

“4·20”芦山地震崩塌滑坡与公路危险性评价 ——以宝兴县省道 S210 沿线为例

张建强 苏凤环 范建容

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 以芦山地震重灾区宝兴县境内省道 S210 沿线为研究区, 利用高分辨率航片, 对沿线地震诱发崩塌滑坡进行判识, 并通过分析地形、地层岩性及震中距等因子, 探讨公路沿线崩塌滑坡的分布规律, 进而利用确定性系数和频率比例法对地震诱发崩塌滑坡的易发性进行评价, 最终通过沿线崩塌滑坡易发性分析结果对道路断道的危险性进行评价。研究结果发现: 省道 S210 沿线芦山地震造成的坡面破坏以中小型崩塌为主, 高程集中在 750 ~ 1 500 m, 坡度多位于 30° ~ 60°, 且位于西、南西和北西坡向的崩塌滑坡较多, 岩性以硬岩和软硬相间岩层为主, 研究区距震中 19 ~ 21 km 的距离为崩塌滑坡集中分布区域。崩塌滑坡高易发区和较高易发区主要位于研究区的北段, 南段公路同侧也有分布, 较低和低易发区位于中段宽谷路段。

关键词: “4·20”芦山地震; 崩塌滑坡分布; 确定性系数; 易发性

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

2013 - 04 - 20 四川省芦山县 Ms7.0 级地震(简称“4·20”芦山地震或芦山地震), 震区地处山区, 地震诱发了大量的次生山地灾害, 通过野外考察与遥感调查, 地震诱发了 1 460 余处崩塌和滑坡及大量坠石和 4 处堰塞湖^[1]。与汶川地震相同, 地震诱发的崩塌滑坡(即地震崩塌滑坡)成为阻断交通的主要灾害^[2]。此外, 震后由于余震或降雨造成落石和崩塌, 对救援车辆和人员造成危害和伤亡。

本研究以芦山地震重灾区宝兴县境内省道 S210 为例, 研究公路沿线地震诱发崩塌滑坡分布规律及危险性评价。

1 研究区概况

省道 S210 线北起阿坝藏族羌族自治州马尔康县卓克基与 G317 线接道, 南至芦山县飞仙关镇与 G318 线连接, 全长约 349 km, 是连接芦山县县城和

宝兴县城的重要通道。“4·20”芦山地震后, S210 沿线多处发生崩塌滑坡, 致使道路中断, 雅安至芦山县城段于 4 月 20 日晚打通, 而芦山县城至宝兴县城段则在 4 月 21 日打通。本文选取宝兴县城至堰头溪约 32 km 路段, 公路两侧扩展 1 km 的廊道作为研究区, 面积为 59.04 km²。

1.1 地貌

宝兴县地处四川盆地与青藏高原东南缘的过渡地带, 为龙门山断裂带强烈侵蚀斜坡式中山区, 地形变化总趋势为西北高东南低。S210 线位于灵关河河谷, 呈南北向延伸, 道路的高程 700 ~ 1 100 m, 其中堰头溪至青林坪段 900 ~ 1 100 m, 青林坪经灵关镇至小关子段, 高程主要在 800 ~ 900 m, 而小关子至宝兴县城, 高程逐渐升高, 基本处于 900 ~ 1 100 m。

1.2 地质构造

宝兴县地处四川台向斜与川西地槽的交接带,

收稿日期(Received date): 2013 - 06 - 09; 改回日期(Accepted): 2013 - 06 - 19。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目“川藏交通干线环境灾害演化规律与工程风险”(No. 41030742) 和中国科学院重点部署项目“泥石流动力过程及其调控模拟”(KZZD - EW - 05 - 01)。[The National Science Foundation(Grant No. 41030742); Key project of Chinese Academy of Science(Grant No. KZZD - EW - 05 - 01) .]

