

doi: 10.6046/gtzyyg.2014.04.28

引用格式:魏永明,魏显虎,陈玉.岷江流域映秀—茂县段地震次生地质灾害分布规律及发展趋势分析[J].国土资源遥感,2014,26(4):179-186.(Wei Y M, Wei X H, Chen Y. Analysis of distribution regularity and development tendency of earthquake secondary geohazards in Yingxiu - Maoxian section along the Minjiang River[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 179 - 186.)

## 岷江流域映秀—茂县段地震次生地质灾害 分布规律及发展趋势分析

魏永明, 魏显虎, 陈 玉

(中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

**摘要:** 2008 年汶川大地震引发了岷江流域映秀—茂县段极为严重的地震次生地质灾害。利用震后多期高分辨率航空遥感数据并结合解译标志,快速、准确地分析研究区灾害的分布规律及发展趋势,对科学指导灾后重建具有重要意义。次生地质灾害分布规律主要表现为:①滑坡、崩塌及其过渡类型——崩滑为主要的次生地质灾害类型(占 90% 以上);②次生地质灾害广泛分布在岷江两岸山坡,但在映秀—汶川段的发育程度和规模比汶川—茂县段大得多。研究区次生地质灾害发展趋势分析结果表明:①地震形成的滑坡体趋于稳定,但解译的 21 个潜在滑坡体中部分已出现活动迹象,其中斗簇和彻底关 2 个潜在滑坡群更为明显,应对其进行遥感连续动态监测;②泥石流为研究区今后最主要的灾害类型,其中映秀—汶川段为最主要的发生地段。

**关键词:** 汶川大地震;地震次生地质灾害;航空遥感;分布规律;发展趋势分析

**中图分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2014)04-0179-08

### 0 引言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川省汶川县映秀镇(E103.4°,N31.0°)发生里氏 8.0 级强烈地震。这次地震是龙门山断裂带中段最新活动的强烈体现<sup>[1-6]</sup>。由于汶川大地震发生在中、高山地区,因而诱发了大量的崩塌、滑坡等地质灾害。据估计,地震诱发的地质灾害点有 3~4 万处,分布在沿龙门山断裂带的四川省境内 50 个县(市)和甘肃、陕西省的部分地区,受灾面积达 44 万 km<sup>2</sup><sup>[7-11]</sup>。其中,汶川县、茂县、北川县及青川县地震引起的次生地质灾害最为严重。本次地震诱发了大量的大(巨)型滑坡,如北川县唐家山滑坡、青川县东河口滑坡、绵竹市清平乡文家沟滑坡和安县大光包滑坡等,其中安县大光包滑坡是我国乃至世界目前发生的最大地震滑坡,分布面积约为 7.12 km<sup>2</sup>,估算体积达 74 200 万 m<sup>3</sup>。

岷江流域映秀—茂县段虽然没有出现巨型滑坡,但因距震中很近,且龙门山断裂带中段的后山断裂(汶川—茂县活动断裂)造成的陡峭山坡为崩塌、

滑坡等次生地质灾害的发生提供了有利的地形条件。因此,汶川大地震也在映秀—茂县段岷江及其支流两岸的山坡上形成许多滑坡、崩塌及崩滑体,造成多处公路被阻断、河道被堵塞或局部堵塞,对流域内人民群众的生命财产和重大工程等构成了巨大威胁。此外,大地震形成的 21 个潜在滑坡体及震后 5 a 来在该流域多次发生的泥石流对灾后重建都是潜在威胁。因此,利用遥感新技术对快速、准确查明汶川大地震诱发的次生地质灾害的分布规律及其发展趋势具有非常重要的意义。

遥感数据具有信息量大、覆盖面积宽、分辨率高及获取速度快等优势,尤其是航空遥感数据的空间分辨率已达到 dm 级,非常适用于大型震灾造成的次生地质灾害的快速调查及动态监测。中国科学院遥感与数字地球研究所自 2008 年汶川大地震后至今,2012 年除外每年都进行地震灾区的航空遥感飞行,以连续动态监测灾区地质灾害发展趋势、城镇建设及生态环境恢复等状况。每次航空飞行都覆盖了作为重灾区之一的汶川和茂县等范围。因此,利用 2008—2011 年及 2013 年这 5 期高分辨率航空遥感数据所得到的地质灾害解译结果并结合实地考察验

收稿日期:2013-08-12;修订日期:2013-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目“核电等大型工程稳定性遥感评价模型研究”(编号:41240012)资助。

证,可对岷江流域映秀—茂县段地震次生地质灾害分布规律及发展趋势进行快速、准确分析,对有活动迹象的潜在滑坡体进行连续动态监测,以期为当地政府救灾、防灾部门对崩塌、滑坡、泥石流的预测、预警及灾后重建提供科学依据。

