

文章编号: 1008-2786-(2013)4-502-08

芦山地震重灾区崩塌滑坡易发性评价

苏凤环^{1,2}, 崔鹏¹, 张建强¹, 甘国兵³

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

2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 3. 四川省基础地理信息中心, 四川 成都 610041)

摘 要: 2013-04-20 T08:02 四川省芦山县发生 7.0 级大地震, 地震诱发了大量的次生山地灾害。在芦山、宝兴、天全三个地震重灾区 6 651.35 km² 的区域内, 采用震后遥感影像解译并结合野外调查的方法, 共解译出 1 379 处崩塌(含落石)滑坡。应用 GIS 技术, 建立了芦山地震诱发崩塌滑坡灾害及相关地形、地质空间数据库, 分析了岩性、断层、地震动加速度、高程、坡度等 5 个因素与崩塌滑坡分布的关系, 应用崩塌滑坡数量百分比这一标准来分别衡量每个因素中各个级别对崩塌滑坡的影响程度; 然后使用层次分析法对这 5 个参数进行权重分析; 在 GIS 平台下对这些参数进行综合分析, 以此将研究区内的崩塌滑坡按易发程度分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区 4 类, 极高易发区与高易发区面积约 2 149.89 km², 占研究区总面积的 32.32%。

关键词: 芦山地震; RS; GIS; 崩塌滑坡; 易发性

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

北京时间 2013-04-20 T08:02 四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)发生 7.0 级地震(简称“4·20”芦山地震), 震源深度 13 km。成都、重庆及陕西的宝鸡、汉中、安康等地均有较强震感^[1]。芦山 7.0 级地震发生在龙门山断裂带南段, 余震分布显示此次地震破裂长度为 35~40 km, 余震主要延北东向展布在双石-大川断裂上, 截至 5 月 6 日 20 时, 共记录到余震 8 014 次, 其中 3.0 级以上余震 121 次, 包括 5.0~5.9 级 4 次, 4.0~4.9 级 22 次, 3.0~3.9 级 95 次^[2]。

地震发生后, 四川省测绘地理信息局对重灾区面积约为 1 300 km² 范围内进行航摄, 获取了无人机低空 0.05~0.3 m 分辨率影像图和大飞机 0.5 m 分辨率影像图。通过对地震重灾区芦山、宝兴、天全三县震前、震后高分辨率影像对比解译, 地震诱发了 1 379 处山地灾害, 主要包括崩塌(含落石, 下同)、滑坡等。崩塌和滑坡增加了区内松散固体物质量,

使得震后降雨期间容易形成泥石流。基于震后山地灾害形成背景的变化和发展潜势, 借鉴 973 项目“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”中对山地灾害的应急减灾经验^[3], 根据第一时间的灾害遥感解译资料, 利用层次分析法确定评价因子, 采用 GIS 技术开展芦山地震灾区山地灾害易发性评价, 编制易发性评估图, 以期对地震灾区灾后重建规划、场地选址、灾害防治等提供科学依据, 减轻或避免山地灾害可能带来的二次人员伤亡与财产损失。

1 研究区概况

研究区主要为“4·20”芦山地震重灾区, 包括芦山、宝兴和天全三县, 总面积为 6 651.35 km², 海拔最高为 5 360 m, 地形呈北西高、东南低的格局。区内西北边缘的极高山带, 最高海拔超过 5 000 m, 终年积雪; 高山带, 海拔 ≥ 3 500 m, 相对高度可达

收稿日期(Received date): 2013-05-13; 改回日期(Accepted): 2013-06-07。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(No. 41030742 和 No. 41172321), 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室开放研究基金资助课题(2011-HRE-06)。[The National Science Foundation Grant No. 41030742 and No. 41172321; the open research fund of MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University Grant No. 2011-HRE-06.]

