

# 汶川地震强震区地震诱发滑坡与后期降雨诱发滑坡控制因子耦合分析\*

齐信<sup>①②</sup> 唐川<sup>②</sup> 陈州丰<sup>①</sup> 邵长生<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国地质调查局武汉地质调查中心 武汉 430205)

(<sup>②</sup>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 成都 610059)

**摘要** 本文以汶川地震强震区北川县典型研究区为例,利用高分辨率航片、SPOT5 卫星图像对北川县典型研究区进行了“5·12”地震之后和“9·24”降雨之后诱发的滑坡解译,解译结果显示:“5·12”地震诱发滑坡 1999 个,“9·24”强降雨诱发滑坡 828 个,“9·24”强降雨导致原有地震滑坡面积扩大的滑坡 150 个。研究表明:地震和强降雨都是诱发滑坡的动力成因,“9·24”强降雨诱发的滑坡面积是“5·12”地震诱发滑坡面积的 1/4 倍,强降雨诱发滑坡的数量增加了 41.4%;强降雨不仅诱发新的滑坡,而且促使原来地震滑坡复活,并扩大其面积,强降雨导致地震诱发的滑坡面积扩大了原面积的 68.7%。同时,在遥感解译数据基础之上,开展地震诱发滑坡与降雨诱发滑坡规模对比和控制因子耦合分析及地震与降雨耦合灾害链模式研究,为进一步分析研究地震灾区滑坡的产生、发展趋势、危险性和风险评价等预测预报提供科学依据,也为汶川震区恢复重建中的减灾防灾提供决策参考。

**关键词** 汶川地震 强震区 地震诱发滑坡 降雨诱发滑坡

中图分类号:P642.22 文献标识码:A

## COUPLING ANALYSIS OF CONTROL FACTORS BETWEEN EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDES AND SUBSEQUENT RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES IN EPICENTER AREA OF WENCHUAN EARTHQUAKE

QI Xin<sup>①②</sup> TANG Chuan<sup>②</sup> CHEN Zhoufeng<sup>①</sup> SHAO Changsheng<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Wuhan Center, China Geological Survey Wuhan 430205)

(<sup>②</sup>State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** This paper selects typical study area in epicenter area of the Beichuan as the site for the landslides interpretations induced after the Wenchuan Earthquake on May 12, 2008 and the strong rainfall on September 24, 2009. It bases on high-resolution aerial photographs and remote sensing SPOT 5 imagery. The results are as follows. the number of the earthquake-induced landslides is 1999. the number of the rainfall-induced landslides is 828. the rainfall enlarged the 150 earthquake-induced landslides. The earthquake and the rainfall are powerful causes for the occurrence of landslides. the rainfall-induced landslide area is 25% larger than the earthquake-induced landslide area. So, the landslide number in the study areas is increased by 41.4%. The strong rainfall not only induced new landslides

\* 收稿日期: 2011-09-28; 收到修改稿日期: 2012-01-10.

基金项目: 科技基础性工作专项项目(2011FY110100)及中国地质调查局项目(1212011120097)资助.

第一作者简介: 齐信, 主要从事工程地质、环境地质、遥感与 GIS 应用方向研究. Email: qx\_cdut@126.com

but also made the original earthquake landslides raise, and to expand the area so that the landslide area increased by 68.7%. Meanwhile, on the basis of remote sensing data interpretation, the paper further analyse the induced landslides, carries out the trends, hazard and risk evaluation, which provides a scientific prediction basis. The findings in this paper can be useful to the Wenchuan Earthquake restoration and reconstruction in disaster mitigation and preparedness and provide the decision-makers to carry out earthquake-induced landslides and rainfall-induced landslides scale contrast and control factor coupling analysis and the earthquake and rainfall coupling disasters chain mode.

**Key words** Wenchuan earthquake, Strong earthquake area, Earthquake-induced landslides, Rainfall-induced landslides, Beichuan

## 1 引言

2008年5月12日14时28分在四川省汶川县映秀镇发生里氏8.0级地震(以下简称“5·12”地震),地震导致龙门山断裂带之前山断裂和中央断裂向NE破裂,破裂带长达近300km<sup>[1~3]</sup>,地震波及大半个中国。“5·12”汶川地震释放能量大、破坏力强、波及范围广,因而触发了大量的滑坡等地质灾害。黄润秋等学者认为地震诱发的地质灾害总量估计在5万处以上<sup>[4]</sup>。汶川地震灾害后果极其严重,截止2008年9月25日12时,地震已确认69227人遇难,374643人受伤,失踪17923人,4000余万人受灾,直接经济损失高达10000亿元以上<sup>[3]</sup>。

地震诱发滑坡往往是地震中引起人员伤亡与财产损失的主要因素。强烈地震时,特别是在西部山区,地震诱发滑坡等次生灾害比地震本身直接造成的危害还要大。“5·12”汶川地震之后,我国一些学者对汶川地震诱发滑坡的分布规律和滑坡特征进行了相关研究。殷跃平<sup>[5]</sup>通过野外调查和遥感解译等手段在四川42个重灾县滑坡分布进行了总结,对地震滑坡坝堵江形成的33个堰塞湖进行评估,划分出极高、高、中和低4种溃决危险,同时探讨滑坡高速远程运动的“地震抛射-撞击崩裂-高速滑流”模式,由此过程产生的3种效应:(1)高速气垫效应;(2)碎屑流效应;(3)铲刮效应。黄润秋和李为乐<sup>[4]</sup>分析了汶川地震诱发地质灾害发育的分布规律,得出地震灾害分布具有明显的“上下盘效应”。陈晓利<sup>[6]</sup>探讨了导致地震灾害分布具有明显“上下盘效应”的原因。齐信基于GIS技术对强震区北川县地震诱发地质灾害危险性评价中得出规律:地震诱发地质灾害的分布受发震断裂、河谷地形地貌等条件的控制<sup>[3,7]</sup>。许强和李为乐<sup>[8]</sup>研究大型滑坡运动方式表现以下4种效应:(1)距离效应;(2)锁骨段效应;(3)上下盘效应;(4)方向效应。同时,大