## 1 遥感数据源与研究方法

### 1.1 航空遥感数据源

本文选择汶川大地震重灾区之一的岷江流域映秀—茂县地区为研究区。所使用的遥感数据为2008—2011年间及2013年共5期获取的覆盖研究区的航空遥感数据。每一期的航空遥感数据均包括可见光的红、绿、蓝3个波段,分辨率均优于0.5~0.6 m。其中,2008年震后的航空遥感数据经过基于高程平面的正射处理,2010年的数据经过辐射校正,2009年、2011年和2013年的数据则全部为正射纠正产品。用于地质灾害解译及动态监测的航空遥感数据经过重采样,使用数据分辨率优于2~4 m。2008年航空遥感数据用于地震次生地质灾害的详细解译和分布规律分析,其余年份的数据则用于次生地质灾害动态变化的连续监测。航空遥感数据相关情况见表1。

表1 本文使用的航空遥感数据

Tab.1 Airborne remote sensing data used in this paper

获取时间	传感器	获取数据分辨率/m	使用数据分辨率/m	产品等级	用途
20080516	ADS40	0.5~0.6	2	伪正射产品	地质灾害解译
20090516— 20090603	ADS80	0.5	2	正射产品	震后地质灾害动态监测
20100418— 20100504	UCXp	0.3	2	辐射校正产品	震后地质灾害动态监测
20110517— 20110607	UCXp	0.3	4	正射产品	震后地质灾害动态监测
20130504	ADS8+ ALS70	0.5	2	正射产品	震后地质灾害动态监测

### 1.2 研究方法

首先建立崩塌、滑坡及泥石流等次生地质灾害的遥感解译标志,对2008—2011年及2013年获取的研究区航空遥感图像进行地震地质灾害的详细解译;然后以2008年的次生地质灾害解译结果为基础,对2008年汶川大地震后岷江流域映秀—茂县段的次生地质灾害分布规律进行详细分析;最后利用2009年以后逐年的地质灾害解译结果对潜在的和已发生的滑坡体进行动态监测及活动迹象分析,对泥石流灾害的发展趋势进行预测;通过野外验证,

确定研究区次生地质灾害发展趋势。

## 2 研究区地震次生地质灾害

2008年汶川大地震引发的各种次生地质灾害在高分辨率航空遥感图像中显示得比较清晰。由于次生地质灾害形成时间很短,在色调上均较周围地物浅;不同地质灾害发生的空间部位明显不同,堆积体或滑动体的形态也有很大差异,因而形态特征是区别不同类型次生地质灾害的重要标志。利用崩塌、滑坡、崩滑及泥石流等不同地质灾害的形态特征和色调差异等遥感解译标志<sup>[12-17]</sup>,可准确地解译出这些次生地质灾害的空间位置及规模大小,进而分析其分布规律。对于不同的次生地质灾害,其色调(光谱)特征和形态特征的作用可能会各有侧重。

### 2.1 形成过程与影像特征

岷江流域映秀—茂县段崩塌、滑坡、崩滑、碎屑流及泥石流等次生地质灾害的形成过程与影像特征简述如下:

1)崩塌。由于重力作用造成岩块或土体从较高处坠落到坡脚或山坡较平坦处堆积成的倒石堆,一般在国道侧面上坡的凌空山坡面(坡度大于40°)或陡直的岷江岸坡上容易形成崩塌。由于崩塌的堆积形态比较特殊,堆积位置又在岷江或支流坡脚或国道上,因而崩塌在高分辨率航空遥感图像中可通过形态特征及地貌部位较容易地被识别。当然,崩塌发生后,陡立而粗糙的崩塌后壁的色调较周围地物浅,这也可作为崩塌发生的一个标志。

2)滑坡。滑坡发生在具有一定滑动条件的斜坡上,具有明显的滑坡边界特征、滑坡后壁特征和滑坡体内部的形态特征。滑坡边界一般呈簸箕形,在航空图像中比较清楚;滑坡后壁一般呈围椅状且较陡立;滑坡体下方由于土体挤压,往往可见高低不平的地貌,可在低洼处形成封闭洼地;滑坡体前缘常常堵塞河道,致使河流向外凸出而有显著的舌状地貌特征。因此,滑坡在高分辨率遥感图像中可通过滑坡边界、滑坡后壁及滑坡体前缘等典型的形态特征来识别。此外,新形成的滑坡较周围地物色调浅,具有明显的界限,色调差异也是识别新滑坡的标志之一。

3)崩滑。指滑坡与崩塌之间的过渡类型,为研究区内最主要的地震次生地质灾害。由于映秀—茂县段岷江两岸的最主要岩性为花岗岩,花岗岩的2组垂直节理很发育,致使岷江两侧山体陡峭,特别是靠近河床的山体下部比山坡上部陡峭得多;在山坡中部,坡度有一个转折点,转折点之上的相对缓坡表