作者简介(Biography): 苏凤环(1977-): 博士, 副研究员, 研究方向: 山地灾害与 3S 技术。[Fenghuan Su(1977-): Ph.D., Associate professor, Specialized in mountain hazards and 3S technology.] E-mail: fhsu@imde.ac.cn

1 000 ~ 2 000 m; 极高山带和高山带占研究区总面积的 27.2%; 中山带, 海拔 $\geq 1\ 000\text{ m}$, 占总面积 64.6%; 低山带, 海拔 500 ~ 1 000 m, 仅占总面积的 8%; 丘陵与平坝, 多集中于河谷两侧, 占总面积的 0.2%。

芦山地震区在地质构造上处于青藏高原滇缅印尼“歹”字型构造体系东缘、龙门山北东向推覆构造带西南端和四川盆地三个构造单元的结合部位。本次发震断裂为龙门山前山断裂带——江油—灌县断裂, 断裂总体走向 NE40°左右, 倾向 NW, 倾角 50° ~ 80°。断裂发育历史悠久, 且有多期活动, 新生代以来又有新的活动, 尤其是在“5·12”汶川地震中活动较强烈。

研究区气象主要受东南暖湿气流控制, 气候类型为亚热带季风性湿润气候, 降雨集中在夏季, 多夜雨, 年降雨量多在 1 250 ~ 1 750 mm。区内主要河流属大渡河支流青衣江水系, 包括宝兴河、天全河、玉溪河等。

2 研究方法

2.1 数据源

研究使用的数据源为 ADS40 航空数据和资源卫星二号(ZY-02C)数据, 其中航空数据获取时间为 2013-04-20—26, 空间分辨率为 0.5 m, 影像范围涉及重灾区 1 300 km²; 资源二号卫星影像获取时间为 2013-04-20, 分辨率为 5 m。其他的辅助资料包括相对应的 1:5 万 DEM 数据和 1:20 万 ~ 1:25 万地质图等。

2.2 数据预处理

在已有的矢量地形图、水系图、行政图和栅格 DEM 数据的基础上, 首先对多源多分辨率的遥感影像在 Erdas 9.1 中进行几何精纠正, 然后进行融合、影像拼接、色彩增强等处理。

2.3 灾害遥感解译与研究方法

芦山地震激发的次生山地灾害类型包括崩塌、滑坡等以及由其堵塞河道形成的堰塞湖。次生山地灾害的遥感判识主要依据影像的色调、形状、纹理等空间结构信息, 结合坡度特征, 建立不同类型灾害的解译标志。本文通过对 ADS40 航空数据和卫星影像建立解译标志, 采用人机交互方法, 获取次生山地灾害的分布信息(图 1)。

通过对灾区的遥感影像判识和野外调查发现,

崩塌是地震诱发的最主要次生山地灾害, 滑坡和堰塞湖等的数量相对较少, 由于崩塌在斜坡高位处发生, 而遥感解译圈定的崩塌范围包含了崩塌运动与堆积的整个运动轨迹, 若仍通过分析崩塌面积与其他因子的关系进行易发性评价则并不合适。因此衡量崩塌易发程度的指标为崩塌数量百分比(LAR), 即影响因子的不同取值区间内崩塌数量百分比, 而不采用崩塌面积百分比指标。由于地震崩塌和滑坡的发育条件相近, 以下将崩塌和滑坡放在一起讨论, 统称崩塌滑坡。

对芦山地震重灾区(芦山县宝盛乡、龙门乡、太平镇(图 2)、宝兴县 S210 沿线(图 3)等)的遥感判识, 共解译地震诱发的崩塌滑坡 1 379 余处(其中滑坡 16 处, 仅占总量的 1.16%), 总面积 5.85 km²; 堰塞湖 4 处。其中宝盛乡次生山地灾害分布较为密集, 解译 187 处; 宝兴县 S210 沿线崩塌滑坡也较密集, 解译出 330 余处(图 1)。堰塞湖分别位于宝盛乡的金鸡峡、清仁乡峡口、龙门乡大岩下和大川镇黑水河。^[4]

山地灾害易发性分区主要是利用基础数据, 结合次生山地灾害分布资料, 基于地质统计学的方法, 采用 GIS 空间分析技术, 利用层次分析法进行。

3 崩塌滑坡控制参数

控制和影响崩塌滑坡形成的内外动力因素主要有地质地形等基础条件和地震、降雨等诱发条件。结合芦山地震现有资料与山地灾害的分布特点, 选取工程岩组、与断裂距离、地震动加速度、坡度、高程等 5 个因子作为评价因子, 分别统计每个因子的取值区间与崩塌滑坡分布的关系。

