

doi:10.3799/dqkx.2010.033

# 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析

唐川, 齐信, 丁军, 杨泰平, 罗真富

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:** 强烈地震作用对山地斜坡稳定性影响是长期的, 汶川地震不仅直接诱发了大量滑坡, 而且在后继的强降雨过程中大大加速了震区滑坡的活动性。以汶川地震高烈度区的北川县城及岷江河谷为研究区, 利用高精度航空图像解译出 1 214 处不同类型的滑坡。地震后的 2008 年 9 月 24 日暴雨过程诱发了更多的滑坡和泥石流, 这场 20 年一遇的强降雨的累积雨量为 272.7 mm。基于 SPOT 5 遥感影像解译, 共发现新增的暴雨滑坡 823 处。根据“9·24”暴雨前后的遥感解译结果对比, 研究区暴雨诱发的滑坡数量增加了 68%, 滑坡面积扩大了 46.6%, 这种现象表明强震后暴雨对滑坡发育和活动影响十分明显。研究结果也说明汶川震区在强降雨作用下极易发生滑坡和泥石流。

**关键词:** 汶川地震; 滑坡活动; 遥感图像; 暴雨; 解译。

中图分类号: P627; P642.22

文章编号: 1000-2383(2010)02-0317-07

收稿日期: 2009-07-28

## Dynamic Analysis on Rainfall-Induced Landslide Activity in High Seismic Intensity Areas of the Wenchuan Earthquake Using Remote Sensing Image

TANG Chuan, QI Xin, DING Jun, YANG Tai-ping, LUO Zhen-fu

*State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

**Abstract:** A catastrophic earthquake always intensively disturbs ground strata and affects the slope stability for a long period of time. The Wenchuan earthquake not only triggered serious coseismic landslides, but also extensively accelerated the landslide activity during the subsequent heavy rains. Based on the interpretation of high resolution of aerial photographs, 1 214 landslides are identified, most of which are shallow landslides, rock falls, and rock slides triggered in the high seismic intensity region of the Wenchuan earthquake near the Beichuan City and along the valleys of the Jianjiang River. A heavy rainfall on 24 September, 2008 triggered more landslides and debris flows in the central part of the area affected by the Wenchuan earthquake. The accumulated precipitation triggering landslides and debris flows is 272.7 mm in two days, while the rainfall amount and intensity recorded in this area have a return period of about 20 years. 878 new landslides in the study area of 340 km<sup>2</sup> are identified by interpretation of SPOT images. To understand the impact of the Wenchuan earthquake on the landslide occurrence due to subsequent heavy rainfall, this study mainly focuses on the variations in the the density of coseismic landslides and following rainfall-induced landslides through aerial photographs and SPOT images. Comparison of aerial photographs taken on 18 May, 2008 (after the “5·12” Wenchuan earthquake) and SPOT images taken on 14 October, 2008 (after “9·24” rainstorm event) indicates that the landslide number in the study area increases by 42%, while landslide area increases by 46.6%, which shows the great impact of the heavy rainfall after the earthquake on the development and activity of landslides in the study area. The above study results also show that the Wenchuan earthquake affected area is particularly susceptible to landslides and debris flow occurrence after extreme rainfall events.

**Key words:** Wenchuan earthquake; landslide activity; remote sensing image; heavy rainfall; interpretation.

## 0 引言

地震是诱发滑坡次生灾害的动力成因之一,每当强烈地震发生后,斜坡产生变形破坏,导致大面积滑坡和地裂缝,后者又孕育形成新的滑坡(Lin *et al.*, 2003; Chen and Hawkins, 2009). 因此,强地震作用将长期影响着斜坡的稳定性,特别是在雨季,滑坡连绵不断,泥石流转为旺盛. 1999 年台湾大地震后,台风导致大范围强降雨过程,使脆弱的山地环境更加恶化,暴雨诱发的滑坡面积可达地震直接诱发滑坡面积的 3 倍(Lin *et al.*, 2006),说明强震区降雨将会诱发更大范围的滑坡灾害. 在地震高烈度区,泥石流活动更强烈,泥石流发生的降雨临界值仅为集集地震前的 1/3,使泥石流活动更加频繁(Lin *et al.*, 2006; Chen and Hawkins, 2009). 1995 年 1 月 17 日日本神户地震后的 5~10 月,降雨亦诱发了大量小规模滑坡.