型滑坡的滑动及运动方向还与备区段断层的错动方向有一定的相关性。黄润秋<sup>[9]</sup>通过汶川地震触发的典型滑坡分析得出强震触发崩滑灾害具有的震动溃裂、溃滑失稳、超强动力和大规模高速抛射与远程运动等特征。

地震是诱发滑坡次生灾害的动力成因之一,同时又为后期降雨作用而引发次生灾害提供了物质基础,具有灾害链效应。由于地震作用,山体变得疏松,大量松散碎屑物质堆积在山坡坡面或沟道内,具有潜在发生滑坡或泥石流灾害的可能性,这种影响会持续5~10a<sup>[10]</sup>。所以,斜坡的稳定性受地震的长期影响,尤其是在雨季,滑坡等地质灾害屡次发生,因此地震之后的强降雨也是诱发滑坡等地质灾害的动力成因之一。例如:1999年台湾集集大地震后的强降雨诱发了新的滑坡等地质灾害,降雨诱发的滑坡面积是地震直接诱发滑坡面积的3倍<sup>[11]</sup>。“5·12”汶川地震也诱发了1.5万处滑坡<sup>[12]</sup>,说明地震后的后续降雨将会诱发更大范围的滑坡。大部分学者注重于汶川地震诱发滑坡的研究,然而对震后降雨诱发滑坡的研究较少。汶川地震之后因强降雨引起的灾害频频爆发,据统计,2010年6~8月全国特大型和大型山地灾害事件36起,其中因强降雨引发的多达32起,包括甘肃舟曲“8·7”特大泥石流、8月12日以来的汶川地震灾区的山洪泥石流等。尤其是汶川地震后的9月23~24日(以下简称“9·24”)遭遇的一次强降雨过程,降雨量达250~350mm,不仅诱发大量新增滑坡,而且导致原地震诱发滑坡的进一步活动,特别是诱发了群发性泥石流灾害,造成42人死亡<sup>[10]</sup>,发生在汶川地震强震区这一灾害事件为深入研究地震后降雨诱发滑坡的发育及分布规律提供了有力的依据和可能。

本文利用多时相、高分辨率的(彩色)航片、SPOT5 pan波段(黑白)卫片,对汶川地震强震区北川县典型研究区进行了“5·12”地震之后、“9·24”降雨之后诱发滑坡数量和面积规模特征对比分析,研

究地震诱发滑坡与后期降雨诱发滑坡的形成条件、发育特征与控制因子耦合关系、耦合灾害链模式,为进一步明确强震区地震诱发滑坡、降雨诱发滑坡的活动强度、活动规模、活动规律、活动方式与控制因子间的耦合关系提供依据支持,也为汶川强震区灾后重建中政府部门的减灾、防灾决策提供参考,为进一步分析研究地震强震区滑坡的产生,控制因子的耦合分析,滑坡的分布规律、发展趋势、预测预报、风险管理和风险决策提供科学依据。

## 2 研究区概况

北川县地处四川盆地向川西高原的过渡带上,位于绵阳市西北部。典型研究区(约 400km<sup>2</sup>)位于北川县城附近,沿映秀—北川断裂带纵向展布。研究区高程范围值 580 ~ 2358m,相对高差大于 1000m,属于中山强烈切割地貌(图 1)。研究区内地质构造复杂,映秀—北川断裂倾向 NW,倾角 60° ~ 70°。映秀—北川断裂也是引起汶川地震发震的主要断裂(图 2)。典型研究区出露的地层有寒武系、志留系、泥盆系、石炭系及第四系松散堆积层,主要是碳酸盐岩、板岩、千枚岩、砂岩、砂页岩(图 2)。这些岩土体风化强烈,岩体裂隙发育,抗剪强度低,在地震或降雨的条件下易发生蠕动变形或快速滑动。同时基于母岩大量的松散的残坡积物、冲洪积物、崩—滑碎屑体、泥石流物质在沟道内、河漫滩上、

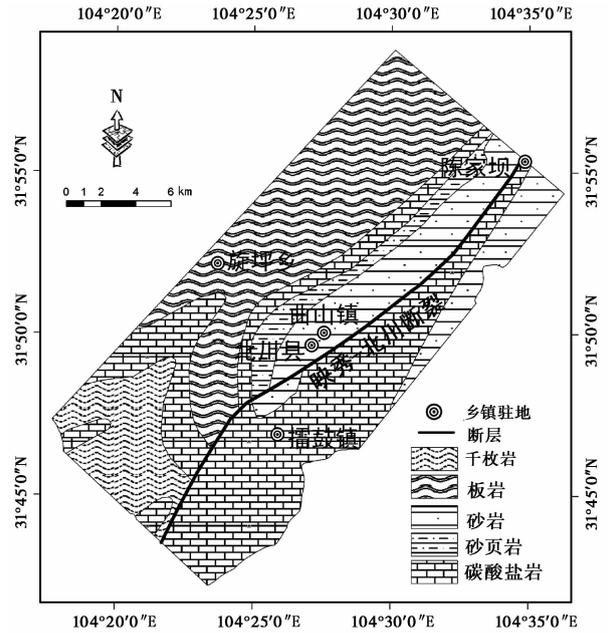


图 2 北川县典型研究区岩性分布图

Fig. 2 Lithology distribution of typical studied area in Beichuan county

阶地、山坡坡脚以及山坡上堆积,构成复杂的岩土体类型。

典型研究区内的主要河流为湔江(图 1),湔江系涪江一级支流,发源于强震区北川县境西,从东南角流出,最后注入涪江。受地质构造和地形地貌的影响,湔江在北川县城附近呈“几”字型折 S 向后转向 NE 向。研究区属于亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 15.6℃(表 1)。该区年均降雨量 1399.1mm,雨量充沛(表 1)。从历年时间上看,各年降雨分布不均(图 3)。

## 3 研究方法

本文依托地质学、气象学、水文学、地貌学、3S 技术等相关学科基础理论,依据多时相、高分辨率的(彩色)航片、SPOT5 pan 波段(黑白)卫片对北川县典型研究区进行滑坡遥感解译,建立强震区滑坡遥感解译的判识标志,分析地震诱发滑坡与后续降雨诱发滑坡控制因子的耦合关系、耦合灾害链模式。