3.1 工程地质岩组

按照工程地质图的岩性描述, 将研究区内的岩性概括为 4 类(图 4): 1. 松散岩组(I 类): 由冲积、冲洪积和重力堆积的粘性土、砾质土组成; 2. 较软岩组(II 类): 以泥页岩为主, 夹少量砂岩、泥质砂岩, 差异风化作用强烈; 3. 较硬岩组(III 类): 以厚层块状的砂岩、砾岩为主, 夹粉砂岩、泥页岩及煤层; 主要分布于侏罗系、三叠系地层中; 4. 坚硬岩组(IV 类): 主要为花岗岩、闪长岩和碳酸盐岩(石灰岩、白云岩)夹碎屑岩, 岩性坚硬; 主要分布于志留系、泥盆系、奥陶系、二叠系等地层中。

利用 1:20 万地质图, 按照地质图中岩性描述,

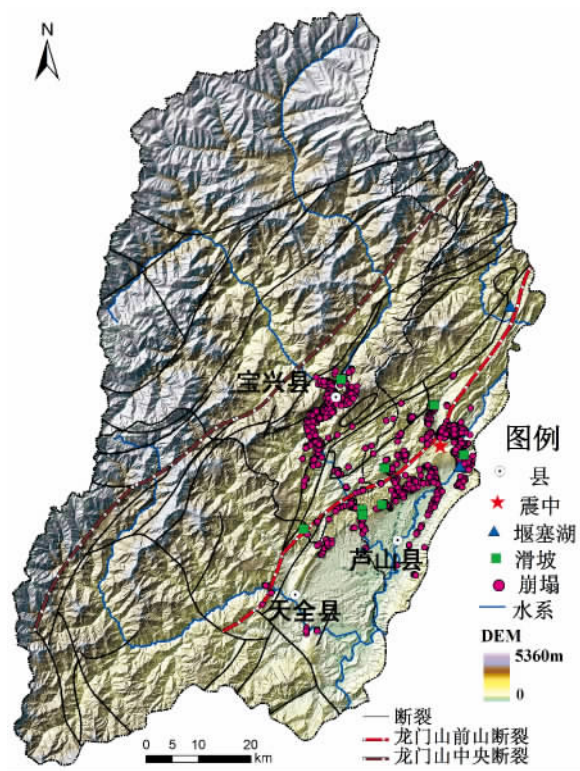


图1 芦山地震重灾区山地灾害遥感解译分布数据

Fig.1 Distribution of rockfall and landslide by interpretation of remote sensing in Lushan earthquake area



图3 灵官镇以北小关子崩塌群

(影像来源: 四川测绘地理信息局, [Http: /www. scgis. ent/LSXEarthquake/](http://www.scgis.ent/LSXEarthquake/))

Fig.3 Collapses in Xiaoguanzi Lingguan town(from SCBSM)



图2 芦山县太平镇“4·20”地震后影像

(影像来源: 四川测绘地理信息局, [http: //www. scgis. net/LSXEarthquake/](http://www.scgis.net/LSXEarthquake/))

Fig.2 Image of Taiping town(from SCBSM)

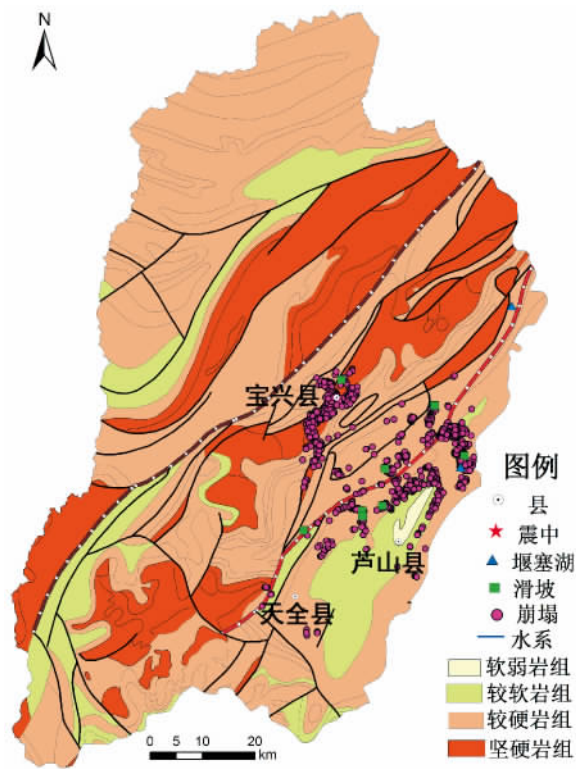


图4 研究区工程岩组分级图

Fig.4 Lithology group map of study area

在 ARCGIS 软件中对上述 4 类岩组中的岩性进行重分组和合并(merge 操作),并使用 Calculate Geometry 命令统计每个岩组的命令。使用 zonal 模块下的 tabulate area 命令可统计出崩塌滑坡的面积(统计表见表 1)。