目前对地震滑坡的研究主要集中于同发型地震滑坡的识别和特征研究(MahdaviFar *et al.*, 2006; García-Rodríguez *et al.*, 2008; Kamp *et al.*, 2008),对震后降雨诱发滑坡活动特征的动态分析较少. 汶川地震诱发了 1.5 万处滑坡(Yin *et al.*, 2009),震后的 9 月 23—24 日(简称“9·24”)在北川地区高烈度区遭遇最大一次强降雨过程,降雨量达 250~350 mm,导致地震滑坡进一步活动,并产生了大量新滑坡,特别是暴雨诱发了群发性泥石流灾害,造成 42 人死亡(Tang *et al.*, 2009). 汶川震区为深入研究强震后降雨滑坡的活动变化特征提供了典型事例. 本文在汶川地震高烈度区选择了 3 个典型研究区,利用高分辨率遥感图像,对“9·24”暴雨前后滑坡活动与规模进行了定量分析,为进一步认识地震高烈度区暴雨滑坡泥石流活动强度和频率提供依据,也为汶川震区恢复重建中的减灾防灾提供决策参考.

## 1 研究区概况

研究区位于汶川地震Ⅺ高烈度区的北川县湔江河谷地带(图 1),选择的 3 处典型的地震滑坡发育地段分别是唐家山—北川县城片区、陈家坝片区和擂鼓镇片区,其面积分别为 60、50、40 km<sup>2</sup>. 图 1 是研究区的位置,地震烈度图由国家地震现场应急队完成. 这些研究区紧邻北川断层,该断裂是“5·12”

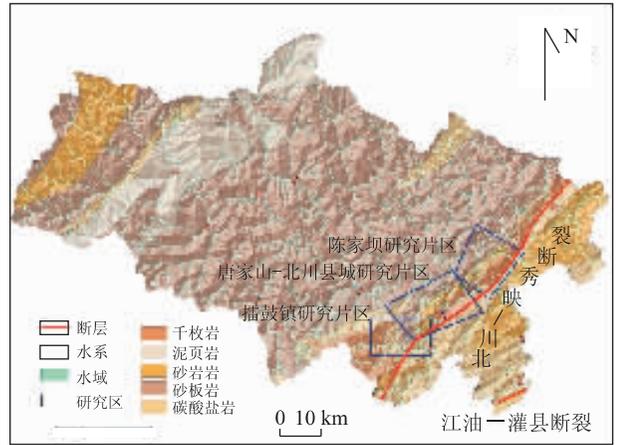


图 1 研究区位置与地质图

Fig. 1 Geological map and location of the study areas

汶川地震的发震断裂,为龙门山断褶带的主中央断裂. 该断裂在研究区的北川县沿擂鼓一曲山—陈家坝延伸,倾向北西,倾角 60°~70°,为寒武系的砂板岩逆冲于志留系、泥盆系乃至石炭系之上,切割深度较大,垂直断距达千米以上. 研究区出露的地层岩性主要为志留系茂县群的千枚岩、板岩和寒武系清平组的砂板岩、泥灰岩. 该类岩石风化强烈,节理裂隙发育.

研究区属山间河谷地貌,切割较深,山地海拔一般 700~1 500 m. 由于河流侵蚀下切,岸坡多为 25°~45°的斜坡,山体前部地形较为平缓,多为当地居民区. 该区又属著名的鹿头山暴雨区,雨量充沛,年均降雨量为 1 399.1 mm,年最大降雨量 2 340 mm (1967 年),日最大降雨量 301 mm,小时最大降雨量 78 mm. 降雨集中在 6~9 月,占全年降雨量 74%,最大占 90%(1981 年). 湔江是研究区的主干河流,系涪江流域一级支流,从研究区的北部边缘穿流而过. 湔江在北川县境全长 47.9 km,流域面积为 455.80 km<sup>2</sup>,天然落差为 203 m,平均坡降为 4.2‰. 湔江河多年平均径流量 102.7 m<sup>3</sup>/s,“5·12”地震前湔江年平均输沙量(400~500)×10<sup>4</sup> t,流域内年平均侵蚀模数达 7 072.61 t/km.