作者简介(Biography): 张建强(1982 -) 男, 博士, 助理研究员, 主要从事灾害遥感与山地灾害评价研究。[Jianqiang Zhang (1982 -) : Ph. D , Research Assistant , Specialized in mountain hazards remote sensing and assessment.] E - mail: zhangjq@imde. ac. cn



图 1 研究区位置示意图
Fig. 1 Location map of study area

是扬子古陆西北缘。东部受北东向龙门山构造带控制,西部属金汤弧形构造带的前弧东翼。宝兴县地层出露较全,从下元古界至第四系的松散地层均有出露。公路沿线地层包括第三系芦山组、名山组,白垩系夹关组,三叠系须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组,二叠系茅口组,泥盆系观雾山组、养马坝

组、甘溪组,震旦系灯影组以及下元古界康定岩群(表 1)

1.3 气候

研究区具有亚热带气候特点,雨量充沛,暴雨强度大,据宝兴气象站资料,多年平均降雨量为 1 101.5 mm,最大年降雨量为 1 279.0 mm,最大日降雨量为 123.5 mm,最大 3 h 降雨量为 80.8 mm。自北向南,雨量逐渐递增。宝兴县水文站实测最大年降雨量 1 526.0mm,最大日降雨量 125.6 mm,最大 3 h 降雨量 100.0 mm;灵关雨量站实测年最大降雨量为 1 726.9 mm,最大日降雨量为 158.1 mm^[3];研究区南侧毗邻芦山县,该区域最大年降雨量 1 717.3 mm,最大日降雨量为 188 mm,最大 1 h 降雨量为 86 mm,最大 10 min 降雨量 30.1 mm^[4]。

2 崩塌滑坡遥感判识

2.1 数据源

芦山地震发生后,四川省测绘地理信息局测绘应急保障中心对灾区进行了无人机拍摄,获取了研究区真彩色航空影像,空间分辨率为 0.5 m,拍摄时间为 2013-04-25—04-27。

2.2 崩塌滑坡解译方法

由于研究区植被发育较好,芦山地震后崩塌滑坡造成地表破坏,形成裸地,与周边土地覆被差别大,在影像上容易判识。从形状看,位于高差大坡面

表 1 研究区省道 S210 沿线地层岩性^[3]
Table 1 Stratum and lithology along S210 highway

地 层 时 代			岩 石 类 型
系	统	群(组)	
第三系(E)	渐新统(E ₃)	芦山组(E ₃ l)	灰色砾岩夹岩屑砂岩透镜体
	始新统(E ₂)	名山组(E ₁₋₂ mn)	棕红色泥岩夹少许薄层粉砂岩
	古新统(E ₁)		
白垩系(K)	上统(K ₂)	夹关组(K ₂ j)	灰质砾岩夹细砂岩、粉砂岩及少许泥岩
	上统(T ₃)	须家河组(T ₃ xj)	棕红色泥、钙质粉砂岩、细砂岩、砂岩夹泥岩及钙质岩屑砂岩互层
三叠系(T)	中统(T ₂)	雷口坡组(T ₂ l)	紫红色、灰色薄层—中厚层状白云岩夹灰岩、白云质角砾岩
	下统(T ₁)	嘉陵江组(T ₁ j)、飞仙关组(T ₁ f)	白云岩、泥质白云岩夹灰岩、白云质角砾岩、粉砂夹砂页岩、白云岩
	二叠系(P)	茅口组(P ₁ m)	深灰色中厚层状石灰岩、白云质灰岩;底部有少许页岩、粉砂岩
泥盆系(D)	中统(D ₂)	观雾山组(D ₂ gw)、养马坝组(D ₂ y)	灰色白云岩、泥质白云岩夹灰岩、灰岩夹页岩
	下统(D ₁)	甘溪组(D ₁ g)	泥岩、泥灰岩、中—厚层状石英砂岩夹粉砂岩及灰岩
震旦系(Z)	上统(Z ₂)	灯影组(Z ₂ dl)	灰白色葡萄状白云岩,底部少许含砾砂岩,
下元古界(Pt ₁)		康定岩群(Pt ₁ K)	浅灰色中细粒黑云斜长变粒岩、黑云角闪变粒岩、黑云二长变粒岩、斜长角闪岩等