就整个研究区而言,平均崩塌滑坡面积为 $0.002\text{ km}^2/\text{个}$,总的崩塌滑坡面积占研究区总面积的百分比为 0.04% ,崩塌滑坡密度为 $0.21\text{ 个}/\text{km}^2$ 。大部分崩塌滑坡(66.06%)发生在 III 类岩组中,IV 类岩组中也发育了占总数量 21.10% 的崩塌滑坡,II 类岩组中发育了 12.84% 的崩塌滑坡,I 类未产生崩塌滑坡。崩塌滑坡面积百分比与崩塌滑坡密度最大的岩组均为 III 类岩组。

3.2 断裂带的影响

研究区地质构造总体方向为北北东-南南西向。以宝兴县穆平镇和永富乡之间的赶羊沟断裂(龙门后山断裂)为界,地质构造分别属于北部的金汤弧形构造带和南部的龙门山构造带,活动断裂发育程度数据来源于 1:25 万地质图(图 1)。本次地震断裂为双石-大川断裂,属龙门山前山断裂在南西段的延伸。此处考虑龙门山前山断裂和中央断裂对崩塌滑坡的作用,使用 GIS 缓冲区分析方法对研

究区前山断裂(F1)、中央断裂(F2)进行缓冲区分析,分级标准采用 $0\sim4\text{ km}$ 、 $4\sim8\text{ km}$ 、 $8\sim12\text{ km}$ 、 $12\sim16\text{ km}$ 、 $>16\text{ km}$ 五类,对每个类别中的崩塌滑坡发育情况进行统计分析,结果见表 2。

从表 2 可以看出,崩塌滑坡的发生与距断裂带的距离成明显的反比例关系,发育数量随着断裂距离的增加而减少。 4 km 以内的崩塌滑坡数量为 537 处,占总数的 38.94% ; $4\sim8\text{ km}$ 内为 497 处,占总数的 36.04% 。崩塌滑坡主要分布在距断裂带 16 km 以内的缓冲区内,表明崩塌滑坡分布受断裂影响很大。

崩塌滑坡数量随着距断裂带的距离而衰减,产生这种距离效应的最本质原因,是地震释放能量随距离增大而衰减。选取地面动峰值加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)这一地震动参数,参考 Zhao^[5]的地震动衰减模型,利用 GIS 技术,获取了芦山地震重灾区每一点的峰值加速度,从而制作了地面峰值加速度分布图(图 5),并统计分析其与崩塌滑坡关系。

由表 3 可知,崩塌滑坡分布数量最多的 PGA 区间为 $200\sim300\text{ cm}/\text{s}^2$,在 $>300\text{ cm}/\text{s}^2$ 的区间内,崩塌滑坡数量与崩塌滑坡密度都随地面动峰值加速的增加而逐渐增多。

表 1 崩塌滑坡与岩性的关系
Table 1 Relation between rockfall(landslide) and lithology

岩性	岩组面积 /km ²	岩组面积百分比 /%	崩塌滑坡面积 /km ²	崩塌滑坡面积百分比 /%	崩塌滑坡数量 /处	崩塌滑坡数量 百分比/%	崩塌滑坡密度 /(个/km ²)
松散岩组 I	20.26	0.30	0	0	0	0	0
较软岩组 II	902.18	13.56	0.202	6.91	177	12.84	0.196
较硬岩组 III	4 017.24	60.40	1.998	68.35	911	66.06	0.227
坚硬岩组 IV	1 711.67	25.73	0.723	24.73	291	21.10	0.170
合计	6 651.35	100	2.923	100	1 379	100	-

表 2 崩塌滑坡与断裂的关系
Table 2 Relation between rockfall(landslide) and distance from faults

