-09-18)经波段融合后 15 m 的 TM 影像、地震后(2009-02-10)的 2.5 m 全色 SPOT5 影像 ,以及“8·13”暴雨后 2011 年 7 月的 0.5 m 全色波段 WorldView-2 影像 3 幅图上的物源变化 ,并进行了定量解译 ,用来归纳震后及暴雨后泥石流活动的强度和发展趋势 ,最大程度上为汶川震区泥石流灾害的风险评价、预测预报和重建规划提供科学依据。

1 研究区概况

研究区在汶川地震极重灾区的都江堰龙池镇龙溪河流域。该区在构造上属龙门山断裂带 ,其中在汶川地震的映秀-北川断裂是主发震断裂 ,它横贯研究区 ,导致岩体破碎严重 ,进而遭受风化卸荷强烈 ,成为典型的构造不稳定区域^[9]。

研究区属中亚热带湿润季风气候区 ,四季分明 ,温度较低 ,日照较少 ,阴雨天气频繁 ,多年平均降水量 1 134.8 mm ,而且降水量在时间上分配严重不均 5—9 月降水量占全年降水量的 80%。8 月是月降水平均最多的月 ,降水量达 289.9 mm ,1 月降雨量最少 ,为 12.7 mm。

“5·12”汶川地震导致龙池镇旅游风景区被崩塌、滑坡、泥石流彻底摧毁 ,造成了巨大的经济财产损失。然而“8·13”暴雨泥石流 ,又将震后重建的部分房屋摧毁。这场灾害前 ,从 8 月 4 日起龙池镇开始持续降雨 ,13 日下午降雨量猛增 ,最大 1 h 降雨量达 75 mm ,最大 2 h 降雨量达 128.3 mm ,连续 3 h 降雨量达到 150 mm ,最终导致了山洪泥石流暴发 (图 1)。为此 ,我们选取了龙池镇龙溪河流域面积约为 28.31 km² 的区域作为研究区。其位于都江堰市西北部 ,流域共包含 12 条泥石流沟 ,它们受“5·12”地震及“8·13”暴雨影响严重。本文利用高分辨率遥感图像统计了它们的基本情况 (表 1) ,在地形表面产生了多处滑坡等地质灾害体并且大量的松散物质已经汇入沟道 ,直接能够为泥石流的启动提供物源条件。“8·13”暴雨泥石流直接导致龙溪河河道被堵塞 ,河床淤埋后整体抬升 5 m ,其产生的洪

水危害对灾区的灾后恢复重建十分不利。

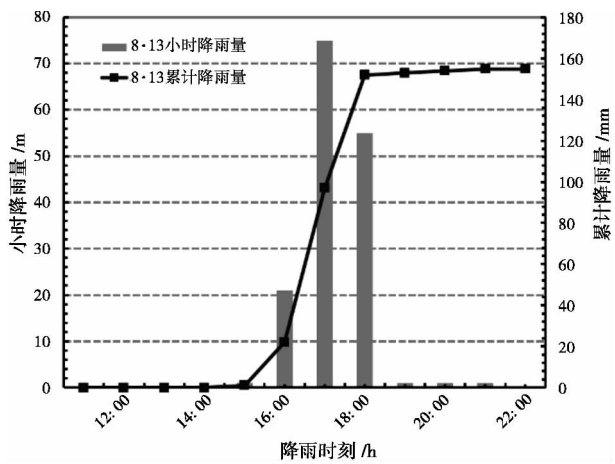


图 1 都江堰龙池镇 2010-08-13 降雨数据

Fig. 1 Rainfall data of meteorological station on Aug. 13, 2010

表 1 都江堰市龙池镇泥石流沟的地形参数

Table 1 Topographic parameters of debris flow gullies in Longchi country of Dujiangyan

| 编号 | 沟名 | 流域面积 /km ² | 沟道长度 /km | 流域高差 /km | 沟道坡度 /° | 灾害体面 积/km ² |
|------|-------|--------------------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|
| DF01 | 茶马古道沟 | 0.25 | 0.71 | 0.46 | 33.29 | 0.02 |
| DF02 | 燕子窝沟 | 0.1 | 0.32 | 0.3 | 43.42 | 0.03 |
| DF03 | 公家沟 | 0.49 | 1.31 | 0.64 | 26.14 | 0.02 |
| DF04 | 八一沟 | 8.5 | 4.23 | 1.65 | 21.25 | 2.01 |
| DF05 | 麻柳沟 | 0.92 | 1.76 | 0.94 | 28.14 | 0.17 |
| DF06 | 水井槽沟 | 0.15 | 0.33 | 0.36 | 47.32 | 0.03 |
| DF07 | 黄央沟 | 0.61 | 1.64 | 0.95 | 30.19 | 0.26 |
| DF08 | 水打沟 | 0.33 | 1.12 | 0.62 | 28.79 | 0.05 |
| DF09 | 白果堂沟 | 0.19 | 0.43 | 0.36 | 39.79 | 0.01 |
| DF10 | 麻柳槽沟 | 0.89 | 1.81 | 0.91 | 26.78 | 0.16 |
| DF11 | 沙子坪沟 | 0.17 | 0.59 | 0.56 | 43.56 | 0.04 |
| DF12 | 李泉太沟 | 0.32 | 0.86 | 0.68 | 38.29 | 0.06 |