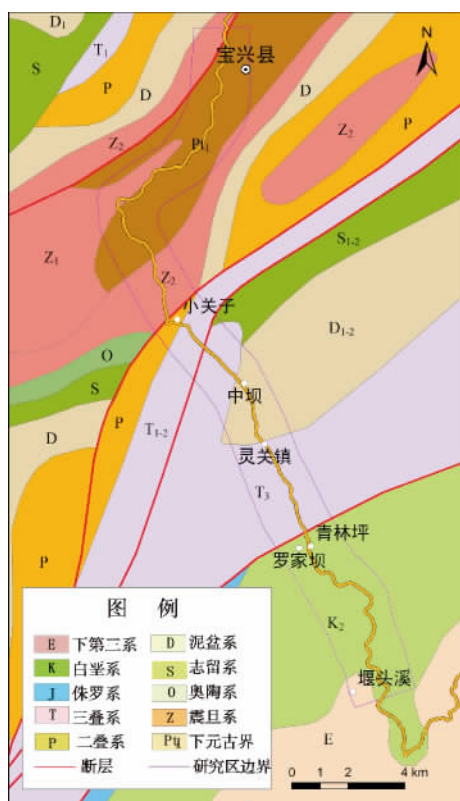


图2 研究区地质简图

Fig.2 Geographic map

长的小规模崩塌,崩塌体物质沿坡面向坡脚运移,成狭长的细条状,规模较大的崩塌宽度大,影像上可判识出物源区、运移区和堆积区范围(图3(a)),崩塌滑坡空间分布有聚集的特征,往往形成崩塌滑坡群(图3(b))。位于高差较小的坡面下部或人工边坡上的崩塌滑坡,形状多呈锥形。在影像的色调上,岩质的崩塌滑坡后缘形成新的断面,一般亮度较大,而对于土质的崩塌滑坡,则受崩塌滑坡体含水量的影响,含水量较高的崩塌滑坡体,色调相对较暗。崩塌滑坡的堆积区多由破碎的石块构成,在高分辨率的航片上呈现出一定的纹理,这也是崩塌滑坡判识的标志之一。

研究区内分布有农田和伐木场形成的裸地,易被误判为崩塌滑坡。农田边缘较规则,耕作的农田上有农作物形成的规则花纹,未耕作的农田较为平整,颜色均一,但二者均不会出现崩塌滑堆积体的花纹。此外,农田位于地势低坡度缓的区域,因而坡度也是区分耕地与崩塌滑坡的重要参考(图3(c),(d))。伐木场场内分布有木桩形成规则的花纹,或有砍伐的树木有序的摆放,树木的枝叶多砍去,与崩塌滑坡造成的林木翻倒截然不同。

除此之外,利用震前震后的遥感影像进行对比,也可提高崩塌滑坡判识的精度。

利用上述判识方法,在研究区内解译出崩塌滑坡共计381处,以中小型崩塌为主,崩塌滑坡造成的地表破坏面积为0.81 km²,其中45处崩塌滑坡造成S210线不同程度的堵塞。

3 崩塌滑坡的分布

对S210沿线崩塌滑坡进行空间统计,研究区内其密度最大可达26.79处/km²。整体来看,北段宝兴县城至小关子段为崩塌滑坡的高密度区,该段多个区段到达25处/km²,其次为青林坪至堰头溪,崩塌滑坡密度17处/km²,中段小关子到青林坪为宽谷地带,崩塌滑坡的分布密度低,只有灵关镇北部路段内,崩塌滑坡密度达到13处/km²(图4)。

4 崩塌滑坡危险性评价

4.1 因子分析

4.1.1 确定性系数法

采用确定性系数模型(CF)对地震诱发崩塌滑坡影响因子敏感性分析^[5]。CF作为一个概率函数,表示为

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{if } PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{if } PP_a \leq PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 PP_a 为崩塌滑坡面积占该因子分段的区域面积的百分比,代表崩塌滑坡在某一因子分段内的发生概率; PP_s 为崩塌滑坡在整个研究区的面积比例,代表崩塌滑坡在全区的发生概率。

在进行CF值计算时,首先将因子数据层(如地形因子、地层岩性、距震中的距离等)按一定规则划分为不同的等级或类别,然后利用遥感判识的崩塌滑坡,计算因子层不同等级或类别中崩滑的面积。最后,由公式(1)进行CF的计算,确定因子层的每一数据类对于崩滑发生的影响程度。公式(1)计算的CF值的变化区间为[-1, 1], $CF > 0$,表示崩滑滑坡发生的可能性较高; $CF < 0$,则表示崩滑滑坡发生的可能性较低; $CF = 0$,崩塌滑坡发生与不发生的概率很接近。