层土较薄(一般不超过1~2 m),在强烈地震作用下表层部分首先形成滑坡。滑坡整体沿早期形成的浅沟槽向坡下滑动,留下滑坡后壁和不规则的凹型滑动(一般为葫芦形的上半部分);当滑动至转折点时,如遇其下是陡坡就变成崩塌,将滑体堆在坡脚下或山坡较低处的较平坦位置,形成典型的倒石堆。在遥感图像中,根据滑坡后壁和不规则的凹型滑动以及倒石堆等形态特征可快速识别崩滑。当然,在转折点处也可仍沿固定沟槽继续向山坡下快速滑动,快到坡脚或山坡较低处时迅速散开而快速堆积,在岸坡坡脚或山坡较低处的平坦位置(如国道)堆积成倒石堆。在遥感图像中,这种崩滑体具有明显的完整葫芦形滑动面且色调很浅,加之崩滑体的堆积形态——倒石堆,非常容易识别。

此外,在岷江及其支流的各级阶地陡坎面的表层土也容易形成崩滑体,几乎整个表层土全部被剥离而使崩滑体显示较浅色调,容易识别。崩滑体在映秀—汶川段分布很广泛。图1为太平驿北约800 m处岷江东岸山坡汶川大地震沿固定沟槽形成的崩滑体(A)和在山坡中部坡度转折点处向坡脚直接形成崩塌体(B)的分布情况。在遥感图像中,崩滑体的葫芦形态清晰,在坡脚处或山坡平缓处堆积的倒石堆也容易识别。此外,岸坡表层土形成的崩滑体(C)也能在此处看到。



A: 有固定沟槽的崩滑体; B: 无固定沟槽的崩滑体; C: 岸坡崩滑

图1 太平驿北800 m处岷江东山坡崩滑体

Fig.1 Landslide - avalanche bodies at 800 meters to north Taipingyi on eastern slope of the Minjiang River

4) 碎屑流。有2组垂直节理的花岗岩因昼夜较大温差(物理风化)形成的大块碎石坠落在山坡中部或下部堆积而成,因色调较浅,容易与周围地物区分。汶川大地震时,大块碎石因受震动沿碎石底部有起伏的山坡面向下整体运动而堆积在山坡中下部,在映秀—汶川段岷江两岸能发现碎屑流的存在,

但分布极不广泛。

5) 泥石流。2008年汶川大地震时没有形成泥石流,但地震造成的崩塌、滑坡为泥石流提供了极为充足的松碎物源,在夏季只要有足够的暴雨就会在岷江支流沟谷中或(和)与岷江汇合处形成泥石流。在岷江支流沟中形成的泥石流为沟谷泥石流,堆积形态为泥石流侧碛堤;如泥石流规模更大,则可到达与岷江汇合处形成沟口泥石流堆积物,堆积形态为泥石流扇形地。在岷江两岸山坡沟槽中,还会形成山坡泥石流堆积在岸坡坡脚。因此,根据泥石流堆积物所处的地貌部位及特有的形态,可在高分辨率遥感图像中识别出不同类型的泥石流(特别是沟口泥石流的扇形地形态更容易被识别)。当然,由于泥石流形成时间短,泥石流堆积物颜色较浅,泥石流的形成区、流通区及堆积区需要在空间分辨率优于0.5~0.6 m的航空遥感图像中仔细区分。总体上,泥石流的遥感解译标志以色调特征为主,形态特征次之。

## 2.2 分布规律及成因分析

### 2.2.1 次生地质灾害分布规律

利用2008年5月16日获取的2 m空间分辨率的光学航空遥感图像,在研究区内共解译出滑坡25个、潜在滑坡体21个、崩滑体约1 640个,面积约48 751 404 m<sup>2</sup>(图2)。

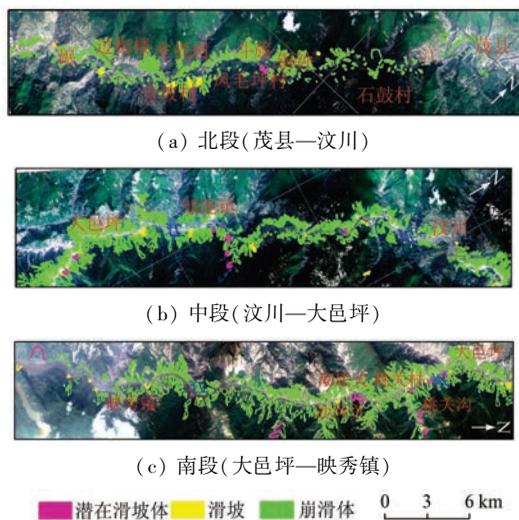


图2 研究区2008年地质灾害分布图

Fig.2 Distribution map of geological disasters in 2008 in study area

从图2可以看出:

1) 岷江及其支流两侧滑坡、崩塌及崩滑广泛分布,沿岷江两岸分布的滑坡、崩塌及崩滑多处阻断国道,在岷江主流的多处地段因河道局部堵塞形成堰塞湖。在2008年汶川大地震诱发的次生地质灾害中,崩塌作用几乎都出现在崩滑作用的后期(即先