2 遥感数据提取及研究方法

2.1 遥感数据提取

我们分别购买了 3 期遥感影像 ,根据不同影像传感器的特点首先对遥感影像进行了预处理 ,包括图像增色、几何纠正、图像镶嵌 ,然后对这 3 期影像进行精确的配准。“5·12”地震前 ,研究区地质灾害

发育极少,因此我们采用了2007-09-18经波段融合后15 m的TM影像,在影像上能够反映出老滑坡的特征(图2)。“5·12”地震后,研究区的地质灾害特别发育,因此采用2009-02-10的2.5 m全色SPOT5影像,它能够清晰的勾勒出比震前多产生的崩滑体(图3)。“8·13”暴雨后,研究区的地质灾害比震前有了明显的扩张,而且大部分是在震前滑坡的基础上进行的。为了更好的区分崩滑体细微的动态变化,我们采用2011年7月的0.5 m全色波段WorldView-2影像,统计出由于暴雨而引起的地质灾害体的变化(图4)。本文利用3期高分辨遥感影像能够识别出不同阶段的泥石流沟内的中小型滑坡和沟道堆积体,对分布于泥石流流域范围内长度为数米的小型浅层滑坡以及数百米的大型深层滑坡,都能够从影像上解译出来。通过对龙溪河流域城12条主要泥石流沟及其流域内滑坡特征的野外调查,建立崩滑体的解译标志,在此基础上开展室内目视解译,提取泥石流流域的滑坡及其典型的物源信息。

2.2 研究方法

研究区3期泥石流流域的崩塌、滑坡和沟道堆积体在遥感图像的色调、纹理、形态、结构等均与其他地物的特点有不同^[10-11],因此不同期泥石流的松散物源体的形态、规模及类型都能够直接的在遥感图像上判读解译。尽管汶川地震前、地震后、暴雨后诱发的崩滑体在出现的高程、坡度以及地层岩性上有一定的差异,但是它们在遥感图像上的形态、色调等不同的解译标志具有相似性。我们通过这些物源在不同期泥石流流域影像的判别特征,进行了详细的解译,并统计了物源面积及体积变化的情况,详细分析了物源的类型、规模,充分利用遥感技术进行特征评估,进一步可以为泥石流风险性评价提供依据^[12]。

为了方便的统计泥石流流域的崩滑体的规模,本文计算崩滑体的变化情况,通过遥感解译将崩滑体按面积大小分为3种类型:1. 遥感图像上解译的滑坡面积 $<10\,000\text{ m}^2$,属于小型滑坡,通过野外调查发现,该类滑坡广泛发育于靠近泥石流沟道两岸的地方,以浅层滑坡为主,一般厚度不超过5 m。2. $10\,000\text{ m}^2 < \text{滑坡面积} < 50\,000\text{ m}^2$,属于中型滑坡,一般发育于海拔较高,坡度较为陡峭的地方,其厚度为5~50 m;3. 滑坡面积 $>50\,000\text{ m}^2$,属于大型滑坡

体,一般发育于泥石流沟的源地,十分陡峻的地方,能够提供充足的固体物质,其厚度 $>50\text{ m}$ 。根据研究区的特点,我们选择了高程、地层岩性、坡度3个因子作为评价指标,利用ArcGIS软件进行了空间分析,在不同因子上划分出不同的等级,详细论述每个区间内物源体的分布情况,总结出研究区泥石流流域内崩滑体的分布特征。

3 研究结果

3.1 “5·12”汶川地震对泥石流流域物源的影响

汶川地震对泥石流物源的最为显著的影响就是诱发了大量的崩塌、滑坡,直接导致原本风景秀丽的旅游景区成为千疮百孔的灾区,而且产生的松散固体物质直接为泥石流的形成提供必备的条件,结果是使地震后相当长的一段时期内泥石流的活动更为频繁^[13]。

通过“5·12”震前、震后两期影像的对比,发现在研究区泥石流沟的中下游离沟道两侧较近的地方都分布着大面积的崩塌、滑坡、不稳定斜坡,其中主要分布的是浅层的小规模滑坡,但是在泥石流的源地有一些规模较大的深层滑坡发育。已经有一部分滑坡产生了部分蠕变,将部分滑坡体“悬挂”在陡峭的后壁上,随时可能在外力的条件下加速滑落;还有一部分滑坡已经全部脱离了母体,将大量的固体物质堆积到沟道中,伴随着降雨等极端气候的出现,它们就有可能直接参与到泥石流的活动。为了详细观察崩滑体的变化特征,震前崩滑体较少,我们直接野外调查到其堆积均厚进行计算,震后崩滑体较多,我们利用唐川提供的强震区滑坡体厚度及体积的计算公式得到研究区崩滑体的体积^[14]