断裂距离 /km	缓冲区面积 /km ²	缓冲面积 百分比/%	崩塌滑坡数量 /处	崩塌滑坡数量 百分比/%	崩塌滑坡密度 /(个/km ²)
0~4	1 882.98	28.31	537	38.94	0.285
4~8	1 777.18	26.72	497	36.04	0.280
8~12	1 484.52	22.32	331	24.00	0.223
12~16	865.41	13.01	9	0.65	0.010
>16	641.26	9.64	5	0.36	0.008
合计	6 651.35	100.00	1 379	100	-

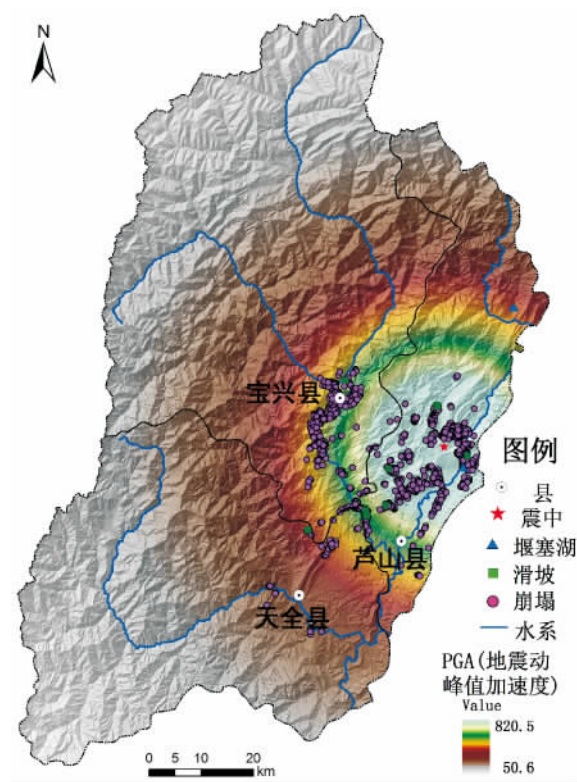


图5 芦山地震重灾区地面动峰值加速度分布图
Fig. 5 Peak ground acceleration map of area Lushan earthquake

3.3 地形因子

坡度、高程等地形因子主要通过 DEM 进行空间分析获取,空间分辨率为 25 m。

地形因子中,对崩塌滑坡影响最大的为坡度^[6]。对崩塌滑坡个数在不同坡度段内统计,其峰值一般出现在中间坡度,随坡度的增加或减小,崩塌滑坡个数也减少。利用 DEM 生成坡度图后,采用 reclassify 命令对坡度按照 10° 间隔重新分类;使用 zonal 模块下的 tabulate area 统计各个类别中的崩塌滑坡面积,统计结果见表 4。统计结果表明大部分崩塌滑坡发育在坡度 30° ~ 60° 之间,其中 40° ~ 50°

的崩塌滑坡数量最多,占总数量的 27.92%。在坡度过小(< 20°)的区域内崩塌滑坡发生的数量相对较少,但在 > 70° 的高陡斜坡发生崩塌的数量明显多于 60° ~ 70° 的区域。崩塌滑坡密度随着坡度的增加而增大,主要是由于高山峡谷段岸坡、陡崖、冲沟沟壁等都是容易发生崩塌滑坡的地带。芦山地震区 21.61% 的崩塌滑坡(298 处) 发生在 30° ~ 40° 坡度间,主要是由于河谷临空面陡急,加上公路削坡、工程开挖等人为活动因素与地震要素耦合产生的结果。

根据高程与山地灾害之间的关系,将研究区的高程按照 500 m 间距共分为 6 个等级。由表 5 可知,芦山地震灾区,约 97.03% 的崩塌滑坡位于海拔 2 000 m 以下,其中高程值在 1 000 ~ 1 500 m 段内分布最多,占总数的 58.52%,同时崩塌滑坡密度也最大。随着高程的继续增大,崩塌滑坡的数量和密度逐渐减少。在 < 500 m 高程的区域内,崩塌滑坡数量仅占 0.36%;而 > 2 500 m 以上的区间,崩塌滑坡密度最小。