4.1.2 因子确定性系数值

对崩塌滑坡在各个指标不同分段内的分布面积

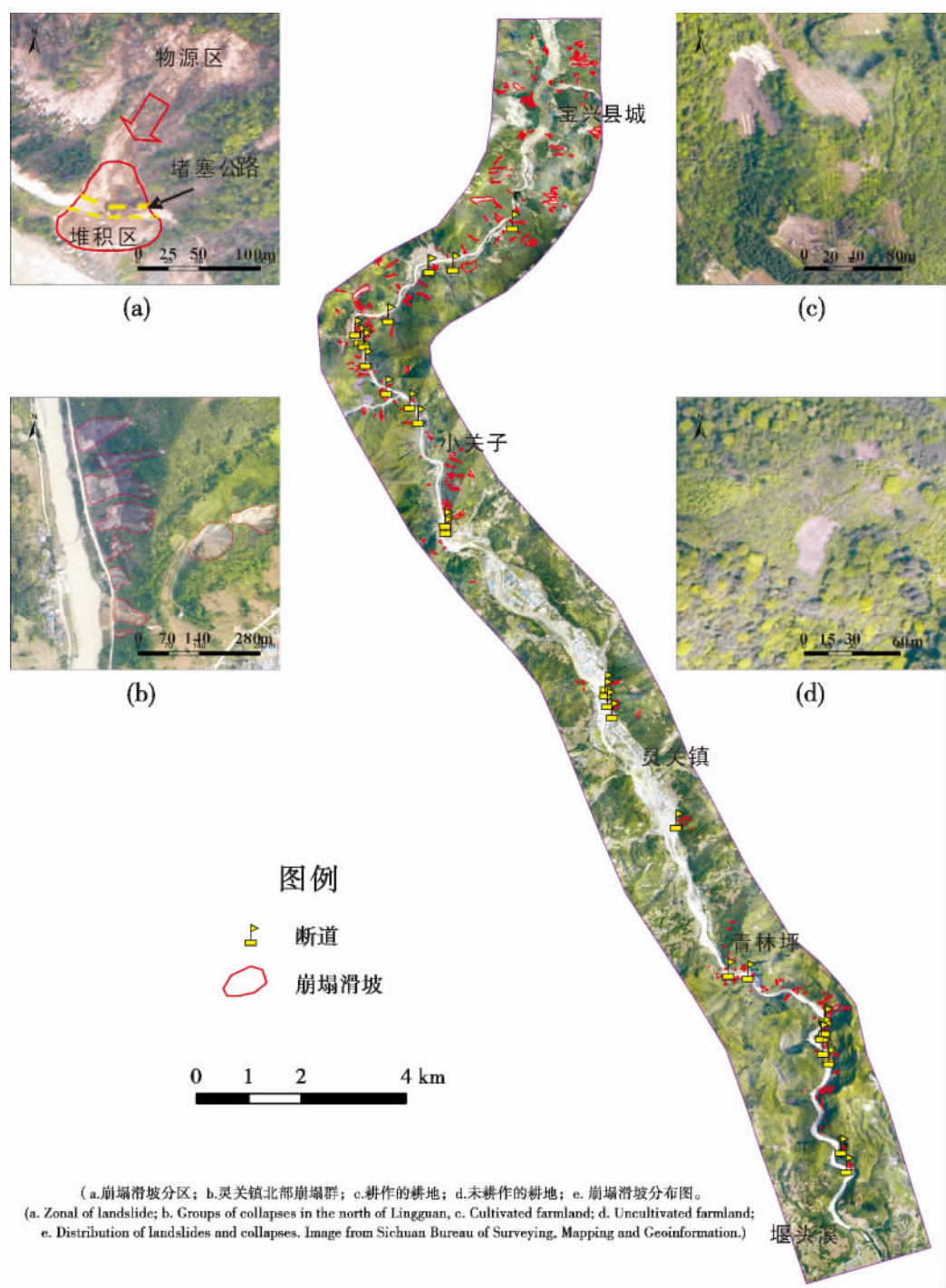


图 3 宝兴县省道 S210 航片与崩塌滑坡解译

Fig. 3 Aerial terpretation landslide and collapse in along S210 highway in Baoxing

进行统计(表 2)。地形选取高程、坡度、坡向等因子。高程是划分地貌类型的重要因子之一,高程影响地貌的发育。从地震波的传播来看,地震波向上传播到地表时,随着高程的增加,波的振幅也增加,从而影响崩塌滑坡的发生^[6]。对研究区高程按照 250 m 的间隔划分等级,其中 750~1 000 m,1 000~1 250 m,1 250~1 500 m 三个高程段崩塌滑坡发生