$$t = 1.432 \ln(S_L) - 4.985 \quad (1)$$

$$V = S_L \cdot t \quad (2)$$

式中 t : 滑坡的厚度(m); S_L : 滑坡的面积(m^2); V : 滑坡的体积(m^3)。经过统计得到两期影像中物源的面积及体积方量,见表2、表3。滑坡体的面积由震前的 $8.31 \times 10^4\text{ m}^2$ 增加到地震后的 $312.66 \times 10^4\text{ m}^2$,体积由震前的 $0.86 \times 10^6\text{ m}^3$ 增加到地震后的 $42.30 \times 10^6\text{ m}^3$,即经过地震后新增滑坡体积达4835.94%。通过这2期不同时间段的遥感影像解译,说明了汶川地震能够为研究区泥石流的暴发提供大量必要的松散固体物质。

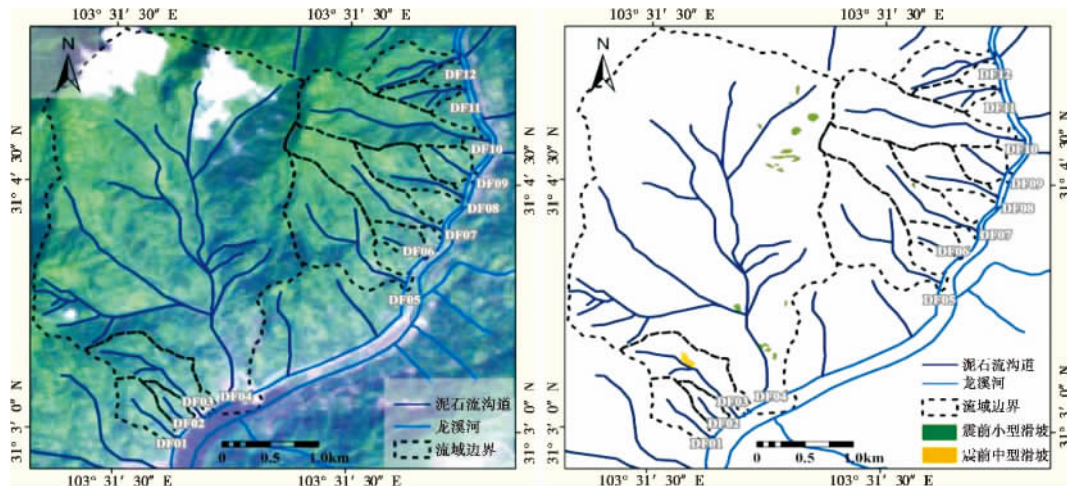


图2 2007-09-18的15 m的TM影像及研究区震前滑坡遥感解译结果

Fig. 2 TM images taken on 18 September 2007 and interpreted landslides in the study area before Wenchuan earthquake

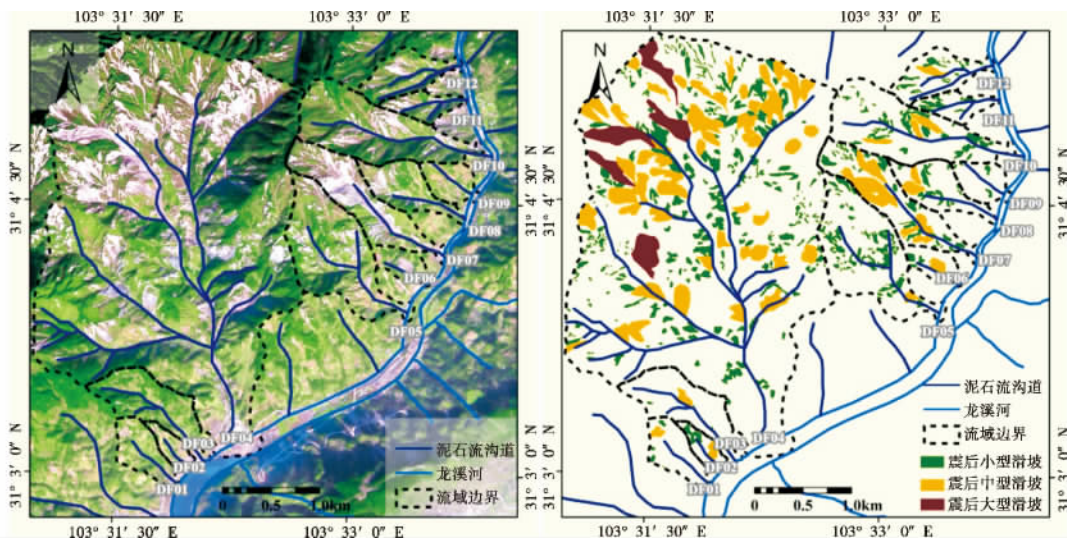


图3 2009-02-18的2.5 m多光谱SPOT5影像及研究区震后滑坡遥感解译结果

Fig. 3 Spot 5 images taken on 18 February 2009 and interpreted results of the Wenchuan earthquake triggered landslides in the study area