本文研究数据包括 1:5 万地形图、1:10 万地质图、地质构造图、遥感影像图等。数据来源如下:(1)基础地理资料:1:5 万地形图(国家测绘局)、1:10 万地质图(四川省国土资源厅)等;(2)遥感影像图:“5·12”地震后 2008 年 5 月 18 日获取的 0.5m

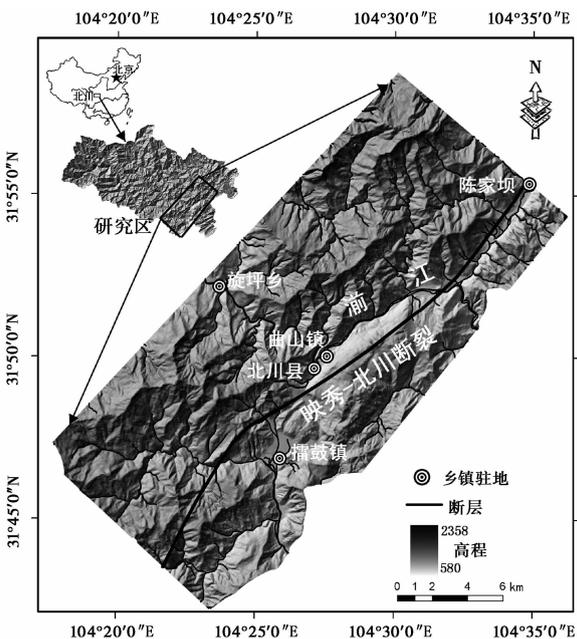


图 1 北川县典型研究区

Fig. 1 Typical studied area in Beichuan county

表 1 1971~2007 年北川县平均气温和降雨量

Table 1 Mean temperature and rainfall amount from 1971 to 2007 in Beichuan

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
气温/℃	5.3	7.0	11.3	12.9	20.4	21.6	24.4	24.4	20.2	16.0	11.3	6.8	15.6
降雨量/mm	5.9	11.4	22.8	52.6	97.3	135.3	370.8	350.4	206.6	64.4	18.6	4.1	1399.1

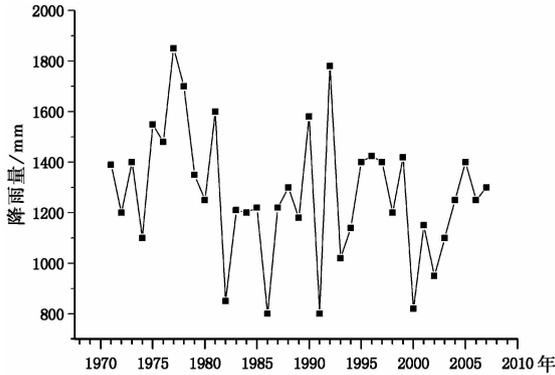


图 3 1971~2007 年北川县年降雨量分布

Fig. 3 Annual rainfall amount from 1971 to 2007 in Beichuan

左右的高分辨(彩色)航片,包括红、绿、蓝 3 个波段。“9·24”强降雨后 2008 年 10 月 14 日获取的 2.5m 分辨率的 SPOT5 pan 波段(黑白)图像,图像云层少,数据质量好。

对遥感图像进行预处理的方法包括增强处理、几何精校正、正射校正、色彩和饱和度调整等。对滑坡进行遥感解译是在 Erdas 软件中完成的,滑坡根据在遥感图像上独特的地貌,通过图像色调、形态、纹理、阴影等特征是比较容易辨认的。其形态特征在遥感图像上较清楚,多呈簸箕形、舌形、椭圆形等。同时,地震和降雨诱发的滑坡的边界更加清晰,可见双沟同源现象。表层裂隙较发育,滑坡整体呈明亮色调(图 4),和周围地貌有明显区别,这些现象有利于滑坡解译。

滑坡受多种因子的控制,形成机理复杂。滑坡的产生首先要存在有利于滑坡滑动的地形坡度,其次是要有易滑的岩土体类型,第三是地质构造条件。地形坡度控制着滑坡产生的临空条件,岩土体类型是发生滑坡的物质基础,构造条件控制滑坡发育的空间位置。滑坡自身形成条件及滑动机制决定了在地震和降雨诱发滑坡控制因子耦合分析中必须综合考虑滑坡发育的地层岩性、地质构造、地震、暴雨、海拔高度等因素。因此,本文重点选择了地形坡度、海拔高度、地层岩性、距断层距离(缓冲带)、地震烈度 5 个控制因子参与分析。

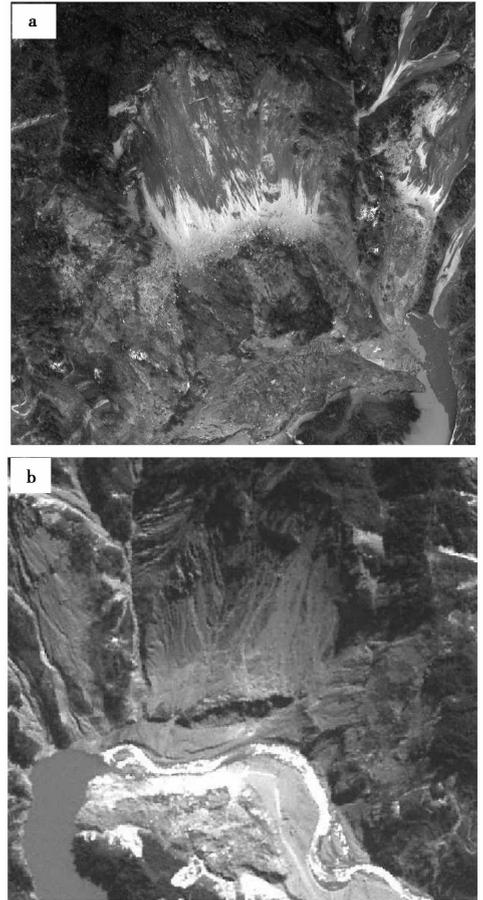


图 4 唐家山滑坡

Fig. 4 Tangjiashan landslide

a. “5·12”地震后航空影像; b. “9·24”降雨后 SPOT5 pan 影像

地形坡度:地形坡度为栅格数据格式,提取于数字高程模型(DEM)。依照 10°间隔,将地形坡度划分为 7 个因子属性段,分别是: $<10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、 $50^\circ \sim 60^\circ$ 、 $\geq 60^\circ$ ,分段上下阈值按照[a,b]归属。运用 GIS 工具对其进行因子属性面积和滑坡面积统计。