4 地震崩塌滑坡易发性评价

4.1 易发性指数概念模型

采用易发性指数表示崩塌滑坡的易发程度。易发性指数概念模型可用下式表示

$$W = \sum_{j=1}^m R(j) * X(i, j) \tag{1}$$

式中 W: 评价单元的易发性指数; m: 选择评价因子的总数; R(j): 各评价因子的权重值; X(i, j): 各评价因子概化归一后的数据。

利用层次分析方法(AHP) 确定评价因子的权重系数。层次分析法将多种因子之间的比较,转换

表3 崩塌滑坡与 PGA 的关系
Table 3 Relation between rockfall(landslide) and peak ground acceleration

PGA 分级 /(cm/s ²)	PGA 面积 /km ²	PGA 面积 百分比/%	崩塌滑坡数 /处	崩塌滑坡数量 百分比/%	崩塌滑坡密度 /(个/km ²)
<200	5280.95	79.40	30	2.18	0.01
200 ~ 300	735.87	11.06	587	42.57	0.80
300 ~ 400	309.98	4.66	147	10.66	0.47
400 ~ 500	178.60	2.69	269	19.51	1.51
>500	145.95	2.19	346	25.09	2.37
合计	6 651.35	100	13 79	100	—

表 4 崩塌滑坡与坡度的关系
Table 4 Relation between rockfall(landslide) and slope

坡度分级 /°	不同坡度面积 /km ²	坡度面积 百分比 /%	崩塌滑坡数 /处	崩塌滑坡数 百分比 /%	崩塌滑坡密度 /(个 /km ²)
< 10	326. 93	4. 92	13	0. 94	0. 040
10 ~ 20	736. 52	11. 07	44	3. 19	0. 060
20 ~ 30	1550. 00	23. 30	99	7. 18	0. 064
30 ~ 40	2175. 53	32. 71	298	21. 61	0. 137
40 ~ 50	1404. 91	21. 12	385	27. 92	0. 274
50 ~ 60	373. 02	5. 61	245	17. 77	0. 657
60 ~ 70	49. 62	0. 75	115	8. 34	2. 318
> 70	34. 84	0. 52	180	13. 05	5. 167
合计	6 651. 35	100	1 379	100	—

表 5 崩塌滑坡与高程的关系
Table 5 Relation between rockfall(landslide) and elevation

高程分级 /m	不同高程区间面积 /km ²	高程区间面积 百分比 /%	崩塌滑坡数量 /处	崩塌滑坡数量 百分比 /%	崩塌滑坡密度 /(个 /km ²)
< 500	11. 13	0. 17	5	0. 36	0. 449
500 ~ 1 000	533. 31	8. 02	386	27. 99	0. 724
1 000 ~ 1 500	967. 62	14. 55	807	58. 52	0. 834
1 500 ~ 2 000	1 094. 67	16. 46	140	10. 15	0. 128
2 000 ~ 2 500	1 152. 40	17. 33	34	2. 47	0. 030
> 2 500	2 892. 24	43. 48	7	0. 51	0. 002
合计	6 651. 35	100	1 379	100	—

为两两因子的比较。通过对相关专家咨询 ,已有研究成果和资料的参阅 ,以及对崩塌滑坡分布规律的分析 ,比较两两因子相比的重要程度 ,对因子进行赋值 ,从而建立因子重要性的判断矩阵(表 6) 。进而使用层次分析的算法 ,计算得出每个因子的权重 ,建立起多因子的崩塌滑坡易发性评价模型。

表 6 评价因子的判断矩阵
Table 6 Judgment matrix for factors

U	坡度	工程岩组	PGA	距断裂带距离	高程
坡度	1	3	2	5	4
工程岩组	1/3	1	1/3	2	2
PGA	1/2	3	1	4	2
距断裂带距离	1/5	1/2	1/4	1	4/5
高程	1/4	1/2	1/2	1 1/4	1

对专家构建的评价指标判断矩阵进行计算得: 随机一致性比率 CR = 0. 026 < 0. 10 ,表明参评指标判断矩阵具有一致性 ,权重分配合理 ,可以使用。

4. 2 评价模型

利用易发性评价的概念模型 ,将各因素的权重值代入 ,建立崩塌滑坡易发性评价的数学模型

$$W = 0. 3841X_1 + 0. 2617X_2 + 0. 1131X_3 + 0. 1511X_4 + 0. 090X_5 \quad (2)$$

式中 W: 易发性指数 , X_1 : 坡度因子 , X_2 : 岩性因子 , X_3 : 距断裂带距离 , X_4 : PGA 因子 , X_5 : 高程。

4. 3 易发性评价结果

按易发性评价的数学模型 ,利用 ARCGIS 进行栅格运算 ,单元大小为 25 m × 25 m ,分别计算出各评价单元的易发性指数。利用自然断点法对易发性指数进行分区划分 ,分为 4 个等级: 极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区。分类结果见图 6 和表 7、表 8。