面积较大,1 000~1 250 m 高程段内崩塌滑坡面积最大。地形因子中,对地震崩塌滑坡影响最大是坡度^[7]。研究区地震崩塌滑坡主要分布在 30°~40°,40°~50°和 50°~60°三个坡度段内,占崩塌滑坡总面积的 76.78%,其中 40°~50°的坡度区域内崩塌滑坡的面积最大。不同坡向的坡体与地震波传播的方向夹角不同,影响地震动能量的衰减,从而影响崩

表 2 不同因子分段的 CF 值统计表

Table 2 CF values of each factor

一级指标	二级指标	分级	区域面积/hm ²	崩塌滑坡面积/hm ²	崩塌滑坡比例/%	CF 值
地形	高程/m	700 ~ 750	78.62	0.10	0.13	-0.901 4
		750 ~ 1 000	2 549.26	27.28	1.07	-0.221 1
		1 000 ~ 1 250	1 918.85	35.11	1.83	0.248 0
		1 250 ~ 1 500	1 115.46	16.06	1.44	0.046 2
		1 500 ~ 1 750	216.90	2.36	1.09	-0.201 3
		1 750 ~ 2 000	24.73	0.00	0.00	-1.000 0
		≥2 000	0.16	0.00	0.00	-1.000 0
		0 ~ 10	918.35	0.83	0.09	-0.932 3
		10 ~ 20	537.01	0.75	0.14	-0.893 9
		20 ~ 30	896.80	4.66	0.52	-0.617 0
	坡度/°	30 ~ 40	1 405.75	16.45	1.17	-0.145 9
		40 ~ 50	1 289.37	24.88	1.93	0.285 3
		50 ~ 60	591.87	20.77	3.51	0.600 3
		60 ~ 70	211.8	9.91	4.68	0.696 9
		70 ~ 80	50.26	2.52	5.01	0.716 4
		80 ~ 90	2.77	0.07	2.44	0.431 0
		平地	592.54	0.53	0.09	-0.933 0
		北	505.01	6.51	1.29	-0.061 4
		北东	610.42	5.86	0.96	-0.297 1
		东	789.13	7.50	0.95	-0.304 8
	坡向	南东	793.62	5.71	0.72	-0.470 5
		南	576.46	5.30	0.92	-0.330 0
		南西	632.12	16.62	2.63	0.471 1
		西	774.83	20.92	2.70	0.484 5
		北西	629.84	11.97	1.90	0.273 8
		软岩	87.41	0.01	0.01	-0.991 5
		软硬相间	3 560.97	28.84	0.81	-0.409 4
地质	岩性	硬岩	2 254.72	52.31	2.32	0.403 3
		16 ~ 17	570.40	6.62	1.16	0.403 3
	距震中距离/km	17 ~ 18	1 285.43	11.18	0.87	-0.151 0
		18 ~ 19	1 410.48	6.63	0.47	-0.359 7
		19 ~ 20	1 052.80	18.85	1.79	-0.651 2
		20 ~ 21	940.84	21.64	2.30	0.231 3
		21 ~ 22	473.57	11.60	2.45	0.396 8
		22 ~ 23	170.77	4.37	2.56	0.434 8

塌滑坡的发生,研究区西向的坡面(西、南西和北西向)发生崩塌滑坡面积较大,其中位于西向坡面的崩塌滑坡面积最大。

地质因素。根据研究区岩性及岩层组合,划分为软岩、软硬相间和硬岩三类,发生在硬岩岩层的崩塌滑坡占崩塌滑坡总面积的 64.58%,发生于软硬相间岩层的崩塌滑坡占崩塌滑坡总面积的 35.41%,位于软岩岩层的崩塌滑坡仅占崩塌滑坡总

面积的 0.01%。

地震因素按距震中距离进行统计。地震诱发崩塌滑坡受地震能量的影响,随着距震中或活动断层距离的增加,地震能量也逐渐衰减,因而崩塌滑坡的发生与震中或活动断层距离呈现出反相关。由于研究区面积相对较小,且离震中较近,处于距震中 16 ~ 23 km 内,受地震的影响较强,而区内地貌类型变化大,有极易发生崩塌滑坡深切河谷段,也有不具发