地层岩性:地层岩性因子来源于 1:100000 地质图,为矢量化图层,利用 ArcGis 数据转换模块转为栅格数据,研究区主要有 5 种岩土类型分布,分别为砂板岩、碳酸盐岩、砂岩、泥页岩、千枚岩。运用 GIS 工具统计每种岩土类型中滑坡面积。

距断层距离:研究区分布有映秀-北川断层,利

用 GIS 的空间分析功能对断层做 buffer 处理,生成 <2000m、2000~4000m、4000~6000m、≥6000m 共 4 个区,分段上下阈值按照 [a, b) 归属。运用 GIS 工具对距断层距离进行因子属性段面积和属性段内滑坡面积统计。

**海拔高度:**海拔高程因子提取于数字高程模型 (Dem),为栅格数据格式,分析过程中,将研究区高程分成小于 <800m、800~1000m、1000~1200m、1200~1400m、1400~1600m、1600~1800m、1800~2000m、≥2000m 共 8 个属性段。分段上下阈值按照 [a, b) 归属。运用 GIS 工具对海拔高度进行因子属性段面积和滑属性段内滑坡面积统计。

**地震烈度:**依据汶川地震烈度分布图(中国地震局),典型研究区分布有 2 个地震烈度带,分别为 X、XI。研究过程中,运用 GIS 工具对 2 个地震烈度带进行因子属性段面积和相应滑坡面积统计。

为了定量评价对比分析,本文建立滑坡面积百分比模型,对每个控制因子的因子属性段采用滑坡面积百分比模型计算其贡献度,贡献度越大,标明该控制因子在该因子属性段中具有较高的敏感度。滑坡面积百分比模型如下:

$$LAP(ij) = \text{area}(ij) / \text{Area}(ij)$$

其中,  $LAP(ij)$  为第  $i$  控制因子中  $j$  属性段的滑坡面积百分比(单位:%);  $\text{area}(ij)$  为第  $i$  控制因子中  $j$  属性段内对应的滑坡面积(单位: $\text{km}^2$ );  $\text{Area}(ij)$  为第  $i$  控制因子中  $j$  属性段的面积(单位: $\text{km}^2$ )。

## 4 汶川地震诱发滑坡

地震诱发滑坡是一种常见的地震次生灾害,当强烈地震发生后,地震力破坏斜坡稳定性,导致大量滑坡和地裂缝,后者在一定条件下又孕育出新的滑坡<sup>[11, 13]</sup>。如 1933 年 7.5 级叠溪地震诱发大量滑坡等地质灾害,并堵江形成堰塞湖<sup>[14]</sup>。汶川地震后,对强震区北川县典型研究区航片进行滑坡解译(图 5)。滑坡解译是在 Erdas 软件中完成的,对滑坡边界进行圈闭,共解译滑坡 1999 个,滑坡面积为  $26.01 \times 10^6 \text{m}^2$ 。按滑坡面积百分比模型分析各个控制因子和每个控制因子属性段的滑坡贡献度,进一步确定每一个因子属性段的敏感度(表 2)。

## 5 降雨诱发滑坡

我国已发生的滑坡、崩塌、泥石流灾害中,大部

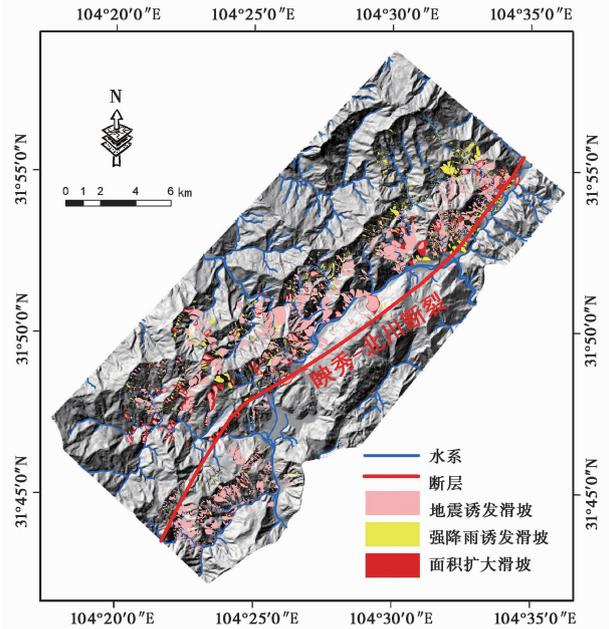


图 5 北川县典型研究区滑坡分布

Fig. 5 Landslide distribution of typical studied area in Beichuan county

表 2 地震诱发滑坡控制因子统计表

Table 2 Earthquake-induced landslides control factor table

控制因子	因子属性	因子属性面积/ $\text{km}^2$	滑坡面积/ $\text{km}^2$	滑坡面积百分比/(%)
地形坡度/(°)	<10	32.09	1.16	3.62
	10~20	42.49	0.60	1.42
	20~30	111.11	3.55	3.20
	30~40	120.53	8.86	7.35
	40~50	67.55	7.90	11.69
	50~60	20.53	2.97	14.47
	≥60	5.89	0.90	15.35
地层岩性	碳酸盐岩	147.77	7.47	5.06
	砂板岩	121.49	2.63	2.16
	砂岩	45.66	5.65	12.38
	千枚岩	81.94	9.89	12.06
	泥页岩	3.34	0.31	9.35
距断层距离/m	<2000	113	12.26	10.85
	2000~4000	120	11.00	9.17
	4000~6000	79	2.65	3.35
	≥6000	88	0.09	0.10
海拔高度/m	<800	37.16	3.75	10.08
	800~1000	57.16	6.29	11.01
	1000~1200	75.62	6.48	8.57
	1200~1400	80.52	4.45	5.53
	1400~1600	70.20	2.81	4.01
	1600~1800	40.58	1.18	2.92
	1800~2000	24.08	0.67	2.80
地震烈度	≥2000	14.89	0.31	2.11
	X	73.21	1.97	2.69
	XI	327.00	23.98	7.33