根据四川省地质工程勘察院完成的“北川县地质灾害调查与区划”,汶川地震前研究区发育较大规模的滑坡主要有 2 处,即县城曲山镇王家岩滑坡和擂鼓镇大坪地滑坡,其滑坡均出现明显变形迹象,坡体后缘出现地面开裂,不连续裂缝宽为 10~20 cm,最长超过 20 m,由于农耕垦植,其拉裂缝早已被堵塞. 利用 2007 年 1 月获取的全色 2.5 m 分辨率的

IRS-P5 遥感数据进行解译,无法识别上述处于变形的滑坡体,仅发现在岷江及其支流沟谷两侧分布有零星小规模滑塌现象。

“5·12”汶川大地震导致北川县城建筑物全毁,死亡 16 000 多人,其中因滑坡直接导致死亡 2 500 多人。县城周边山体发生大面积山体滑坡灾难,例如王家岩滑坡、新北川中学崩滑体,以及县城以北 4 km 处的唐家山滑坡与堰塞湖。2008 年 9 月 24 日北川县遭遇了汶川地震后的最大一场强降雨过程,导致北川县城西侧山地的 8 条沟暴发泥石流过程。根据设在唐家山自动雨量站的记录,9 月 23 日降雨量为 173.8 mm,9 月 24 日凌晨 0:00—5:00 雨量为 57.9 mm,激发群发性滑坡和泥石流发生的雨量出现在 5:00—6:00,其激发雨量达到 41 mm(Tang *et al.*, 2009)。

## 2 数据来源与数据处理

用于分析“5·12”汶川地震后及“9·24”暴雨后滑坡发育与活动特征的高分辨遥感数据包括震后 2008 年 5 月 18 日空军司令部、国土资源航空物探遥感中心获取的 0.3 m 左右的高分辨率光学影像,以及“9·24”暴雨泥石流发生后 2008 年 10 月 14 日获取的 2.5 m 分辨率的 SPOT 5 全色影像。所获取的两期影像云层活动较少,数据质量较好。其他辅助数据还有 1:5 万基础地理数据,1:10 万量化的地质图。此外,国土资源部门地勘单位对研究区进行了地质灾害隐患点的应急排查,并开展重点地质灾害应急勘察工作,这些数据资料也为本研究提供了重要参考。

根据不同影像传感器特点对遥感数据进行预处理,包括图像增色、几何纠正和图像镶嵌,并进行两期影像精确配准。在此基础上开展“5·12”地震滑坡和“9·24”暴雨滑坡数量与范围的信息提取工作。两期高分辨率遥感影像能够识别不同类型滑坡特征,对分布于支沟流域上游坡面的长度为数米的小型浅层滑坡,可以从影像上辨别出来。通过对典型区滑坡特征的野外调查,建立滑坡解译标志,在此基础上采用人机交互的方式进行解译,提取不同类型滑坡体及其他典型物源信息。对于 0.3 m 分辨率的航空影像可以识别长度大于 5 m 的浅层滑坡体,特别产生较大变形下滑后,在图像上能够清晰识别;但对于后缘产生裂隙的潜在不稳定斜坡,不能够从图像上识

别其特征。从 2.5 m 的分辨率的 SPOT 5 影像可以清晰识别长度大于 20 m、宽度大于 5 m 的滑坡体,当然最小滑坡的识别与其他物体的遮盖及与背景反差等都有关系。以上最小估计作为整个解译滑坡体规模的一个下界。由于“9·24”暴雨后,坡面被径流侵蚀或产生滑塌的痕迹新鲜,从图像上极容易识别。但是对于较小面积的滑坡群,由于滑坡两侧紧紧相连,形成滑坡的复合体,在图像上很难圈出单体滑坡,仅能从滑坡后缘识别其可能滑坡的单体。