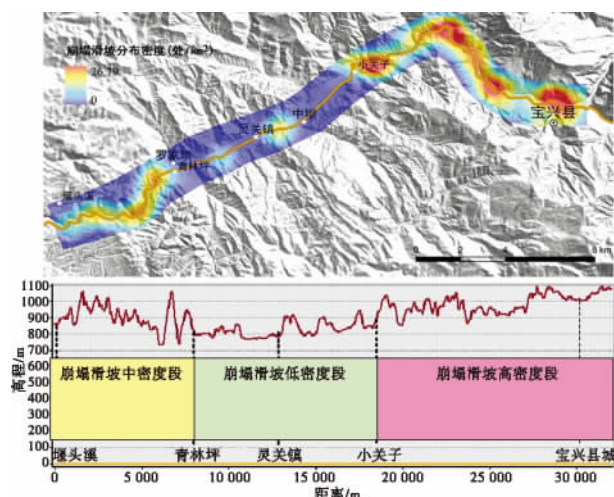


图4 宝兴县省道 S210 线地震诱发崩塌滑坡密度分布图

Fig.4 Density of landslides and collapses induced by Lushan earthquake along S210 in Baoxing

生崩塌滑坡的地形条件宽谷段,加上地层岩性的综合作用,使得崩塌滑坡面积在一些高程段内出现波动,随震中距离衰减的趋势不显著。

利用公式(1)对各个指标不同分段的 CF 值进行计算,获取崩塌滑坡对每个因子段的敏感度(表2)。研究区内地震崩塌滑坡,在 1 000 ~ 1 250 m 和 1 250 ~ 1 500 m 高程段内较为敏感;崩塌滑坡与坡度的相关性呈正相关,坡度越大,崩塌滑坡越敏感,特别是在坡度大于 40°以后,崩塌滑坡发生的可能性较大,坡度在 80°~90°时,相关性相对降低,但 CF 值仍为正值,说明崩塌滑坡仍有较高的可能性发生;西、南西、北西向的坡面对崩塌滑坡较为敏感;对于岩性,硬岩的 CF 值为正值,说明崩塌滑坡对硬岩的岩层敏感;对于距震中距离,崩塌滑坡在 20 ~ 21 km 21 ~ 22 km 和 22 ~ 23 km 段内更为敏感。

4.2 崩塌滑坡易发性与危险性评价

对地震诱发崩塌滑坡的易发性评价方法较多,包括专家经验法、物理模型法、统计学方法等,频率比例法(公式2)是统计学方法中最为快捷而有效的方法,多位学者将此方法应用于崩塌滑坡的易发性评价中,取得较好的评价结果^[8-11]

$$LSI = \sum Fr \quad (2)$$

式中 LSI 为崩塌滑坡易发度,Fr 为在每一个因子分段内崩塌滑坡面积比例。

本研究中,在因子分析时,使用了确定性系数来分析崩塌滑坡与因子分段的相关关系,在评价时利用 CF 值来代替每一个因子分段内崩塌滑坡面积比例,即

$$LSI = \sum CF \quad (3)$$

在对研究区崩塌滑坡分布现状统计和分析的基础上,利用公式(3)进行地震诱发崩塌滑坡易发性的评价,评价结果见图 11,并对易发性评价的结果进行统计(表3)。

研究区内崩塌滑坡的高易发区和较高易发区位于省道 S210 的北段,中段灵关镇附近和南段也有易发区的分布,其面积分别为 10.40 km² 和 14.92 km²,占研究区总面积的 42.88%,区内崩塌滑坡共 326 处,占崩塌滑坡面积总数的 85.56%。道路同侧(灵关河左岸)的高易发区多于道路异侧(灵关河右