分都是由降雨直接诱发或与降雨相关。一方面,雨水渗透,岩土体吸附雨水,导致岩土体力学性能下降,岩土力抗剪强度降低,抗滑力减小;另一方面,雨水进入滑坡体内,滑体自重增加,再加上雨水的动、静水压力增加,导致滑体下滑力增加。当下滑力大于抗滑力时,滑坡必然发生滑动。利用高分辨率 SPOT5 pan 卫星图像,对“9·24”降雨诱发滑坡进行了圈闭解译,共解译滑坡 828 个,滑坡总面积为  $5.91 \times 10^6 \text{m}^2$  (图 5)。按滑坡面积百分比模型分析各个控制因子和每个控制因子属性段的滑坡贡献度,进一步确定每个因子属性段的敏感度 (表 3)。

表 3 降雨诱发滑坡控制因子统计表

Table 3 Rainfall-induced landslides control factor table

控制因子	因子属性	因子属性面积/ $\text{km}^2$	滑坡面积/ $\text{km}^2$	滑坡面积百分比/(%)
地形坡度/(°)	< 10	32.09	0.27	0.84
	10 ~ 20	42.49	0.35	0.82
	20 ~ 30	111.11	1.06	0.95
	30 ~ 40	120.53	2.30	1.91
	40 ~ 50	67.55	1.45	2.15
	50 ~ 60	20.53	0.40	1.92
	≥ 60	5.89	0.10	1.70
地层岩性	碳酸盐岩	147.77	2.34	1.58
	砂板岩	121.49	1.58	1.30
	砂岩	45.66	0.76	1.67
	千枚岩	81.94	1.20	1.47
	泥页岩	3.34	0.05	1.36
距断层距离/m	< 2000	113	2.35	2.08
	2000 ~ 4000	120	2.05	1.71
	4000 ~ 6000	79	1.28	1.62
	≥ 6000	88	0.24	0.27
海拔高度/m	< 800	37.16	0.86	2.32
	800 ~ 1000	57.16	0.62	1.09
	1000 ~ 1200	75.62	1.26	1.67
	1200 ~ 1400	80.52	1.35	1.68
	1400 ~ 1600	70.20	0.93	1.32
	1600 ~ 1800	40.58	0.36	0.88
	1800 ~ 2000	24.08	0.31	1.29
地震烈度	≥ 2000	14.89	0.23	1.54
	X	73.21	0.10	0.14
	XI	327.00	5.82	1.78

## 6 滑坡控制因子耦合分析

### 6.1 滑坡规模分析

之后 2 期遥感图像进行了滑坡解译 (表 4)。解译结果为:“5·12”地震诱发滑坡 1999 个,“9·24”降雨诱发滑坡 828 个,“9·24”强降雨导致原地震滑坡复活,并扩大面积的滑坡 150 个;“5·12”地震诱发滑坡面积为  $26.01 \times 10^6 \text{m}^2$ ,单体滑坡面积  $\geq 50000 \text{m}^2$  的分布面积为  $13.10 \times 10^6 \text{m}^2$ ,占总面积的 50.4%;“9·24”降雨诱发滑坡总面积为  $5.91 \times 10^6 \text{m}^2$ ,其中单体滑坡面积  $\geq 50000 \text{m}^2$  的滑坡累加面积为  $1.32 \times 10^6 \text{m}^2$ ,占总面积的 22.3%;“9·24”降雨导致扩大面积为  $3.19 \times 10^6 \text{m}^2$ ,单体滑坡面积  $\geq 50000 \text{m}^2$  的分布面积达  $1.26 \times 10^6 \text{m}^2$ ,占总面积的 39.3% (图 6)。由滑坡规模综合分析看出:(1)地震和降雨都是诱发滑坡等次生灾害的动力成因,“5·12”地震诱发滑坡数量最多,是“9·24”降雨诱发滑坡的 2.4 倍,是“9·24”降雨诱发面积扩大滑坡的 13.3 倍;“9·24”降雨诱发滑坡面积是“5·12”地震诱发滑坡面积的 1/4 倍,“9·24”降雨诱发滑坡数量增加了 41.4%;同时,“9·24”降雨促使原地震滑坡复活,并扩大面积,“9·24”降雨导致原地震滑坡扩大了原来面积的 68.7%;(2)地震诱发滑坡单体规模呈均匀分布,大型滑坡和中小型滑坡规模相当,比如:滑坡面积  $\geq 50000 \text{m}^2$  的 109 个,滑坡面积  $\geq 10000 \text{m}^2$  的 494 个,滑坡面积  $\geq 3000 \text{m}^2$  的 1033 个,占 51.7%,滑坡面积  $< 3000 \text{m}^2$  的 966 个,占 48.3%;(3)降雨诱发滑坡单体规模呈正态分布,滑坡类型以中型为主,比如:滑坡面积  $\geq 50000 \text{m}^2$  的仅 15 个,滑坡面积  $\geq 10000 \text{m}^2$  的 134 个,占 16.2%,滑坡面积  $\leq 2000 \text{m}^2$  的 264 个,占 31.9%;(4)“9·24”降雨导致原地震诱发滑坡面积扩大的滑坡类型以较大型为主,滑坡

表 4 滑坡解译汇总表

Table 4 Summary of the interpretation for landslide

滑坡面积/ $\text{m}^2$	地震诱发滑坡		降雨诱发滑坡		降雨诱发面积扩大滑坡	
	个数	面积/ $10^6 \text{m}^2$	个数	面积/ $10^6 \text{m}^2$	个数	面积/ $10^6 \text{m}^2$
< 1000	410	0.22	92	0.06	2	0.001
1000 ~ 2000	348	0.50	172	0.26	5	0.008
2000 ~ 3000	208	0.51	122	0.30	9	0.022
3000 ~ 5000	236	0.93	158	0.60	21	0.083
5000 ~ 10000	303	2.12	150	1.07	32	0.234
10000 ~ 20000	204	2.90	73	0.99	34	0.513
20000 ~ 50000	181	5.73	46	1.31	34	1.076
≥ 50000	109	13.10	15	1.32	13	1.255
总计	1999	26.01	828	5.91	150	3.192