滑后崩),单纯的崩塌现象很少见。总体上,映秀—汶川段次生地质灾害分布更为密集,滑坡、崩滑的数量和规模比汶川—茂县段大得多。

2)就地震诱发的4种次生地质灾害而言,崩滑为最主要的类型(占次生地质灾害的90%以上),在岷江流域映秀—汶川段岷江及支流两侧山体分布更为广泛。这一段岷江两侧的山体表层土几乎完全或部分被拨离而形成上滑下崩或沿山坡上的固定沟槽形成葫芦形态的完整崩滑体,在遥感图像中呈灰白色或浅白色调,特别醒目。

3)具有完整形态的滑坡体并不十分发育,规模也不大。在岷江流域映秀—茂县段,汶川大地震形成了大约25个形态完整的滑坡体(表2),它们已堵塞岷江或支流,并在多处阻断国道或造成当地人员伤亡。

表2 岷江流域映秀—茂县段岷江两侧滑坡体  
Tab.2 Landslides on both slopes of Minjiang River in Yingxiu – Maoxian section

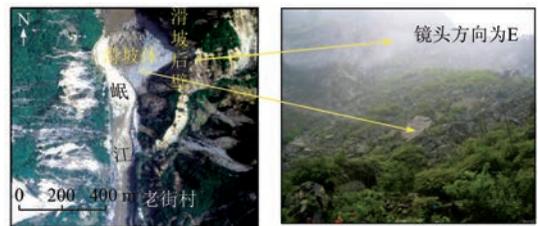
编号	经度/(°)	纬度/(°)	估算方量 /10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup>	位置
1	103.515 474	31.269 628	2.84	白花乡码头村东北700 m,岷江东岸
2	103.522 385	31.022 330	1.30	灰窑坎西280 m
3	103.481 107	31.038 293	0.65	阮家山西北150 m
4	103.483 970	31.052 120	0.71	公馆东北200 m
5	103.490 251	31.056 342	0.38	映秀镇南500 m
6	103.486 257	31.089 429	9.65	老街村北500 m
7	103.494 552	31.124 276	0.20	太平驿东南100 m
8	103.492 938	31.212 666	1.90	罗圈湾北300 m
9	103.483 546	31.256 389	0.15	桃关村西北500 m
10	103.475 966	31.269 051	0.40	皂角沱西北1.7 km
11	103.468 311	31.284 865	0.20	下索桥北500 m
12	103.476 023	31.318 235	0.36	飞沙关南1 km
13	103.477 049	31.322 502	4.60	飞沙关南550 m
14	103.476 043	31.324 579	0.25	飞沙关南330 m
15	103.492 740	31.348 055	2.20	羌锋村东南400 m
16	103.522 187	31.376 098	4.30	木瓜园北700 m
17	103.532 106	31.407 071	0.15	板子沟村东300 m
18	103.543 025	31.440 648	0.40	七盘沟村西南200 m
19	103.546 077	31.441 916	0.23	七盘沟村东南100 m
20	103.567 208	31.466 810	0.09	汶川县城西南300 m
21	103.667 382	31.514 408	0.72	青坡村东1 300 m
22	103.670 244	31.517 081	0.80	青坡村东1.7 km
23	103.679 404	31.524 503	2.10	文镇村南1.5 km
24	103.682 864	31.529 676	2.90	文镇村南800 m
25	103.731 274	31.583 039	0.72	南新镇北200 m

此外,地震也在该段形成21个以上的潜在滑坡体(表3)。滑坡体及潜在滑坡体主要集中在映秀—汶川段,大部分集中在岷江东岸及其支流两侧。

表3 岷江流域映秀—茂县段岷江两侧潜在滑坡体  
Tab.3 Potential landslides on both slopes of the Minjiang River in Yingxiu – Maoxian section

编号	经度/(°)	纬度/(°)	位置	稳定状况 验证结果
1	103.464 914	31.017 771	檬子杠村附近	暂时稳定
2	103.491 933	31.118 284	东界脑村附近	有滑动迹象
3	103.514 967	31.174 947	上银杏坪东2 km	暂时稳定
4	103.519 334	31.173 331	上银杏坪东2.5 km	暂时稳定
5	103.489 429	31.222 492	沱底关东侧	部分滑动
6	103.488 873	31.225 094	沱底关东侧	部分滑动
7	103.491 854	31.228 579	沱底关东北300 m	有活动迹象
8	103.501 322	31.265 297	桃关沟东北450 m	有活动迹象
9	103.505 856	31.266 111	桃关沟东北850 m	将部分滑动
10	103.512 916	31.270 098	桃关沟东北1.7 km	有活动迹象
11	103.514 534	31.269 564	桃关沟东北1.7 km	有活动迹象
12	103.48 310	31.259 971	皂角沱东南350 m	暂时稳定
13	103.476 213	31.271 404	皂角沱西北1 km	暂时稳定
14	103.470 081	31.281 235	下索桥东	将部分滑动
15	103.498 994	31.360 367	绵池镇东200 m	暂时稳定
16	103.507 720	31.366 073	绵池镇东北1.15 km	将部分滑动
17	103.509 803	31.365 724	绵池镇东北1.35 km	将部分崩滑
18	103.517 257	31.361 066	绵池镇东2 km	暂时稳定
19	103.525 533	31.359 048	绵池镇东2.8 km	暂时稳定
20	103.710 694	31.562 774	斗簇村南500 m	有明显活动迹象
21	103.714 124	31.563 253	斗簇村南东600 m	有较明显活动迹象