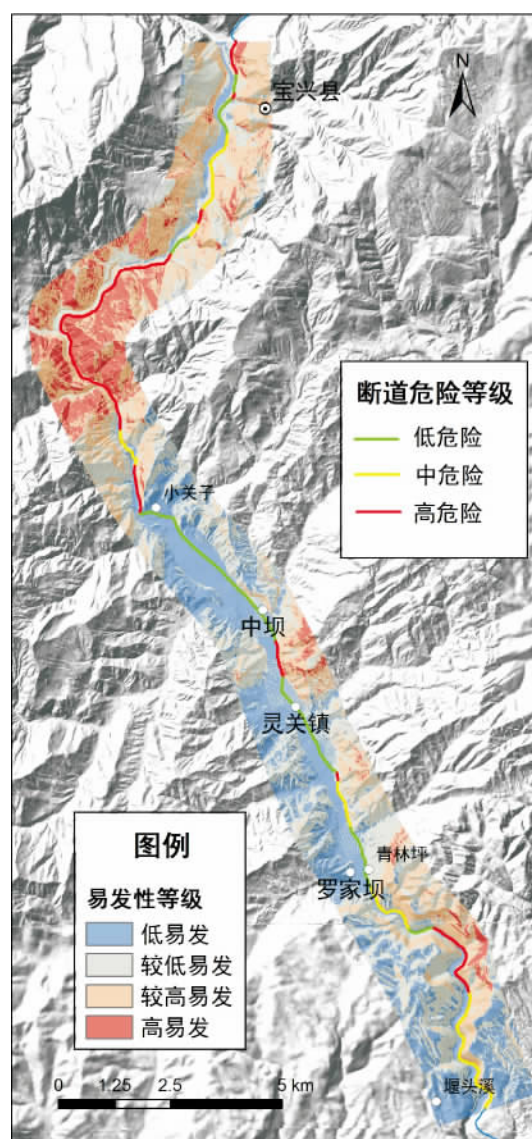


图5 宝兴县境内省道 S210 线崩塌滑坡易发性与道路危险程度评价

Fig.5 Landslides and collapses susceptibility and hazard assessment to S210 highway in Baoxing

岸)。较低易发区和低易发区主要位于研究区中段的宽谷地带及南段的地形相对平缓区域。

表 3 研究区崩塌滑坡易发性评价结果统计表

Table 3 Statistic for the result of susceptibility assessment for landslides and collapses induced by Lushan earthquake

易发性等级	分布面积 /km ²	面积比例 /%	灾害数量 /处	灾害密度 /(处/km ²)
高易发	10.40	17.61	178	17.12
较高易发	14.92	25.27	148	9.92
较低易发	17.28	29.27	49	2.84
低易发	16.44	27.85	6	0.36

根据崩塌滑坡易发性评价结果,对道路潜在遭受断道的危险程度进行评价,评价的原则为:公路穿过崩塌滑坡高易发区以及穿过较高易发区,但公路同侧坡面上有崩塌滑坡高易发区分布的,该路段评价为高危险路段;公路穿过崩塌滑坡较高易发区以及公路同侧坡面上为崩塌滑坡较高易发区时,该路段评价为中度危险路段;其他情况,主要包括公路穿过较低易发或低易发区,公路同侧坡面也无崩塌滑坡高易发区和较高易发区分布的路段,视为低危险路段。对研究区内省道 S210 路段进行断道危险性的评价结果显示,高危险路段长度为 11.64 km,中度危险的路段长度为 9.09 km,低危险的路段长为 11.27 km(图 5)。利用已发生的道路堵塞点对评价结果进行验证,统计发现 45 处断道点中 37 处位于高危险路段 8 处位于中度危险路段,在低危险路段没有分布。位于中度危险路段的 8 处堵塞点,多为小规模边坡坍塌,说明崩塌滑坡易发性评价时,对小型边坡的评价精度有限,主要依赖于易发性评价时使用地形数据的比例尺和数据的精度。

5 结论与讨论

芦山地震诱发的次生山地灾害以中、小规模崩塌为主,滑坡数量相对较少,崩塌滑坡在空间上成群分布,分布规律主要表现在:高程集中在 750 ~ 1 000 m,坡度多位于 30° ~ 60° 间,位于西、南西和北西向坡向的崩塌滑坡较多,岩性以软硬相间和硬岩岩层为主,距震中 19 ~ 21 km 的区域内崩塌滑坡分布集中。

以芦山地震已发生的崩塌滑坡的分布规律和活

动特征为参考,对道路沿线进行崩塌滑坡易发性的评价,评价结果既对已发生的崩塌滑坡特征的展示,同时也是对容易发生崩塌滑坡的不稳定坡体的预测。根据道路穿过区域的崩塌滑坡易发性评价的结果,可以进一步对道路遭受崩塌滑坡形成断道的危险程度的评价。对于高易发性区域的坡体,可以进行有针对性的隐患点的排查,确定地震造成的潜在的不稳定坡体,并应加强进行防护和巡查,防止在余震或降雨的作用下,这些坡体发生失稳而形成新的崩塌滑坡。

此外,研究区震前即为泥石流的活跃区域。芦山地震在公路两侧流域内的坡面诱发的崩塌滑坡,这些崩塌滑坡虽未对公路产生直接的破坏,但为泥石流的发生提供丰富的松散固体物质,增强了泥石流的活跃性,在进入雨季后,研究区极易发生群发性泥石流,对公路造成破坏,对过往车辆的安全造成威胁。因而对公路沿线泥石流的排查、评价与防治,也是灾后重建工作中的重要工作。