对典型研究区“5·12”地震之后、“9·24”强降雨

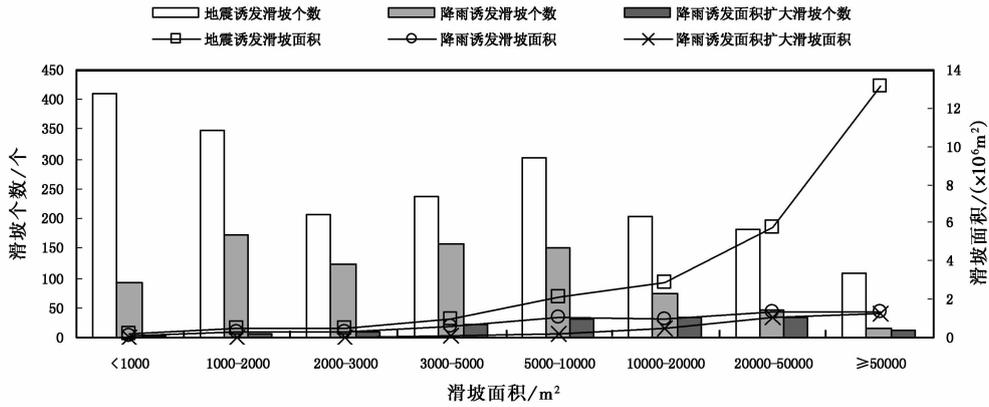


图6 滑坡规模耦合关系图

Fig. 6 The number of landslide and the coupling relationship figure

面积 $\geq 10000\text{m}^2$ 的就有81个,占54%,其中滑坡面积 $\leq 3000\text{m}^2$ 的16个,仅占10.7%。

## 6.2 滑坡控制因子耦合分析

通过分析2类滑坡与5个控制因子、26个属性段关系表明:不同控制因子或相同控制因子的不同属性对滑坡的敏感度都是不同的。在以上分析基础之上,建立地震诱发滑坡与降雨诱发滑坡耦合关系图(图7),重点分析地震诱发滑坡和降雨诱发滑坡与控制因子耦合关系异同点,得出如下规律:

(1)地形坡度:地震诱发滑坡和降雨诱发滑坡均是在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 范围值内滑坡面积最大,降雨诱发滑坡面积百分比也是在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的范围值内最大(图7-地形坡度),说明降雨诱发滑坡面积和滑坡面积百分比具有较好的一致性, $30^\circ \sim 50^\circ$ 属性段具有较高的敏感度。与降雨不同,地震诱发滑坡面积百分比随地形坡度增大而增大,在强大地震力作用下,地形坡度越大,越易发生滑坡。

(2)地层岩性:地层岩性控制因子对地震诱发滑坡、降雨诱发滑坡的规律具有一致性。滑坡多分布在风化强烈,抗剪能力差软质岩中。比如:千枚岩、砂岩、碳酸盐岩。

(3)距断层距离:映秀—北川断裂位于前龙门山褶皱带与后龙门山褶皱带的分界线上,是引起汶川地震发震的主要断裂。距断层距离 $\leq 4000\text{m}$ 的范围内,地震诱发滑坡和降雨诱发滑坡分布较集中,具有一致的分布规律(图7-距断层距离)。

(4)海拔高度:地震诱发滑坡和降雨诱发滑坡多分布于 $\leq 1400\text{m}$ 的高度范围内,2类滑坡所对应的滑坡面积百分比也较大。但是,地震诱发滑坡曲线变化率大,对控制因子具有较高的敏感度,而降雨

诱发滑坡的曲线平缓,相对来说对控制因子敏感度较低。

(5)地震烈度:地震诱发滑坡、降雨诱发滑坡的滑坡面积和滑坡面积百分比都是随地震烈度的增大而增大(图7-地震烈度),两者对地震烈度因子耦合性呈正相关,这和一般规律也具有较好的一致性。

同时,地震诱发滑坡与后续降雨诱发滑坡耦合关系有很好的继承性、传递性、放大性,表现为地震与降雨耦合灾害链效应。图8为北川县城附近滑坡灾害链集成效应图,“5·12”地震触发大量滑坡,包括唐家山滑坡、新北川中学滑坡和王家岩滑坡。其中唐家山滑坡规模最大,滑坡体堵截湔江形成堰塞湖。唐家山滑坡主滑体长约800m,宽约600m,后缘距原河床约130m,总方量约 $3500 \times 10^4 \text{m}^3$ ,是堰塞坝的主体;滑坡体后缘为一高陡滑坡壁,两侧为侧滑体和高位崩塌体。堰塞湖的堰塞库容约 $3.16 \times 10^9 \text{m}^3$ ,对上游禹里、漩坪两乡造成很大的淹没损失。地震导致斜坡产生大量地裂缝和坡体结构破坏,为“9·24”降雨触发滑坡和群发性泥石流提供了条件,包括唐家山滑坡左侧大水沟泥石流,大水沟泥石流冲出堆积物堵江形成堰塞湖,再次造成次生灾害。以上地震与降雨耦合灾害链模式可以总结为:地震作用 $\rightarrow$ 滑坡、地裂缝、坡体稳定性破坏 $\rightarrow$ 堰塞湖、不稳定斜坡、危岩体 $\rightarrow$ 降雨作用 $\rightarrow$ 新增滑坡、面积扩大滑坡、洪水、泥石流 $\rightarrow$ 堰塞湖 $\rightarrow$ 洪水、泥石流(图9)。