图3为映秀镇北老街村北约500 m处岷江东岸典型滑坡的遥感影像特征(图3(a))及野外实地考察照片(图3(b))。



(a) 遥感影像特征 (b) 实地考察照片

图3 老街村北约500 m处岷江东岸滑坡遥感影像特征及野外考察照片

Fig.3 Remote sensing imagery characters of the landslide and photos at 500 m north to Laojiecun on eastern shore of the Minjiang River

该滑坡为岷江流域内目前发现的规模最大的滑坡,从后壁到前缘堵塞岷江处长近400 m,最宽处370 m,均宽280 m,平均厚度5~10 m,最大方量96.5万m<sup>3</sup>。该滑坡在遥感图像中色调明显,呈浅白色,滑坡后壁及弧形特征比较清楚。该滑坡体阻断国道并冲入岷江,使岷江遭受部分堵塞;在2008年地震救灾时已疏通,目前国道从滑坡体中部通过,已基本稳定。

4)岷江及支流两侧山坡底部地质灾害发育程

度比山坡中上部要大得多,尤其是岷江及支流 I, II 级阶地前缘陡坎面表层土几乎全部被崩滑,崩滑物质堆积在坡脚。因陡坎面崩滑后成新鲜面,在遥感图像中呈浅色调,几乎连接成片。

5) 碎屑流分布比较局限,所构成的威胁也比较小,本文不做过多论述。

6) 在岷江支流两侧形成的滑坡、崩塌及崩滑体为泥石流提供了丰富的物源,而支流的沟谷纵比降又能满足泥石流形成的地形条件,一旦有足够的降雨,在岷江支流形成破坏性的泥石流是极有可能的。从 2008 年汶川大地震后在岷江支流多次发生泥石流的情况就充分证明了这一点。

### 2.2.2 次生地质灾害成因浅析

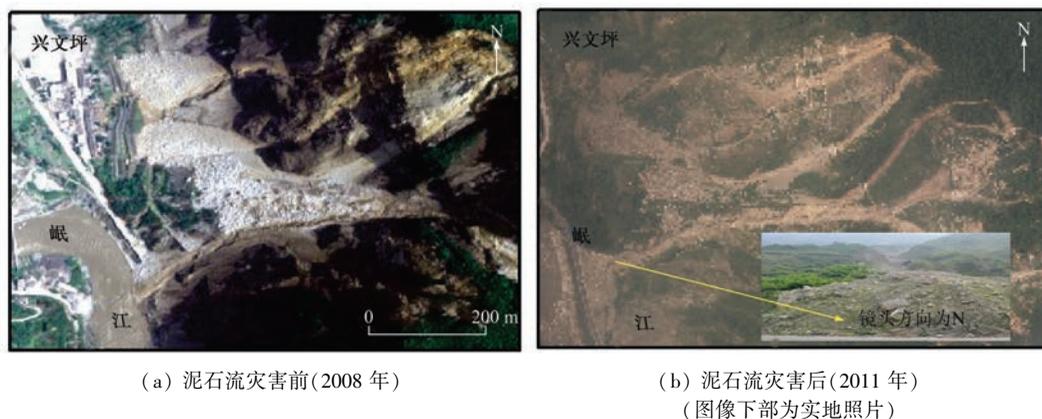
上述地震次生地质灾害分布规律形成的主要原因是: ①由于映秀—汶川段比汶川—茂县段距离汶川大地震的震中更近,受到地震波的影响自然大得多,在同等条件下,崩滑体及滑坡体以及潜在滑坡体的规模就会更大一些; ②岩性上的差异也是造成上述分布规律的主要原因之一。映秀—汶川段岷江两侧的主要岩性为花岗岩,而汶川—茂县段岷江两侧的主要岩性为震旦系—二叠系灰岩、砂岩及泥岩等。花岗岩垂直节理发育,在斜坡上形成无数的浅沟槽,由风化作用形成的表层土一般较薄(厚度不超过 2 m);但在空间上遍及花岗岩分布的地段,表层土就覆盖在其下面的新鲜花岗岩上而无根基。在岷江两侧较陡的山坡上,表层土受到地震的强烈震动很容易沿浅沟或山坡面大面积下滑;但正因为花岗岩的垂直节理发育,表层土的下滑一般不会有完整的滑动面,只是表层土被剥掉,故典型的滑坡只有在特别有利的部位才会形成,而在一般情况都会形成崩滑体。汶川—茂县段灰岩、砂岩及泥岩等表层土更薄,地震时地表并没有大面积土层被剥掉,因而该段