极高易发区与高易发区面积 2 149. 89 km² ,占研究区总面积的 32. 32% 。其中芦山县极高易发区面积最大 ,为 391. 99 km² ,其次为宝兴县、天全县 (表 8) 。按照乡镇极高易发区面积大小排列 ,芦山

县灾害极高易发区分布依次为太平镇(103. 36 km²)、宝盛乡(66. 03 km²)、双石镇(48. 15km²)、大川镇(37. 01 km²)、龙门乡(29. 33 km²)、清仁乡(23. 05 km²); 宝兴县灾害极高易发区分布依次为灵关镇(61. 12 km²)、穆坪镇(46. 37 km²)、蜂蛹寨乡(24. 45 km²)、大溪乡(13. 54 km²); 天全县灾害极高易发区分布依次为小河乡(87. 50 km²)、紫石乡(14. 98 km²)、老场乡(13. 54 km²)。

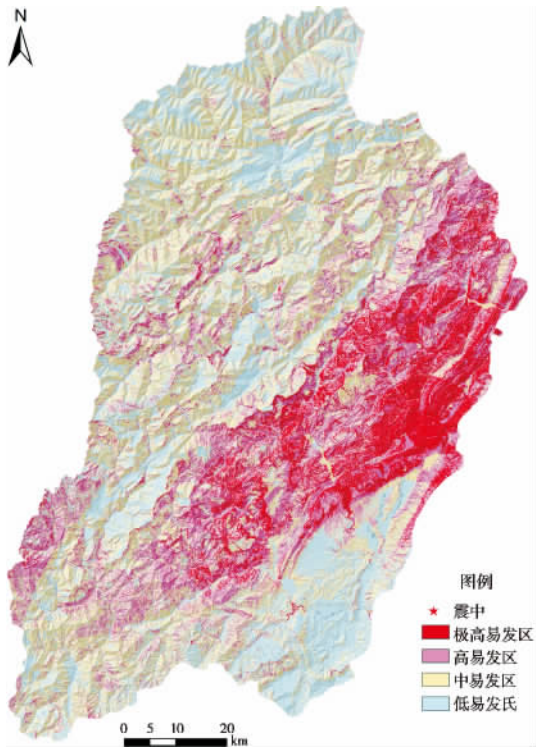


图 6 芦山地震灾区崩塌滑坡易发性评价结果图
Fig. 6 Landslide and rockfall susceptibility map of area Lushan Earthquake

表 7 崩塌滑坡易发性评价结果

Table 7 Statistic of rockfall(landslide) and susceptibility

危险性分级	面积/km ²	百分比/%
极高易发区	681. 63	10. 25
高易发区	1 468. 26	22. 07
中易发区	2 727. 50	41. 01
低易发区	1 773. 96	26. 67

表 8 三个重灾区崩塌滑坡易发性分布

Table 8 Distribution of rockfall(landslide) susceptibility in three countries /km²

县名	极高易发区面积	高易发区面积	中易发区面积	低易发区面积
芦山县	391. 99	407. 3	247. 83	110. 4
宝兴县	166. 86	520. 71	1 489. 93	942. 81
天全县	122. 78	540. 25	989. 74	720. 75

5 结论

1. 研究了芦山地震崩塌滑坡控制参数与崩塌滑坡的空间分布关系 结果表明较硬岩组 III 和坚硬岩组 IV 为崩塌滑坡易发岩组。崩塌滑坡的发生与距主断裂的距离成明显的反比例关系 崩塌滑坡数量随着断裂距离的增加而减少。崩塌滑坡主要分布在距断裂带 < 12 km 以内的缓冲区内。崩塌滑坡分布数量最多的 PGA 区间为 200 ~ 300 cm/s² ,在 > 300 cm/s² 的区间内 崩塌滑坡发生数量与崩塌滑坡密度都随地面峰值加速的增加而逐渐增多。大部分崩塌滑坡发育在坡度 30° ~ 60°之间 其中 40° ~ 50°的崩塌滑坡数量最多。1 000 ~ 1 500 m 为崩塌滑坡易发高程范围。