## 3 地震诱发滑坡特征的遥感解译与分析

所选择的 3 个典型研究区均是“5·12”地震滑坡高敏感区,包括灾难性的大型滑坡灾害,例如唐家山滑坡、王家岩滑坡和新北川中学滑坡。“9·24”暴雨诱发的大型魏家沟泥石流灾害及岷江沿岸泥石流集中活动区也位于研究区内。本文采用地震后拍摄的航空航空图像对研究区的滑坡进行识别和范围圈定。该航片波段范围为 0.38~0.76  $\mu\text{m}$ ,包括整个可见光波段,地面分辨率为 0.5 m,包括可见光的红、绿、蓝 3 个波段。在 ERDAS 软件中,利用图像剖面工具可以得到在红、绿、蓝 3 个波段上土体、水体、植被的反射值;土体的反射值大于水体的反射值和植被的反射值,所以在彩色航空图像上土体色彩比较明亮;水体的反射值比植被的反射值大,所以水体色彩比植被色彩亮。由于地震诱发的滑坡主要由土体构成,所以在彩色航空图像上,滑坡的反射值大,色彩很亮。在该彩色航空图像上,滑坡的遥感解译最重要的标志是滑坡的形态、结构特征。其图像识别标准包括:(1)滑坡的后壁呈围椅状,滑坡体与其周围不动体在平面上的分界线明显,可以很容易圈定滑坡的范围;(2)因滑坡体上下各段滑动速度的差异,在其上部常形成宽大平缓的台地;(3)滑坡体前部形状如舌状伸入沟壑或河道中,即可以很清楚看到滑舌。由于地震诱发的滑坡多发生强烈变形破坏,因此在航空图像上特征非常明显。大中型单体滑坡表现为圈椅状地形、滑坡后壁和滑坡台阶等,对于数量最多的小型滑坡,多呈群状分布,形成滑坡复合体,其表层多下滑或悬挂于斜坡上,滑坡体岩土裸露,草本植被稀少。对滑坡面积信息的提取是在 ArcGIS 平台中完成的,具体步骤如下:(1)打开滑坡解译图层,令其处于编辑状态;(2)新建滑坡面积字段 area;(3)点击 Field 下拉菜单 calculate,出现其对话框;选择

表 1 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感解译结果

Table 1 Interpretation results of landslide activity in high seismic intensity areas of the Wenchuan earthquake using remote sensing images

滑坡面积分段(m <sup>2</sup> )	唐家山—北川县城研究片区				陈家坝研究片区				擂鼓镇研究片区			
	“5·12”地震诱发滑坡		“9·24”暴雨诱发滑坡		“5·12”地震诱发滑坡		“9·24”暴雨诱发滑坡		“5·12”地震诱发滑坡		“9·24”暴雨诱发滑坡	
	个数	面积(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )										
<1 000	35	2.0	10	0.5	119	7.6	70	4.7	10	0.6	5	0.4
1 000~2 000	54	7.6	29	4.7	114	16.5	125	18.4	19	2.8	24	3.8
2 000~5 000	56	19.5	65	22.1	148	47.5	151	48.6	56	19.5	41	12.7
5 000~10 000	69	50.9	58	40.7	92	64.9	66	46.9	55	39.4	29	19.8
10 000~20 000	73	104.5	41	55.6	54	73.9	31	45.9	34	50.8	7	8.9
20 000~50 000	66	208.3	25	66.7	30	89.8	33	101.7	36	124.4	0	0.0
>50 000	60	717.3	3	19.2	20	265.5	10	95.7	14	168.8	0	0.0
合计	413	1 110.1	231	209.5	577	565.8	486	361.9	224	406.4	106	45.7

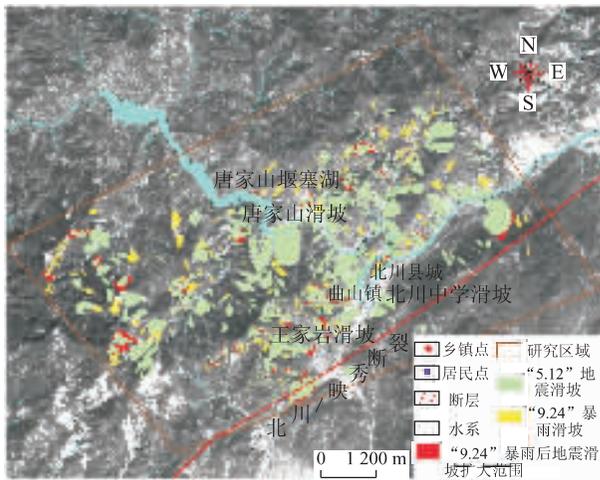


图 2 唐家山—北川县城研究区滑坡遥感解译结果

Fig. 2 Interpretation results of landslides identified on the aerial photographs and SPOT 5 image in study area of Tangjianshan-Beichuan city