次生地质灾害的规模要小一些; ③汶川—茂县断裂的多次活动使岷江流域映秀—茂县段河流深切,形成山高谷深的 V 型谷或上宽下窄的 U 型谷;谷地两侧山坡较陡,在斜坡较低部位坡度则更陡一些(一般大于  $35^\circ$ )。陡峭的山坡为地震次生地质灾害的发生创造了有利的地形条件。山坡较低部位遇到强烈地震时,表层土更容易形成崩滑体,因此山坡中下部的次生地质灾害发育程度远远高于山坡中上部。

## 3 次生地质灾害发展趋势

2008 年汶川大地震引起的突发性次生地质灾害已造成岷江流域映秀—茂县段大量人员伤亡及多处道路受损及河道被堵。虽然灾难性的事件已成为历史,但地震次生地质灾害的未来发展趋势仍是人们最关注的问题,深入研究次生地质灾害的发展趋势,可为流域内防灾减灾和灾后重建提供重要的科学依据。本文在详细解译 2008 年震后岷江流域映秀—茂县段各种次生地质灾害的基础上,利用 2009—2011 年及 2013 年共 4 期高分辨率光学航空图像数据,对流域内的各种次生地质灾害的发展变化进行了动态跟踪;特别是对滑坡体、潜在滑坡体的发展变化进行了连续动态监测。对所有的次生地质灾害解译结果逐一进行了实地验证,野外验证结果表明,次生地质灾害解译结果的正确率达 90% 以上。综合遥感解译结果、野外考察结果及重要参考文献分析结果<sup>[5,7,10-11]</sup>,发现地震次生地质灾害的主要变化趋势有:

1) 岷江支流两侧及支流沟谷中由于有大量的碎屑物质,汶川大地震后的这几年已有多条沟谷发生了泥石流,泥石流堆积物已多次阻断道路或部分堵塞岷江(图 4)。



(a) 泥石流灾害前(2008 年)

(b) 泥石流灾害后(2011 年)

(图像下部为实地照片)

图 4 兴文坪南岷江东支流沟口泥石流灾害前、后遥感影像特征

Fig. 4 Remote sensing imagery characters before and after occurring of debris flow near the southern Xingwenping

目前还没有发生泥石流的岷江支流,将来一旦有足够大的降雨,发生泥石流的可能性也较大。可以认

为,泥石流灾害已成为震后研究区内最主要的灾害类型。因此,泥石流仍将是岷江流域映秀—茂县段、特

别是映秀—汶川段未来最主要的地质灾害之一。

此外,岷江及支流山坡上有固定沟槽形成的崩滑体,夏季在暴雨的作用下,充足的物源加上较陡的坡度容易形成坡面型泥石流,在岷江岸坡脚堆积成泥石流扇形地,局部地段也会使岷江堵塞。

2)2008 年特大汶川地震后形成的大量崩滑体已严重阻塞道路和河道;尽管阻断道路的崩滑体在抗震救灾中已被清理,但由于坡面不稳定,近几年部分崩滑体再次发生崩滑并继续阻断道路,尤其在下索桥北大邑坪—映秀段发生的崩滑作用更加明显。另外,还有一些新崩滑体出现,因此崩滑仍是主要的地质灾害之一。

3)近几年新出现的滑坡目前还不多见,2008 年在岷江流域映秀—茂县段的滑坡体基本趋于稳定。但通过对潜在滑坡体的遥感动态监测,发现部分潜在滑坡体的危险性在逐渐增大。一旦潜在滑坡体发生滑坡,对人民群众的生命安全、道路、岷江水电等重大工程及河道的畅通都会构成潜在威胁(图 5)。



图 5 映秀—大邑坪段 2011 年航空图像中新增地质灾害分布图

Fig. 5 Distribution map of new geohazards in airborne image acquired in 2011 in the Yingxiu - Dayiping section

具有明显活动迹象的潜在滑坡体主要有:

1)斗簇东南岷江南岸潜在滑坡群。在遥感图像中可发现 2 个比较明显的潜在滑坡,均位于斗簇东南岷江南岸(图 6 中的 A 和 B)。



图 6 斗簇村南岷江南岸潜在滑坡明显的活动迹象(A 和 B)  
Fig. 6 Evident active signs(A and B) of potential landslides on the southern slope of the Minjiang River near Doucu

东侧的潜在滑坡在汶川地震时靠江处已部分发生崩滑,滑坡后壁有较明显的活动迹象;西侧的潜在滑坡后壁也十分清晰,活动迹象也很明显,仔细分析可分为Ⅲ级滑动,最外围(即最南的Ⅰ级)后壁最明显,是 21 个潜在滑坡体中最有可能滑动的。