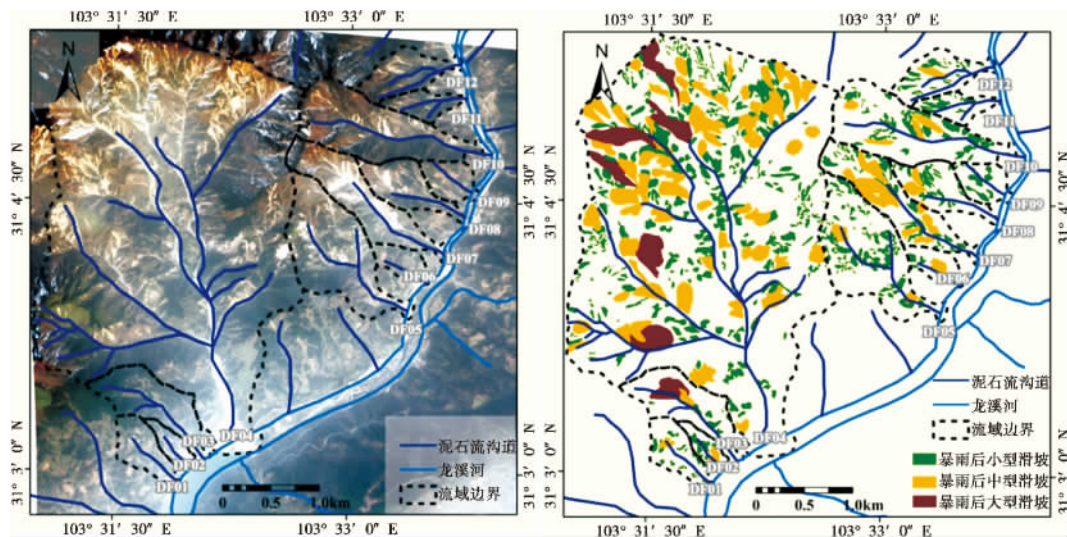


图4 2011-07-14的0.5 m 全色WorldView2影像及暴雨后滑坡遥感解译结果

Fig. 4 Worldview-2 images taken on 14 July 2011 and interpretation results of the rainstorm induced landslides

表 2 研究区“5·12”地震前滑坡面积、体积统计表

Table 2 Statistical results of landslide area and volume before “5·12”earthquake in study area

| 编号 | 沟名 | 面积/(10 ⁴ m ²) | | | | 体积/(10 ⁶ m ³) | | | |
|------|-------|--------------------------------------|------|------|------|--------------------------------------|------|------|------|
| | | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 |
| DF01 | 茶马古道沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF02 | 燕子窝沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF03 | 公家沟 | 0.00 | 1.43 | 0.00 | 1.43 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.12 |
| DF04 | 八一沟 | 0.00 | 0.00 | 6.58 | 6.58 | 0.00 | 0.00 | 0.72 | 0.72 |
| DF05 | 麻柳沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF06 | 水井槽沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF07 | 黄央沟 | 0.00 | 0.00 | 0.22 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| DF08 | 水打沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF09 | 白果堂沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF10 | 麻柳槽沟 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF11 | 沙子坪沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DF12 | 李泉太沟 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 合计 | | 0.00 | 1.43 | 6.88 | 8.31 | 0.00 | 0.13 | 0.73 | 0.86 |

3.2 “8·13”暴雨对泥石流流域物源的影响

为了清楚的了解震后暴雨如何激发泥石流以及引起松散物源的变化,我们采用了 2011-07-14 worldview2 的分辨率达 0.5 m 的全色影像对强降雨后泥石流流域的物源变化进行解译并统计。由于该卫星分辨率极高,因此能够及时的发现强降雨导致的滑坡和地震后导致的滑坡的变化。我们发现,一方面强降雨过程可以导致部分大型滑坡局部复活,表现在遥感图像上的现象是该类滑坡的面积在原有

滑坡体面积的基础上明显扩大,有些滑坡已经产生了大的形变,并将部分固体颗粒推移到沟道中去;另一方面,强降雨还诱发大量的新滑坡,这些新滑坡集中分布于泥石流上游沟道的两侧地势较为陡峭的地方,易受雨水侵蚀,主要表现为中小规模的沟岸滑塌。为了清楚的统计暴雨后的滑坡面积,我们在原位滑坡的基础上进行了新的解译,由于暴雨后的滑坡与地震后的滑坡有着明显的联系,选取几处滑坡计算后发现可以利用公式(1)、(2)计算暴雨后的滑