Fields, 并输入计算公式  $area = [shape]$ , 然后点击 Return area, 即完成计算。

根据航空遥感解译和滑坡面积计算, 研究区滑坡主要分布在岷江右岸坡面, 在 3 个典型区 150 km<sup>2</sup> 范围内, 共解译出大小滑坡 1 214 处, 滑坡面积达  $2 082.3 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, 其中唐家山滑坡规模最大, 其平面面积  $66.4 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, 体积约为  $20.5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, 形成的堰塞体长 800 m、宽 611 m、高 92~124 m。

唐家山—北川县城片区共解译出地震诱发滑坡 413 处, 滑坡总面积  $1 110.1 \times 10^4$  m<sup>2</sup>。“5·12”地震诱发的大型滑坡是该片区的重要特点。根据解译统计, 单体滑坡面积  $>50 000$  m<sup>2</sup> 有 60 处, 尽管滑坡数量仅占总数的 14.5%, 而滑坡面积可达  $717.3 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, 占该片区地震滑坡总面积的 64.6% (表 1)。

陈家坝片区“5·12”地震诱发了 577 处以小规模为主的滑坡, 滑坡面积  $565.8 \times 10^4$  m<sup>2</sup>。擂鼓镇片区地震诱发的 224 处滑坡中, 近一半滑坡面积在 2 000~10 000 m<sup>2</sup> 之间; 但是该片区大型地震滑坡亦较发育, 分布有 14 处面积  $>50 000$  m<sup>2</sup> 单体滑坡, 解译的滑坡面积有  $168.8 \times 10^4$  m<sup>2</sup>, 占该片区滑坡总面积的 41.5% (表 1)。图 2、图 3 和图 4 是基于震后航空图像解译的滑坡分布特征。绿色图斑为地震直接诱发的滑坡, 黄色图斑为“9·24”暴雨诱发的滑坡, 红色为地震滑坡继续活动扩大的范围。图幅背景为 2008 年 10 月 14 日获取的 2.5 m 分辨率全色 SPOT 5 影像。图 2 清晰地标出“5·12”地震导致的唐家山滑坡及堰塞湖、王家岩滑坡和新北川中学滑坡的空间位置。

研究区的地震滑坡分布明显受地质环境的控制, 绝大多数滑坡集中分布在北川—映秀发震断层的上盘, 这种逆冲断层上、下盘效应现象已有多人进行了分析 (Huang and Li, 2009)。地震滑坡分布规律是沿河流呈“线状分布”, 特别是沿岷江河谷两岸的主要支流分布。地形地貌特点亦对地震滑坡发生位置有一定控制作用。根据 1/5 万 DEM 生成的坡度图与滑坡位置叠加分析发现多数滑坡集中发生在地形坡度  $30^\circ \sim 45^\circ$  之间; 其中坡形由缓变陡的过渡转折部位是滑坡密集发育带。根据对 3 个典型区地震滑坡分布与岩石类型对比, 唐家山—北川县城研究片区和陈家坝研究片区滑坡多发生在砂板岩、砂岩和千枚岩分布区; 在擂鼓镇研究片区滑坡主要发育在泥页岩和千枚岩中。滑坡的分布与地质条件有一定分布规律, 滑坡多发生在软岩分布区, 比如千枚岩、碳酸盐岩。这类岩石易风化、较易破碎, 特别是在

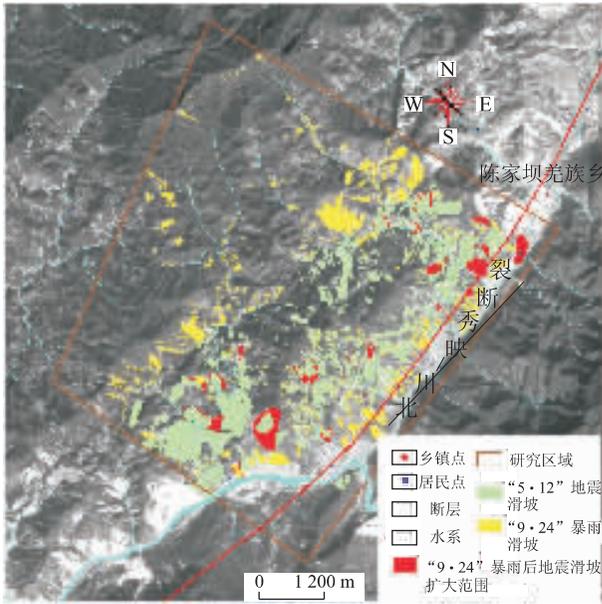


图 3 陈家坝研究区滑坡遥感解译结果

Fig. 3 Interpretation results of landslides identified on the aerial photographs and SPOT 5 image in the Chenjiaba area