参考文献(References)

[1] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhang Jianqiang, et al. Activities and tendency of mountain hazards induced by the Ms7.0 Lushan earthquake, April 20, 2013 [J]. Journal of Mountain Science, 31(3): 257-265 [崔鹏, 陈晓清, 张建强, 等. “4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势分析 [J]. 山地学报, 31(3): 257-265]

[2] Cui Peng. Mountain hazards induced by Wenchuan Earthquake and challenges in Reconstruction [G]//Proceedings of Centennial celebration for The geographical society of China. Beijing 2009. [崔鹏. 汶川地震次生山地灾害与灾后重建的挑战 [G]//中国地理学会百年庆典学术论文摘要集. 北京 2009.]

[3] Sichuan Geological Engineering Survey Court. Report on geo-hazards investigation and zonal in Baoxing county after Wenchuan earthquake [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Land and Resources Department 2010. [四川省地质工程勘察院. 汶川地震灾区震后宝兴县地质灾害详细调查与区划报告 [R]. 成都: 四川省国土资源厅 2010.]

[4] Sichuan Chuanjian Geotechnical Survey and Design Institute. Report on geo-hazards investigation and zonal in Lushan county, Ya'an city, Sichuan province [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Land and Resources Department 2010. [四川省川建勘察设计院. 四川省雅安市芦山县地质灾害详细调查与区划报告 [R]. 成都: 四川省国土资源厅 2010.]

[5] Heckerman A. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors [G]//Kanal L N, Lemmer J F. Uncertainty in Artificial Intelligence. New York: Elsevier, 1986: 298-311

[6] Qiao Yanxiao, Ma Zhaoangshe, Lv Fengjun, et al. Characteristics and dynamic cause mechanism of the Wenchuan Earthquake geolog-

- ical hazards [J]. *Geology in China*. 2009, 36(3): 736–741 [乔彦肖, 冯中社, 吕凤军, 等. 汶川地震地质灾害发育特点及动因机制分析[J]. *中国地质* 2009, 36(3): 736–741]
- [7] Meunier P, Hovius N, Haines A J. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275: 221–232
- [8] Lee S, Talib J A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis [J]. *Environmental Geology* 2005, 47: 982–990
- [9] Lee S, Sambath T. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models [J]. *Environmental Geology* 2006, 50(6): 847–856
- [10] Lee S, TuDan N. Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: focus on the relationship between tectonic fractures and landslides [J]. *Environmental Geology* 2005, 48: 778–787
- [11] Yilmaz I. GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: a case study from Sivas basin (Turkey). *Engineering Geology* 2007, 90(1–2): 89–103

Distribution of Landslides and Collapses Induced by 2013 “4·20” Lushan Earthquake and Hazards Assessment: a Case Study of S210 Highway

ZHANG Jianqiang, SU Fenghuan, FAN Jianrong

(Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences / Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The Ms 7.0 April 20, 2013 Lushan earthquake induced more than 1 460 landslides and collapses in Sichuan of China. Roads were blocked by the landslides and collapses, so the relief people and machineries could not go into the earthquake-stricken area immediately, and the relief works were delayed in some degree. The highway S210, which was an important line of communications connect Baoxing and Lushan, was taken as study area. The aerial images with 0.5 m spatial resolution were used to interpret the landslides and collapses induced by the earthquake. Then characteristics of distribution were analyzed base on topographical factors, geological factors and distance to the epicenter. The susceptibility assessment was conduct by Certainty Factor and Frequency Ratio method. At last, the hazard assessment to the road were done base on the susceptibility map. Some conclusions were got that, the collapse was the main hazard induced by the earthquake along the S210 highway; they were concentrated in the elevation of 750 m to 1 500 m, and the slope gradient of landslides and collapses mainly between 30° to 60°. Large numbers of landslides and collapses occurred in the aspect of west, southwest and northwest slopes. The lithology also influenced the distribution of landslides and collapses, most of landslides and collapses located in the hard rocks or hard and soft alternated rocks. Many landslides and collapses located in the area with distance of 19 km to 21 km to the epicenter. Form the susceptibility map of landslides induced by the earthquake, the very high and high susceptible zones located in the north part and north part of the highway, and the low and very low susceptible zones located in the middle of the highway.

Key words “4·20” Lushan earthquake; landslide and collapses; distribution; certainty factor; frequency ratio