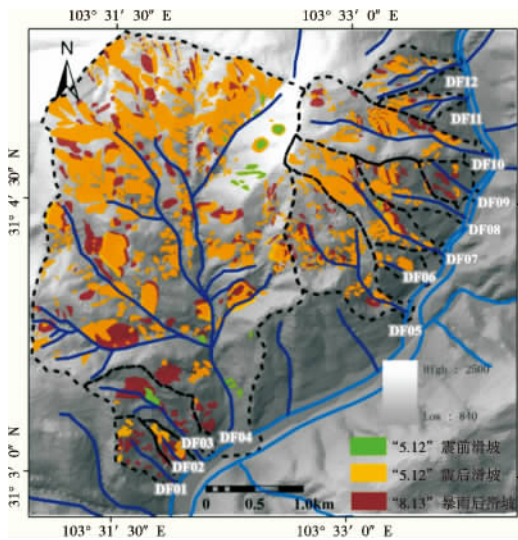


图 5 滑坡在高程上的分布

Fig. 5 The map of landslide in elevation factor

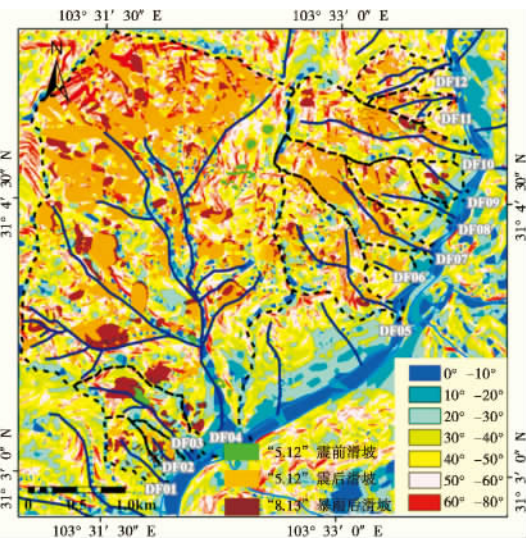


图 6 滑坡分布与坡度因子图

Fig. 6 The map of landslide in slope factor

坡体积。

从图 4 和图 5 可以看到,在泥石流流域上游源地附近沿沟岸两侧新增了大量崩滑体,在中下游沟道两侧由地震引起的中型及大型滑坡出现不同程度的扩张,具体表现在滑坡前缘向前扩张,后缘不断地垮塌,同时表层的松散物在降雨后被地表径流强烈冲刷逐步运移到沟道中,可以直接参与到泥石流启动的过程中^[15-16]。经统计两期影像中崩滑体的面积及体积(表 3、表 4),滑坡的面积由震后的 $312.66 \times 10^4 \text{ m}^2$ 增加到暴雨后的 $399.51 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积由震后的 $42.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 增加到暴雨后的 $68.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,即经过地震后新增滑坡体积达 62.76%。

3.3 不同时期泥石流物源在高程上的分布

我们利用 ARCGIS 软件的空间分析功能,首先在 1:1 万地形图上提取 DEM,然后将 3 期泥石流物源与 DEM 进行叠加分析(图 5),统计出在高程因子中不同等级下滑坡的面积,见表 5。

通过表 5 可以看出,在海拔为 1 200 ~ 1 600 m 的地方滑坡大量分布,而在其余的高程滑坡的分布明显偏低,这说明地震致使大量崩滑体位于海拔较高的地方,但是超过一定的海拔后大部分都已经被风化侵蚀,基岩出露,因此崩滑体数量有所降低,同样在暴雨的影响下该区间崩滑体产生了不同程度的滑移。因此在今后的监测预警工作中要加强该区域的检查力度。

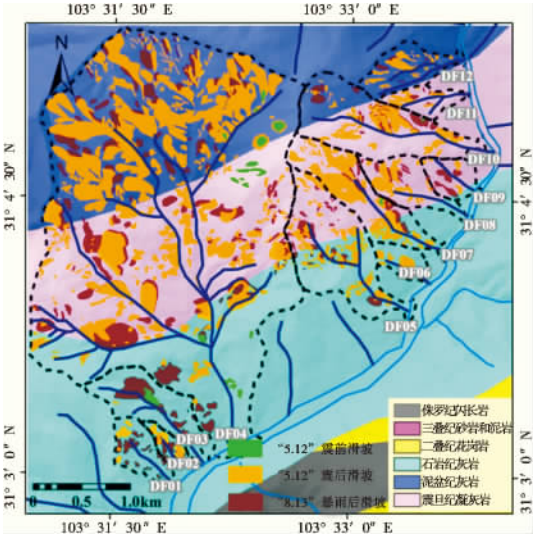


图 7 滑坡分布与岩性图

Fig. 7 The map of landslide in lithologic factor

3.4 不同时期泥石流物源在不同坡度的分布

我们利用已经得到的 DEM,再通过 ARCGIS 软件的空间分析功能,生成研究区整体坡度图(图 6),统计出在坡度因子中不同等级下滑坡的面积(表 6)。可以看到在坡度 $30^\circ \sim 50^\circ$,崩滑体在这 3 个时期的面积和体积都是最多的。一开始随着坡度的增加,崩滑体向下的滑力不断增加,致使斜坡越来越不稳定,崩滑体逐步增加,但是增加到一定坡度的时候,由于坡度陡峭,加之越陡峭的地方风化侵蚀越严