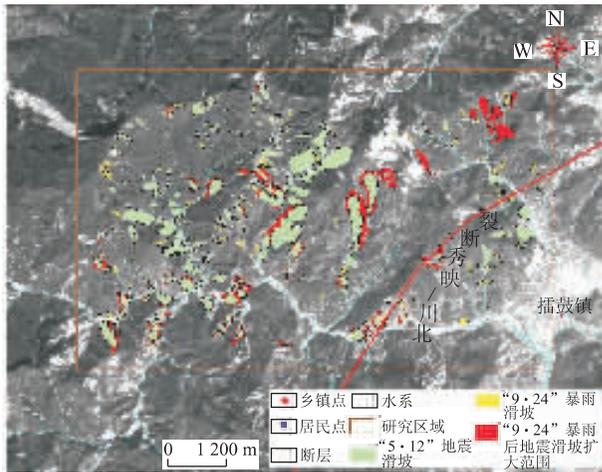


图 4 擂鼓镇研究区滑坡遥感解译结果

Fig. 4 Interpretation results of landslides identified on the aerial photographs and SPOT 5 image in the Leiguzhen area

强烈地震的作用下,变得更加松动、不稳定,是滑坡灾害多发区。3个研究区的地质环境条件较为相似,因此地震诱发的滑坡规模也很类似,其中以大型灾难性滑坡最为典型。大量的地震滑坡也为泥石流的暴发提供了极其丰富的物源,在一定的降雨条件下,发生泥石流的潜在危险性很大。

#### 4 暴雨诱发滑坡活动的遥感解译和分析

在汶川地震高烈度区,“9·24”暴雨诱发了群发性滑坡和泥石流。为了进一步认识汶川地震高烈度区在震后暴雨作用下滑坡发育和活动特征,本研究利用 2008 年 10 月 14 日获取的 SPOT 5 遥感图像,对高烈度区的 3 个典型研究区的暴雨滑坡数量和规模进行了遥感解译。该数据为 HRG 的全色影像,波段范围为  $0.49\sim 0.69\ \mu\text{m}$ ,即从绿色到可见光波段,地面分辨率 2.5 m。SPOT 5 全色影像识别标准主要是从其色调特征、空间特征和纹理特征进行分析判读。由于在 SPOT 5 全色波段范围内,土体的反射系数大于水体的反射系数和植被的反射系数,所以在影像上往往土体呈亮色调。汶川地震诱发的滑坡体新鲜,植被少,在全色影像上,滑坡的反射系数大,呈亮色调,图像上表现为白色调。滑坡的遥感解除了通过遥感图像的色调以外,还包括对上述的滑坡形态、结构特征的图像解译标志。利用纹理特征识别滑坡效果不明显,但它可以辅助滑坡空间特征遥感解译。

分析结果表明,唐家山—北川县城片区“9·24”暴雨后新增滑坡 231 处,在地震诱发滑坡数量基础上增加了 56%。暴雨滑坡以中小型滑坡为主;其滑坡面积主要集中在  $2\ 000\sim 20\ 000\ \text{m}^2$ ,占总数的 71%;解译的新增滑坡的总面积为  $209.5\times 10^4\ \text{m}^2$ ,仅占地震滑坡面积( $1\ 110.1\times 10^4\ \text{m}^2$ )的 18.9%(表 1)。两期遥感图像对比解译发现 25 处滑坡有复活扩大现象,滑坡范围明显扩大,出现在地震滑坡体的后缘及两侧部位。统计表明该片区滑坡扩大的面积是  $76\times 10^4\ \text{m}^2$ (图 2)。根据遥感解译,陈家坝片区“9·24”暴雨诱发滑坡数量可达 486 处,在地震滑坡(577 处)的基础上新增 84%;滑坡面积新增  $361.9\times 10^4\ \text{m}^2$ ,以小型滑坡为主。该片区复活性滑坡有 17 处,滑坡面积扩大  $153.6\times 10^4\ \text{m}^2$ 。两者合计表明“9·24”暴雨诱发滑坡活动的面积可达  $515.5\times 10^4\ \text{m}^2$ ,已接近地震直接诱发滑坡的总面积(表 1,图 3)。擂鼓镇片区“9·24”暴雨导致 74 处滑坡继续活动,滑坡面积扩大  $122.7\times 10^4\ \text{m}^2$ ,是地震直接诱发面积的( $406.4\times 10^4\ \text{m}^2$ )的 30%;暴雨后新增滑坡 106 处,其面积仅为  $45.7\times 10^4\ \text{m}^2$ ,以小规模滑坡为主(表 1,图 4)。