2. 根据专家知识 两两对比影响因子对崩塌滑坡的影响程度 以此构建因子比较结果矩阵。然后基于层次分析法求得 5 个崩塌滑坡影响因子的权重 结果表明对地震区崩塌滑坡易发性影响最大的因子为坡度、其次为岩性与断裂 ,PGA、高程。

3. 基于 GIS 平台分析得到易发性评价结果图 ,按崩塌滑坡易发程度分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区 4 类 极高易发区与高易发区面积约 2 149. 89 km² ,占研究区总面积的 32. 32%。

致谢: 遥感解译工作得到四川省测绘地理信息局的大力支持。谨致谢忱。

参考文献(References)

[1] China Earthquake , Administration. The 20 April Lushan earthquake. [EB/OL] <http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100342/index. html> , 2013 - 4 - 20 [中国地震局. “4 · 20”芦山地震专题报道 [EB/OL]. <http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100342/index. html> , 2013 - 4 - 20]

[2] China Earthquake Administration. Lushan earthquake field emergency team of China Earthquake Administration complete the seismic tectonic environment and seismogenic structure analysis [EB/OL]. <http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100347/20130427174324060108454/index. html> , 2013 - 04 - 27 [中国地震局. 中国地震局地震现场应急队完成震区地震构造环境与发震构造分析 [EB/OL]. <http://www. cea. gov. cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100347/20130427174324060108454/index. html> , 2013 - 04 - 27]

[3] Cui Peng , He Siming , Yao Lingkan , et al. Formation mechanism and risk control of mountain hazards induced by Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press , 2011 [崔鹏 ,何思明 ,姚令侃 ,等. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制 [M]. 北京:

- 科学出版社, 2011.]
- [4] Cui Peng ,Chen Xiaoqing ,Zhang Jianqiang ,et al. Activities and tendency of mountain hazard induced by the Ms 7.0 Lushan earthquake ,April 20 ,2013 [J]. Journal of Mountain science ,2013 ,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 [J]. 山地学报 ,2013 ,31 (3) : 257 – 265]
- [5] Zhao John X. , Jian Zhang , Akihiro Asano et al. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period[J]. Bulletin of the seismological society of America ,2006 ,96(3) : 898 – 913
- [6] Patrick Meunier , Niels Hovius , John Allan Haines. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. Earth and Planetary Science Letters ,2008 ,275(3 – 4) : 221 – 232

Rockfall and Landslide Susceptibility Assessment in Lushan Earthquake Region

SU Fenghuan^{1 2} , CUI Peng¹ , ZHANG Jianqiang¹ , GAN Guobing³

(1. 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 ;

2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China ;

3. sichuan Geomatics Center , Chengdu 610041 , China)

Abstract: On 20 April 2013 , a catastrophic Ms 7.0 earthquake struck Lushan , Ya’ an , Sichuan Province of China. A great number of secondary mountain disasters whose main types include rockfall , landslide , rolling stone , dammed lake etc. had been induced by the earthquake. Not merely did these secondary disasters result in heavy casualties but also blocked road for rescue service , which retarded the relieving progress. 1 379 and landslides rock-fall were interpreted from aerial photographs and multi-source remote sensing imageries , verified by field check. A spatial database including rockfall(landslide) and associated controlling parameters which may have influence on the occurrence of rockfall(landslide) , was developed and analyzed using geographical information system(GIS) technology. The correlations of rockfall(landslide) distribution with controlling parameters including faults , lithology , elevation , slope angle , PGA were firstly analyzed , and landslide number-ratio was calculated for each group of the above parameters. An analytical hierarchy process (AHP) was then applied to determine the significance of controlling parameters in triggering the rockfall(landslide) . The resulting susceptibility map showed five classes of rockfall(landslide) susceptibility , i. e. extremely high , high , moderate , low. The area with extremely high and high susceptibility accounts for about 2 149.89 km² , 32.32% of the study area.

Key words: Lushan earthquake; RS; GIS; rockfall(landslide) ; susceptibility