表 3 “5·12”震后研究区内滑坡面积、体积统计表

Table 3 Statistical results of landslide area and volume after “5·12” earthquake in study area

| 编号 | 沟名 | 面积/(10^4 m^2) | | | | 体积/(10^6 m^3) | | | |
|------|-------|---------------------------|--------|--------|--------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 |
| DF01 | 茶马古道沟 | 0.00 | 1.13 | 0.79 | 1.92 | 0.00 | 0.09 | 0.06 | 0.16 |
| DF02 | 燕子窝沟 | 0.00 | 1.39 | 1.77 | 3.16 | 0.00 | 0.12 | 0.15 | 0.27 |
| DF03 | 公家沟 | 0.00 | 1.43 | 0.28 | 1.71 | 0.00 | 0.12 | 0.02 | 0.14 |
| DF04 | 八一沟 | 36.82 | 99.39 | 91.62 | 227.84 | 4.92 | 14.68 | 13.39 | 32.99 |
| DF05 | 麻柳沟 | 0.00 | 1.07 | 15.53 | 16.60 | 0.00 | 0.09 | 1.88 | 1.97 |
| DF06 | 水井槽沟 | 0.00 | 1.88 | 1.14 | 3.02 | 0.00 | 0.17 | 0.10 | 0.27 |
| DF07 | 黄央沟 | 0.00 | 17.00 | 8.00 | 25.00 | 0.00 | 2.08 | 0.89 | 2.98 |
| DF08 | 水打沟 | 0.00 | 3.32 | 3.96 | 7.28 | 0.00 | 0.33 | 0.40 | 0.73 |
| DF09 | 白果堂沟 | 0.00 | 0.00 | 0.97 | 0.97 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.08 |
| DF10 | 麻柳槽沟 | 0.00 | 4.90 | 11.34 | 16.24 | 0.00 | 0.51 | 1.33 | 1.84 |
| DF11 | 沙子坪沟 | 0.00 | 0.00 | 3.26 | 3.26 | 0.00 | 0.00 | 0.32 | 0.32 |
| DF12 | 李泉太沟 | 0.00 | 1.95 | 3.71 | 5.66 | 0.00 | 0.18 | 0.37 | 0.55 |
| 合计 | | 36.82 | 133.46 | 142.37 | 312.66 | 4.92 | 18.38 | 19.00 | 42.30 |

表 4 研究区“8·13”暴雨后滑坡面积、体积统计表

Table 4 Statistical results of landslide area and volume after “8·13”rainstorm in study area

| 编号 | 沟名 | 面积/(10 ⁴ m ²) | | | | 体积/(10 ⁶ m ³) | | | |
|------|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| | | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 | 大型滑坡 | 中型滑坡 | 小型滑坡 | 合计 |
| DF01 | 茶马古道沟 | 0.00 | 1.14 | 3.23 | 4.37 | 0.00 | 0.10 | 0.32 | 0.42 |
| DF02 | 燕子窝沟 | 0.00 | 1.39 | 2.24 | 3.63 | 0.00 | 0.12 | 0.21 | 0.33 |
| DF03 | 公家沟 | 5.75 | 1.43 | 2.64 | 9.82 | 0.62 | 0.13 | 0.25 | 0.99 |
| DF04 | 八一沟 | 44.91 | 131.91 | 106.81 | 283.64 | 19.99 | 19.99 | 15.89 | 55.88 |
| DF05 | 麻柳沟 | 0.00 | 3.38 | 19.50 | 22.88 | 0.00 | 0.34 | 2.43 | 2.77 |
| DF06 | 水井槽沟 | 0.00 | 1.88 | 1.14 | 3.02 | 0.00 | 0.17 | 0.10 | 0.27 |
| DF07 | 黄央沟 | 0.00 | 18.02 | 10.11 | 28.13 | 0.00 | 2.23 | 1.16 | 3.39 |
| DF08 | 水打沟 | 0.00 | 3.32 | 5.66 | 8.98 | 0.00 | 0.33 | 0.60 | 0.93 |
| DF09 | 白果堂沟 | 0.00 | 0.00 | 3.78 | 3.78 | 0.00 | 0.00 | 0.38 | 0.38 |
| DF10 | 麻柳槽沟 | 0.00 | 5.98 | 15.08 | 21.06 | 0.00 | 0.64 | 1.82 | 2.47 |
| DF11 | 沙子坪沟 | 0.00 | 0.00 | 3.67 | 3.67 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.37 |
| DF12 | 李泉太沟 | 0.00 | 1.95 | 4.58 | 6.53 | 0.00 | 0.18 | 0.48 | 0.66 |
| 合计 | | 50.66 | 170.40 | 178.44 | 399.51 | 20.61 | 24.22 | 24.02 | 68.85 |

表 5 研究区不同时期滑坡在不同高程的面积统计表

Table 5 Statistical results of different period landslide area and volume in elevation factor

| 高程分级 /m | “5·12”汶川地震 前滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “5·12”汶川地震 后诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “8·13”暴雨后 诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) |
|-------------|---|---|---|
| 800~1 000 | 1.54 | 4.54 | 10.49 |
| 1 000~1 200 | 1.72 | 38.48 | 53.13 |
| 1 200~1 400 | 0.31 | 79.22 | 105.99 |
| 1 400~1 600 | 1.24 | 75.68 | 94.65 |
| 1 600~1 800 | 2.80 | 61.54 | 67.74 |
| 1 800~2 000 | 0.71 | 32.52 | 42.95 |
| >2 000 | 0.00 | 20.69 | 24.56 |
| 总和 | 8.31 | 312.66 | 399.51 |