综上所述,3 个典型研究区由“9·24”暴雨诱发滑坡可达 823 处,为地震直接诱发滑坡(1 214 处)的

68%；新增滑坡面积  $617.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑坡扩大面积  $352.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，暴雨滑坡活动面积在地震诱发滑坡面积的基础上增加了 46.6%。这些暴雨诱发的滑坡以小型滑坡为主，集中分布在单体滑坡面积  $<10\,000 \text{ m}^2$  范围，占新增滑坡总数的 82%。分析结果表明，这些强降雨对大中型地震滑坡继续活动亦存在直接影响。研究区有 116 处地震滑坡的面积明显扩大，其扩大的部位主要在原滑坡后缘及两侧；现场复核结果表明，除少数滑坡有整体继续滑动特征外，多数滑坡的范围扩大主要是原滑坡后壁及侧缘上方残留块体的继续滑塌。“9·24”暴雨诱发新滑坡和导致的地震滑坡继续活动主要分布在岷江一级支流沟道两岸及上游源区，所提供的松散物质为该区域的泥石流强烈活动提供了重要的条件 (Yin *et al.*, 2009)。例如，北川县城西山坡沟和唐家山滑坡源地两侧均暴发了大规模的泥石流，对北川县城地震遗址保护及唐家山堰塞湖的泄洪带来了严重危害。

## 5 解译结果验证

本解译结果可能出现一定误差，主要表现在：

(1) 由于表层水流侵蚀产生的新鲜坡面和浅层滑坡活动导致植被剥蚀的坡面在影像上非常相似，可能造成识别上的错误；(2) 尽管研究区的滑坡以活动强烈为主，但是对于后壁分布有裂隙而没有产生明显位移的潜在滑坡较难识别；(3) 两期遥感影像的分辨率，不同带来的一定解译误差。

为了分析这种可能的误差，本研究选择北川县城西侧斜坡及魏家沟流域作为解译结果验证典型区。验证数据主要来源于现场调查和实测工作，部分数据来源于 2009 年 7 月由四川省地质工程勘察院完成的《北川县西山坡滑坡群(泥石流)应急勘察报告》，最终确定了 27 处单体滑坡作为验证数据。现场调查与解译结果对比表明，6 处滑坡面积误差在 3% 以内；13 处滑坡面积误差在 3%~10%；5 处滑坡面积误差在 10%~20%；仅 3 处面积小于  $2\,000 \text{ m}^2$  的滑坡属误判(表 2)。在该区域现场验证还发现漏判滑坡 4 处，主要是面积为  $5\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^2$  的潜在滑坡体，这些滑坡后缘发育有不连续的扩张裂缝，两侧裂隙不明显，已有局部变形，垂直位移  $10 \sim 50 \text{ cm}$ ，水平位移亦有  $50 \sim 100 \text{ cm}$ ，这些特征信息从遥感图像获取有一定困难。

表 2 遥感解译结果与现场调查对比验证

Table 2 Comparison and verification for the results of RS interpretation and site investigation

滑坡编号	现场调查 (m <sup>2</sup> )	遥感解译 (m <sup>2</sup> )	误差 (m <sup>2</sup> )	误差百分比 (%)
1	450	512	62	12.1
2	456	550	94	17.1
3	480	475	-5	-1.0
4	500	547	47	8.5
5	558	562	4	0.8
6	600	581	-19	-3.2
7	700	679	-21	-3.1
8	750	824	74	9.0
9	875	858	-17	-2.0
10	900	901	1	0.1
11	1 000	1 027	27	2.6
12	1 166	1 056	-110	-10.4
13	1 200	1 354	154	11.4
14	1 300	1 382	82	6.0
15	1 350	1 411	61	4.3
16	1 550	1 468	-82	-5.6
17	1 800	2 101	301	14.3
18	2 475	2 273	-202	-8.9
19	3 380	3 752	372	9.9
20	3 900	4 233	333	7.9
21	5 250	5 749	499	8.7
22	5 600	5 988	388	6.5
23	6 776	7 321	545	7.4
24	8 500	8 478	-22	-0.3
25	11 900	10 946	-954	-8.7
26	12 000	24 522	12 522	51.1
27	14 300	32 516	18 216	56.0