## 7 结论

(1)地震和后续降雨都是诱发滑坡等次生灾害的动力成因。“5·12”地震诱发滑坡数量较多,是

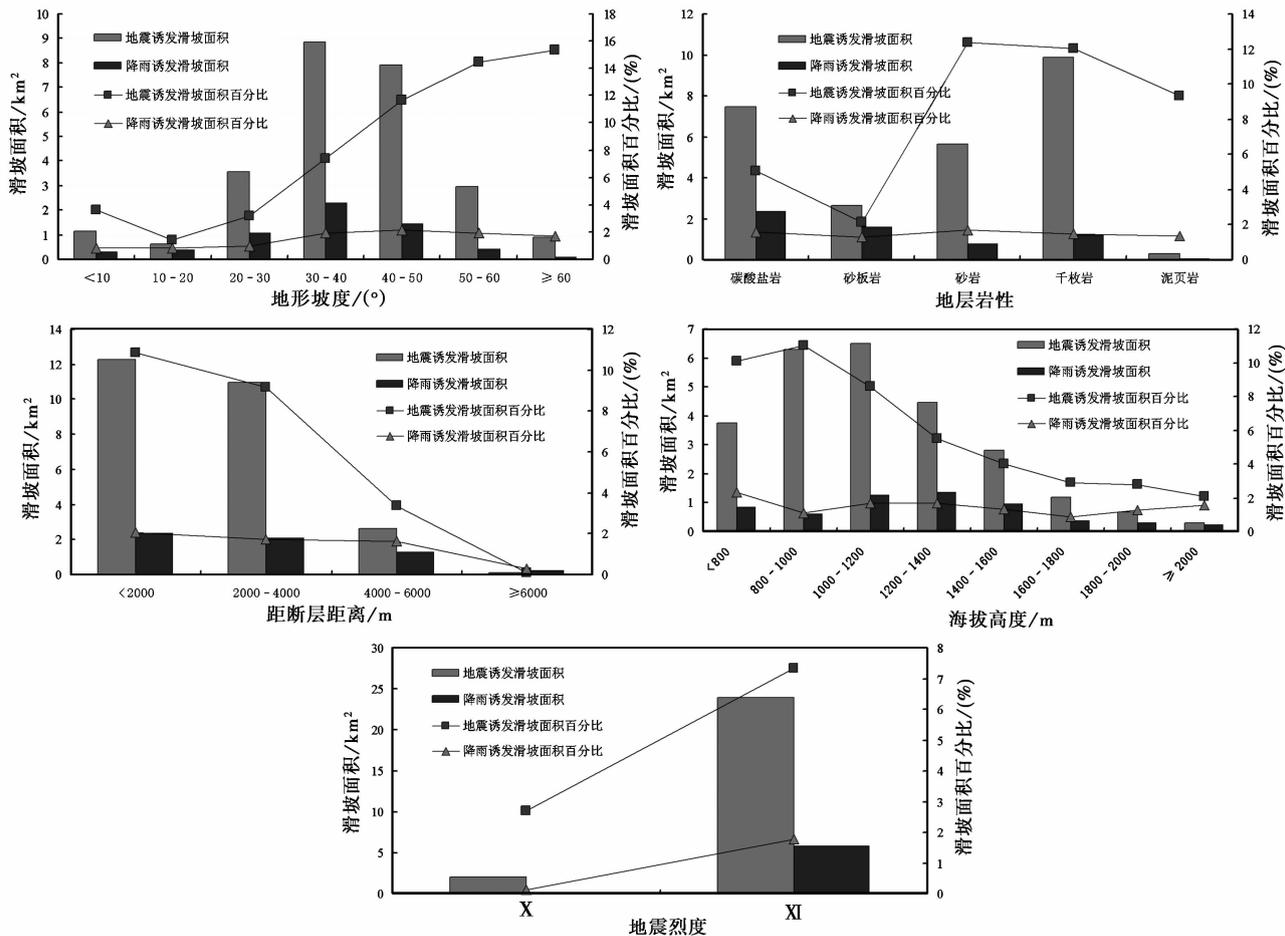


图7 地震诱发滑坡与降雨诱发滑坡控制因子耦合关系图

Fig. 7 Earthquake-induced landslides and rainfall-induced landslides control factor coupling relationship figure

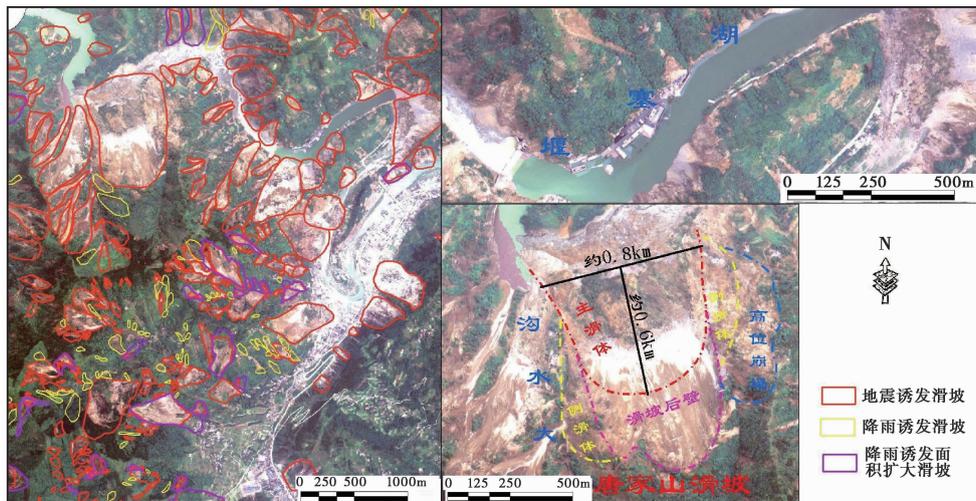


图8 滑坡灾害链集成图

Fig. 8 Landslide disaster chain integration figure

“9·24”降雨诱发滑坡的2.4倍,是“9·24”降雨诱发面积扩大滑坡的13.3倍;“9·24”降雨诱发滑坡面积是“5·12”地震诱发滑坡面积的1/4倍,“9·24”降