重,崩滑体基本不能形成,因此在特定的区间内,滑坡会显著增加。研究区在 30°~50°间需要特别关注崩滑体,一般说来,降雨后的崩滑体坡度要比震后的偏低,但是由于本研究区面积较小,崩滑体的数量有限,没有明显体现出这一规律。

3.5 不同时期泥石流物源分布与岩性特征

我们利用矢量化的1:5万的地质图,通过 ARC-GIS 软件的空间分析功能,生成研究区完整的分级地质图(图 7),统计出在岩性因子中不同等级下滑

坡的面积(表 7)。可以看到在二叠纪花岗岩和震旦纪凝灰岩之间,崩滑体在这 3 个时期的面积和体积都是最多的,由于花岗岩的岩性比较脆,一旦遭到地质活动强烈时,就会破碎,在降雨的作用下大量流失。在凝灰岩的地层中,由于岩石风化后残留了很厚的土层,遇到地表径流的时候也会大量的流失,由此产生崩滑体。因此,我们必须在这两个地层岩性中特别关注崩滑体的发育。

表 6 研究区不同时期滑坡在不同坡度的面积统计表

Table 6 Statistical results of different period landslide area and volume in slope factor

| 坡度分级 /° | “5·12”汶川地震 前滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “5·12”汶川地震 后诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “8·13”暴雨后 诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) |
|------------|---|---|---|
| 0~10 | 0.21 | 6.07 | 7.77 |
| 10~20 | 0.65 | 5.82 | 8.50 |
| 20~30 | 2.31 | 43.34 | 61.83 |
| 30~40 | 3.27 | 147.04 | 190.32 |
| 40~50 | 1.65 | 96.13 | 114.52 |
| 50~60 | 0.21 | 12.79 | 14.93 |
| 60~80 | 0.01 | 1.49 | 1.65 |
| 总和 | 8.31 | 312.66 | 399.51 |

表 7 研究区不同时期滑坡在不同岩性的面积统计表

Table 7 Statistical results of different period landslide area and volume in lithology factor

| 岩性 | “5·12”汶川地震 前滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “5·12”汶川地震 后诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) | “8·13”暴雨后 诱发滑坡面积 /(10 ⁴ m ²) |
|----------|---|---|---|
| 侏罗纪闪长岩 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 三叠纪砂岩和泥岩 | 3.27 | 42.58 | 64.76 |
| 二叠纪花岗岩 | 2.40 | 147.07 | 172.68 |
| 石炭纪灰岩 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 泥盆纪灰岩 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 震旦纪凝灰岩 | 2.65 | 123.02 | 162.07 |
| 总和 | 8.31 | 312.66 | 399.51 |

4 结论

本文根据现场调查与解译的成果进行对比,3期遥感影像的滑坡面积的解译误差在8%~12%,基本能够满足所需的精度要求,能够反映震前、震后及暴雨后研究区泥石流流域内崩滑体的基本特征。

1. 根据“5·12”震前、震后2期不同分辨率影像的解译,经过地震后研究区泥石流流域的中下游离沟道两侧较近的地方都分布着大面积的崩塌、滑坡、不稳定斜坡,已经有一部分的滑坡产生了部分蠕变,将部分滑坡体“悬挂”在陡峭的后壁上,还有一部分滑坡已经全部脱离了母体,将大量的固体物质堆积到沟道中,随着降雨等极端气候的出现,它们可以直接参与到泥石流流的活动^[17]。

2. 根据“5·12”震后、“8·13”暴雨后2期不同分辨率影像的解译,经过暴雨后,研究区泥石流流域的滑坡面积在原有的基础上产生了大的形变,扩大了原来的规模并将部分固体颗粒推移到沟道中,并且还能够诱发大量的新滑坡。由暴雨诱发的崩滑坡体面积在地震诱发的崩滑体面积基础上增加了6.72%。

3. 根据“5·12”震前、震后、“8·13”暴雨后3期不同分辨率影像中崩滑体在高程、坡度、岩性的分布情况,得到在海拔1200~1600 m的范围内、坡度在30°~50°的范围内、岩性在二叠纪花岗岩和震旦纪凝灰岩的崩滑体分布最为广泛。因此,我们必须在这些范围特别关注地质灾害的发育情况。

参考文献(References)