野外考察结果亦证明了该潜在滑坡群的活动性。一旦发生滑坡,将会完全堵塞岷江,对下游西南方向约 1 km 处的美射坝电站构成严重威胁,对该潜在滑坡应重点进行遥感动态监测。

2)沱底关村东侧潜在滑坡群。在遥感图像中至少可以发现该滑坡群有 3 个潜在滑坡体,分别位于沱底关村北、东、南(图 7 中的 A, B, C)。这 3 个潜在滑坡体对沱底关村及岷江上的大坝均构成较大潜在威胁。



图 7 沱底关附近岷江东岸 2008 年汶川地震诱发的潜在滑坡群(A, B 和 C)

Fig. 7 Potential landslides(A, B and C) induced by Wenchuan earthquake in 2008 on eastern slope of the Minjiang River near Qidiguan

不论哪个潜在滑坡体发生滑坡,要么堵塞岷江快速形成堰塞湖,将沱底关村置于湖中,或湖溃决冲毁沱底关村;要么将沱底关村和大坝埋在滑坡体中。因此,应重点监测该潜在滑坡群。野外考察发现,沱底关东南侧和东侧的 2 个潜在滑坡群近期整体下滑的可能性不大,因其上部较陡峭,可能会发生部分崩滑;东北侧的潜在滑坡后壁出现活动迹象,应重点监测。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

1)岷江流域映秀—茂县段 2008 年汶川大地震诱发的次生地质灾害类型有滑坡、崩塌、崩滑及碎屑

流。其中,崩滑为最主要的次生地质灾害类型,占90%以上;完整的滑坡不太发育,规模也不是很大。

2)映秀—汶川段次生地质灾害的发育程度及规模比汶川—茂县段要高,其主要原因是前者距离地震构造更近和花岗岩风化形成相对较厚的表层土无根基而导致大面积滑动造成的。

3)映秀—茂县段岷江及其支流未来的主要地质灾害为泥石流,部分潜在滑坡体已有明显的活动迹象,应引起当地政府防灾部门的高度重视。

#### 4.2 建议

1)由于汶川大地震诱发的崩塌、滑坡为泥石流的形成提供了极为充足的物源,尽管岷江支流的某些沟谷目前还未发生泥石流,但将来发生泥石流的可能性仍很大;即使在已经发生过泥石流的支沟中,物源仍非常丰富,将来再次发生地质灾害的可能性仍然存在,可以说岷江的支流基本上都是泥石流沟。因此,当地居民选择居住地时或重大工程选址时,尽量不要在岷江支流沟中或沟口处,以避免泥石流灾害带来的生命及财产损失。当然,对已居住在沟谷中的居民,当地政府应尽量动员搬迁,实在不能搬迁的应有相应的防护措施。

2)崩滑是岷江流域映秀—茂县段(特别是映秀—汶川段)主要的地震次生地质灾害类型,在陡峭的山坡上更容易出现崩滑作用。因此,在选择居住地或重大工程选址时,应尽量避免山高谷深地段。崩滑体对道路的阻断起了很大的作用,应对重点路段给予一次性加固。

3)建议对本文重点描述的潜在滑坡体进行动态监测,对桃关沟的潜在滑坡也应该重点关注。尽管已对桃关沟中的泥石流采取了防护措施,但沟两侧还有4个以上的潜在滑坡体,实地验证结果表明这些潜在滑坡体已有初步活动迹象,对沟中居民及厂房等建筑有较大的潜在威胁,建议对其进行动态跟踪。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈国光,计凤桔,周荣军,等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质,2007,29(3):657-673.  
Chen G G, Ji F J, Zhou R J, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since Late - Quaternary[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 657 - 673.
- [2] 唐新功,胡文宝. 龙门山断裂带地震时空分布规律探讨[J]. 长江大学学报:自然科学版理工,2012,9(6):21-23.  
Tang X G, Hu W B. Discussion on spatio-temporal distribution characters of earthquake on Longmenshan fault zone[J]. Journal of Yangtze University: Nat Sci Edit Sci and Eng, 2012, 9(6): 21 - 23.
- [3] Dong S W, Zhang Y Q, Wu Z H, et al. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the Ms 8.0 Wenchuan earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards growth of the Qinghai - Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(5): 938 - 948.
- [4] Xu Z Q, Ji S C, Li H B, et al. Uplift of the Longmenshan range and the Wenchuan earthquake[J]. Episodes, 2008, 31(3): 291 - 301.
- [5] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 汶川 Ms 8.0 地震地表破裂及其发震构造[J]. 地震地质,2008,30(3):597-629.  
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 597 - 629.
- [6] Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence[J]. Science in China D: Earth Sciences, 2008, 51(12): 1703 - 1711.
- [7] 黄润秋,李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):285-292.  
Huang R Q, Li W L. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 285 - 292.
- [8] 黄润秋. “5·12”汶川大地震地质灾害的基本特征及其对灾后重建影响的建议[J]. 中国地质教育,2008(2):21-24.  
Huang R Q. Characteristics of geological disasters of “5·12” Wenchuan earthquake and recommendation on its impact on reconstruction[J]. Chinese Geological Education, 2008(2): 21 - 24.
- [9] Parsons T, Chen J, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. Nature, 2008, 454: 509 - 510.
- [10] 陈晓利,邓俭良,冉洪流. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征[J]. 地震地质,2011,33(1):191-202.  
Chen X L, Deng J L, Ran H L. Analysis of landslides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 191 - 202.
- [11] 王秀英,聂高众,马牧军. 地震滑坡灾害评估中地震影响因素的联合应用[J]. 地震学报,2012,34(1):76-84.  
Wang X Y, Nie G Z, Ma M J. Application of multiple ground motion factors in earthquake - induced landslide hazard evaluation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(1): 76 - 84.
- [12] 陈正宜,魏成阶,魏永明,等. 工程环境遥感应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.  
Chen Z Y, Wei C J, Wei Y M, et al. Remote Sensing Application of Engineering Environment[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1996.
- [13] 彭立,杨武年,黎小东,等. 面向对象的地质灾害信息提取——以汶川地震为例[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2011,36(2):77-82.  
Peng L, Yang W N, Li X D, et al. Information extraction of geological hazards in an object oriented approach: A case study in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2011, 36(2): 77 - 82.
- [14] 董金玉,杨国香,杨继红,等. 汶川地震灾区滑坡的成因及典型实例分析[J]. 华北水利水电学院学报,2011,32(5):10-13.  
Dong J Y, Yang G X, Yang J H, et al. Analysis of causes and typical examples of the landslide in Wenchuan earthquake disaster area