由于研究区为汶川地震高烈度区，在强震和暴雨作用下，绝大多数滑坡均发生了强烈变形破坏，在高分辨率遥感图像上极易识别和界定滑坡周界，因此利用高分辨率遥感图像可以较为准确地完成指定区域的滑坡制图。对典型区滑坡的验证与对比表明，解译结果与现场调查的滑坡特征有很好的拟合性，能够反映研究区滑坡发育和活动特征。

## 6 结论

本文选择了汶川地震高烈度区的 3 个典型片区共  $150 \text{ km}^2$  范围，重点开展“9·24”暴雨发生前后滑坡活动的遥感动态分析。利用高精度光学航空影像对“5·12”汶川地震高烈度区的地震诱发滑坡进行了解译和分析；在这基础上，针对震后最大的一次降雨过程诱发新的滑坡，又利用高分辨率 SPOT 5 影像进行了二次解译和二期动态变化对比，进一步认

识汶川大地震后斜坡稳定性及滑坡发育演化规律。根据汶川地震后的 2008 年 5 月 18 日的高精度航空图像对典型区滑坡分布解译表明,高烈度区是滑坡发育的敏感区,地震诱发了大量不同规模的滑坡,这些滑坡分布在逆冲断层的上盘,临近发震断层;坡体的地形地貌特点和强烈风化的岩土体是地震滑坡发育的基础条件。根据“9·24”暴雨后的 SPOT 5 遥感影像对滑坡活动特征解译表明,在高烈度区地质环境十分脆弱,在暴雨作用下极易产生群发性滑坡和泥石流过程,并导致地震滑坡的继续活动。遥感定量分析表明暴雨诱发了新滑坡 823 处,是地震直接诱发滑坡(1 214 处)的 68%;新增滑坡面积共  $617.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑坡扩大面积为  $352.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,暴雨滑坡活动面积在地震诱发滑坡面积的基础上增加了 46.6%。暴雨诱发的滑坡以小型为主,集中分布在单体滑坡面积  $< 10\,000 \text{ m}^2$  范围,强降雨过程导致地震滑坡的强烈活动,116 处地震滑坡面积明显扩大。上述研究结果表明高烈度区的斜坡在暴雨过程中将会导致更大范围和更多数量的滑坡发生,其活动强度和频率明显提高。因此,在汶川地震高烈度区应强化地质灾害减灾工作,在恢复重建中应开展地质灾害危险性评估、监测预警和工程控制措施,最大限度降低强震区的次生山地灾害。

## References

Chen, H., Hawkins, A. B., 2009. Relationship between earthquake disturbance, tropical rainstorms and debris movement; an overview from Taiwan. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 68(2): 161–186. doi:10.1007/s10064-009-0209-y

García-Rodríguez, M. J., Malpica, J. A., Benito, B., et al.,

2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*, 95(3–4): 172–191. doi:10.1016/j.geomorph.2007.06.001

Huang, R. Q., Li, W. L., 2009. Development and distribution of geohazards triggered by the “5·12” Wenchuan earthquake in China. *Science in China (Ser. E)*, 52(4): 810–819. doi:10.1007/s11431-009-0117-1

Kamp, U., Growley, B. J., Khattak, G. A., et al., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology*, 101(4): 631–642. doi:10.1016/j.geomorph.2008.03.003

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.enggeo.2006.02.010

Lin, C. W., Shieh, C. L., Yuan, B. D., et al., 2003. 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

MahdaviFar, M. R., Solaymani, S., Jafari, M. K., 2006. Landslides triggered by the Avaj, Iran earthquake of June 22, 2002. *Engineering Geology*, 86(2–3): 166–182.

Tang, C., Zhu, J., Li, W. L., et al., 2009. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 68(2): 187–194. doi:10.1007/s10064-009-0201-6

Yin, Y. P., Wang, F. W., Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6(2): 139–152. doi:10.1007/s10346-009-0148-5