雨诱发滑坡数量增加了41.4%;同时,“9·24”降雨不仅诱发新增滑坡,而且促使原地震滑坡复活,并扩大其滑坡面积,“9·24”降雨导致原地震滑坡扩大了

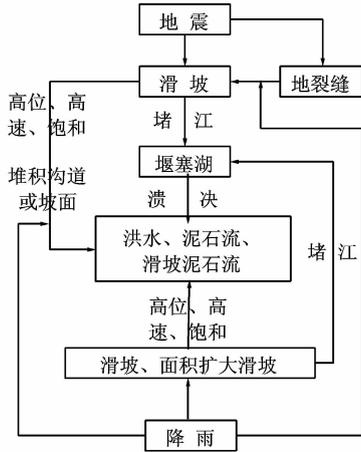


图9 地震与降雨耦合灾害链模式

Fig. 9 The earthquake and rainfall coupling disasters chain mode

原来面积的 68.7%。

(2)地震和后续降雨诱发滑坡单体规模分布格局不同。“5·12”地震诱发滑坡单体规模呈均匀分布,既有大型滑坡也有中小型滑坡,且数量相当;“9·24”降雨诱发滑坡单体规模呈正态分布,以中型滑坡为主,大型和小型滑坡相对较少;“9·24”降雨导致原地震诱发滑坡面积扩大的滑坡以较大型滑坡为主,中小型滑坡相对偏少。

(3)地震诱发滑坡与后续降雨诱发滑坡控制因子耦合关系表明:不同控制因子或相同控制因子的不同属性对滑坡的敏感度都是不同的。针对2类滑坡,5个控制因子,26个因子属性段的耦合关系分析得出,地震诱发滑坡与降雨诱发滑坡分布规律既具有一致性又具有差异性。

一致性表现在:2类滑坡多分布于地形坡度为 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 属性段内;2类滑坡分布都随距断层距离的增加,滑坡数量减少,滑坡面积百分比降低;2类滑坡大多分布在小于1500m的海拔高度范围内;2类滑坡多发育于千枚岩、碳酸盐岩、砂岩等软质岩层中;2类滑坡分布面积都随地震烈度增大呈递增趋势。

差异性表现在:地形坡度中,降雨诱发滑坡面积和滑坡面积百分比具有较好的一致性, $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 为降雨诱发的滑坡的高敏感分布区,而地震诱发滑坡的滑坡面积百分比是随地形坡度的增大而增大的,这是地震诱发滑坡的自身特征决定的;距断层距离、海拔高度、地层岩性、地震烈度4个控制因子中,地震诱发滑坡的曲线变化率大,滑坡面积百分比变化大,对控制因子具有较高的敏感度,而降雨诱发滑

坡的曲线平缓,对控制因子敏感度相对较低。

(4)地震诱发滑坡与后续降雨诱发滑坡耦合关系有很好的继承性、传递性、放大性。地震与降雨耦合灾害链模式可以总结为:地震作用→滑坡、地裂缝、坡体稳定性破坏→堰塞湖、不稳定斜坡、危岩体→降雨作用→新增滑坡、面积扩大滑坡、洪水、泥石流→堰塞湖→洪水、泥石流。

(5)由于地震作用,山体变的疏松,大量松散碎屑物质堆积在山坡坡面或沟道内,具有潜在发生滑坡或泥石流灾害的可能性,一旦遇到降雨,滑坡或泥石流灾害一触即发,且这种影响会持续5~10a。

## 参 考 文 献

- [1] 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 Runqiu. Characteristics of geological disasters of 5.12 Wenchuan earthquake and recommendation on its impact on reconstruction. Chinese Geological Education, 2008, (2): 21~24.
- [2] 何宏林, 孙昭民, 王世元, 等. 汶川 MS 8.0 地震地表破裂带[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 359~362.  
He Honglin, Sun Zhaomin, Wang Shiyuan, et al. Rupture of the Ms8.0 Wenchuan earthquake. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 359~362.
- [3] 齐信. 基于3S技术强震区地质灾害解译与危险性评价研究——以四川省北川县为例[D]. 成都:成都理工大学, 2010, 1~99.  
Qi Xin. Research on Interpretation and Hazard Assessment of Geohazards in Strong Earthquake Area Using 3S Technology—A Case Study in Beichuan County of Sichuan Province. Chengdu; Chengdu University of Technology, 2010, 1~99.
- [4] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震震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): 1~8.  
Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 1~8.
- [5] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433~444.  
Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433~444.
- [6] 陈晓利, 李传友, 王明明, 等. 断裂带两侧地震诱发滑坡空间分布差异性的主要影响因素研究——以北川地区的地震滑坡分布为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(3): 737~746.  
Chen Xiaoli, Li Chuanyou, Wang Mingming, et al. The main factors causing the seismic landslide distribution difference on two sides of the faults—A case study of landslide distribution in Beichuan area. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(3): 737~746.

- [7] 齐信, 唐川, 铁永波, 等. 基于 GIS 技术的 5·12 汶川地震诱发地质灾害危险性评价——以四川省北川县为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, **37**(2): 160~167.  
Qi Xin, Tang Chuan, Tie Yongbo, et al. Hazard assessment of geohazards triggered by the 5.12 Wenchuan earthquake using Gis technology—A case study in Beichuan county of Sichuan province. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2010, **37**(2): 160~167.
- [8] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 818~826.  
Xu Qiang, Li Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 818~826.
- [9] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 730~741.  
Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Li Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 730~741.
- [10] Tang C, Zhu J, Li W L. Rainfall triggered debris flows after Wenchuan earthquake. Bull. Eng. Geol. Environ., 2009, **68**: 187~194.
- [11] Lin CW, Liu SH, Lee SY, et al. Impacts on the Chi-Chi earthquake on subsequent rain-induced landslides in central Taiwan. Engineering Geology, 2006, **86**(2-3): 87~101.
- [12] Yin YP, Wang FW, Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Landslides, 2009, **6**: 139~151.
- [13] Chen H, Hawkins AB. Relationship between earthquake disturbance, tropical rainstorms and debris movement: an overview from Taiwan. Bull. Eng. Geol. Environ., 2009, **68**: 161~186.
- [14] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, **6**(1): 7~17.  
Chai Hejun, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan. Landslide dams induced by Diexi earthquake in 1933 and its environmental effect. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995, **6**(1): 7~17.
- [15] 许强. 四川省8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(5): 596~608.  
Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(5): 596~608.
- [16] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011, **36**(1): 172~180.  
Tang Chuan, Li Weile, Ding Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu town, epicenter of Wenchuan earthquake. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2011, **36**(1): 172~180.
- [17] <http://www.sklgp.com/d-1/efault.aspx?id=9&subid=9&newsid=248>.