- [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(5): 10 - 13.
- [15] 张雨霆, 肖明, 李玉婕. 汶川地震对映秀湾水电站地下厂房的震害影响及动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(s2): 3663 - 3671.
- Zhang Y T, Xiao M, Li Y J. Effect of Wenchuan earthquake on earthquake damage and dynamic response analysis of underground powerhouse of Yingxiuwan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s2): 3663 - 3671.
- [16] 聂洪峰, 童立强, 李建存, 等. 基于遥感技术的“6·5”重庆武隆鸡尾山崩滑灾害特征及应急救援工程布置研究[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 115 - 121.
- Nie H F, Tong L Q, Li J C, et al. Study on disaster characteristics and emergency rescue engineering for Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing, June 5, 2009 using remote sensing technology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 115 - 121.
- [17] 童立强, 聂洪峰, 李建存, 等. 喜马拉雅山地区大型泥石流遥感调查与发育特征研究[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4): 104 - 112.
- Tong L Q, Nie H F, Li J C, et al. Large - scale debris flow survey and development study using remote sensing technology in the Himalayas, China [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4): 104 - 112.

## Analysis of distribution regularity and development tendency of earthquake secondary geohazards in Yingxiu - Maoxian section along the Minjiang River

WEI Yongming, WEI Xianhu, CHEN Yu

(Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The 2008 Wenchuan earthquake led to fatal secondary geological disasters in the Yingxiu - Maoxian segments along the Minjiang River. Through using multi - phase high - resolution airborne remote sensing data obtained after the earthquake in combination with interpretation signs of various geohazards, we can analyze the distribution regularity and development tendency of earthquake secondary geohazards quickly and accurately, which is of great significance in guiding reconstruction of the disaster area scientifically. The distribution regularity of secondary geohazards finds expression in the following aspects: ① avalanche, landslide and landslide - avalanche (the transition type between the landslide and avalanche) constitute the main types, with landslide - avalanche taking up over 90%; ② the geohazards are widely distributed on the both slopes of the Minjiang River in the Yingxiu - Maoxian segment, but their scales and intensities are much larger in the Yingxiu - Maoxian segment than in the Wenchuan - Maoxian segment. Through continuous dynamic monitoring of the secondary geohazards after the earthquake by using high - resolution aerial imagery acquired from 2009 to 2011 and in 2013, the authors have revealed that 25 earthquake - induced landslides have been stable basically, but some potential landslides (total 21) show evident signs of activity, of which the Doucu potential landslides in Maoxian and Qidiguan potential landslides in Wenchuan deserve more attention. In addition, the debris flow will be the main geohazard type in the Yingxiu - Maoxian segment along the Minjiang River in the future; in the Yingxiu - Wenchuan segment, the frequency and intensity of the debris flow are especially obvious.

**Key words:** Wenchuan great earthquake; earthquake secondary geological disasters; airborne remote sensing; distribution regularity; development tendency analysis

**第一作者简介:** 魏永明(1966 - ),男,博士,副研究员,主要从事地质灾害遥感分析、大型工程环境遥感评价及遥感地质找矿等方面的研究。Email: wei\_fu@sina.com。

(责任编辑:刘心季)