- [1] Yang Junjie, Zhan Zhi, Wang Xu. Secondary seismic mountainous geological disasters survey in Wenchuan County based on spacial information science [J]. Mountain Research, 2008, 26(6): 755–760 [杨军杰, 张志, 王旭. 汶川地震次生山地地质灾害遥感调查[J]. 山地学报, 2008, 26(6): 755–760]
- [2] Su Fenghuan, Liu Hongjiang, Han Yongshun. The extraction of mountain hazard induced by Wenchuan earthquake and analysis of its distributing characteristics [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 956–963 [苏凤环, 刘洪江, 韩用顺. 汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 956–963]
- [3] Tang Chuan, Zhang Jun, Wan ShiYun, et al. Loss evaluation of urban debris flow hazard using high spatial resolution satellite imagery [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(3): 358–368 [唐川, 张军, 万石云. 基于高分辨率遥感影像的城市泥石流灾害损失评估[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 358–68]
- [4] Lina C W, Shieh C, Yuan B D. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2003, 71: 49–61
- [5] Tang Chuan, Ding Jun, Liang Jingtao. Remote sensing images based observational analysis on characters of debris flow source areas in Beichuan country earthquake epicenter region [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 1–7 [唐川, 丁军, 梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 1–7]
- [6] Tang C, van Asch T W J, Chang M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms [J]. Geomorphology, 2012, 139: 559–576
- [7] Chang Ming, Tang Chuan, Li Weile. The characteristic of collapse and landslide by Wenchuan earthquake in debris flow for region along the Mianyu River basin, China [J]. Mountain Research, 2012, 30(5): 561–569 [常鸣, 唐川, 李为乐. 汶川地震区绵远河流域泥石流形成区的崩塌滑坡特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 561–569]
- [8] Chang Ming, Tang Chuan, Fu Rong, et al. Static and dynamic characteristics and formation conditions of debris flow hazard of Shuida Gully [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 103–106 [常鸣, 唐川, 付荣. 水打沟泥石流形成条件及其静动力学特征[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 103–106]
- [9] Chen H, Dadson S, Chi Y G. Recent rainfall induced landslides and debris flow in northern Taiwan [J]. Geomorphology, 2006, 77: 112–125
- [10] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquakes, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 883–895
- [11] Dong J J, Lee C T, Tung Y H, et al. The role of the sediment budget in understanding debris flow susceptibility [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34: 1612–1624
- [12] Hürlimann M, Copons R, Altimir J. Detailed debris on hazard assessment in Andorra: a multidisciplinary approach [J]. Geomorphology, 2003, 51: 1–15

- phology, 2006, 78: 359 – 372
- [13] Tang Chuan, Zhu Jing. Approach for urban debris flow risk assessment [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 67 – 71 [唐川, 朱静. 城市泥石流灾害风险评价探讨 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 67 – 71]
- [14] Chuan Tang, Jing Zhu, Ming Chang, et al. An empirical statistical model for predicting debris – flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. *Quaternary International*, 2012, 250: 63 – 73
- [15] Iverson R M, Reid M E, La H, et al. Debris flow mobilization from landslides [J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 1997, 25: 85 – 138
- [16] Khattak G A, Owen L A, Kamp U, et al. Evolution of earthquake triggered landslides in the Kashmir Himalaya, northern Pakistan [J]. *Geomorphology*, 2010, 115: 102 – 108
- [17] Koi T, Hotta N, Ishigaki I, et al. Prolonged impact of earthquake – induced landslides on sediment yield in a mountain watershed, The Tanzawa region, Japan [J]. *Geomorphology*, 2008, 101: 692 – 702

Dynamic Evolution Process of Sediment Supply for Debris Flow Occurrence in Longchi of Dujiangyan ,Wenchuan Earthquake Area

CHANG Ming, TANG Chuan, JIANG Zhilin, MA Guochao

(State Key Laboratory for Geo – Hazard Prevention and Geo – Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract “5 • 12” Wenchuan Earthquake of China produced abundant debris left behind on the hillside slopes, when encountering heavy rains, it will generate debris flow. On 13th October 2010, a total of 48 debris flows were triggered by heavy rainfall in the central part of the epicenter region affected by the Wenchuan Earthquake. 12 debris flows of Longchi, Dujiangyan County of China in the central epicenter region are chosen for analyzing the change of debris flow source area before and after the earthquake and also following a rainstorm. Significant differences after the earthquake and rainstorm are noticed in producing a large amount of landslides for debris flow occurrence. Through the remote sensing interpretation, combining with field investigation, this paper expounds debris flow source activity in the studied area. Comparison of the TM images taken on 18th September 2007 (before the “5 • 12” Wenchuan earthquake) with the SPOT 5 images taken on 10th February 2009 (after the “5 • 12” Wenchuan earthquake) indicates that the landslide area in 12 debris flow watersheds increases from $0.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ to $42.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ during that period of time, which means landslide volume increases 4 835.94% after Wenchuan earthquake. Comparison of the SPOT 5 images taken on 10th February 2009 (after the “5 • 12” Wenchuan earthquake) with the WorldView – 2 images taken on 14th July 2011 (after the “8 • 13” rainstorm event) indicates that the landslide area in 12 debris flow watersheds increases from $42.30 \times 10^6 \text{ m}^3$ to $68.85 \times 10^6 \text{ m}^3$ during that period of time, which means landslide volume increases 62.76% after rainstorm.

Key words: Wenchuan earthquake; debris flow; landslides; dynamic evolution; remote