

芦山“4·20”震后地质灾害危险性评价

陈莉^{1,2}, 陈廷芳¹, 邹强¹

1. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010

2. 四川省应急测绘与防灾减灾工程技术研究中心, 成都 610041

摘要 芦山“4·20”地震之后, 滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害频发, 新增地质灾害点 365 处, 严重影响当地经济建设与灾后重建工作。在分析地质灾害孕灾环境条件的基础上, 选取地层岩性、断裂带、坡度、相对高程、年平均降雨量、地震动峰值加速度、土地利用类型等 7 个因子作为评价指标, 建立基于灾害熵的地质灾害危险性评价方法, 并将该方法应用于芦山县地质灾害危险性评价。结果表明, 芦山县 49.89% 的区域处于中度和高度危险区, 其中高危险区占总面积的 29.99%, 这些高危险区位于正河、玉溪河、灵关河流域, 受地形、人类活动、地震影响, 地质灾害破坏性极大, 在后期建设与防灾减灾中应当给予高度关注。

关键词 地质灾害; 危险性; 灾害熵; GIS; 芦山

2013 年 4 月 20 日 8 时 2 分, 地处四川龙门山断裂带的雅安芦山发生 $M_{s7.0}$ 级地震, 地震发生后, 滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害频发。为了减轻地质灾害给当地灾后恢复重建带来的危害, 摸清研究区地质灾害情况与潜在危险区范围是很有必要的。

地质灾害危险性评价是灾害管理的基础工作, 对灾害风险分析与防治规划具有重要意义。目前, 部分学者对地震灾区次生地质灾害开展了许多研究工作。崔鹏等^[1]研究了芦山地震次生山地灾害的情况并提出了相应的减灾对策; 黄润秋等^[2]对汶川大地震触发的地质灾害的发育分布规律进行了研究; 韩金良等^[3]浅析了汶川 8.0 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制; 李为乐等^[4]对地震次生地质灾害进行了预测和评价; 许冲^[5]快速评价了芦山 $M_{s7.0}$ 级地震滑坡的易发性; 王庆安等^[6]对汶川地震生态环境破坏严重区的地形高程和起伏度分布特点进行了研究。

鉴于地质灾害的复杂性, 目前地质灾害危险性评价缺乏统一的方法标准与应用规范。为此, 针对评估目的和空间尺度, 探索高效可靠的评价方法, 对灾害定量评估及结果普适性应用具有重要科学意义。本文结合芦山县的地形、地质、水文、气象等孕灾条件, 分析芦山县地质灾害现状以及成灾条件, 建立基于灾害熵的地质灾害危险性评价方法, 实现研究区地质灾害危险性评价, 并划分危险区。

1 研究区概况

芦山县地处四川盆地西缘, 区内地势北高南低, 地形微波状起伏, 河流水系发达。该县地层大部分为上元古界震旦系到中生代白垩纪的地层, 主要的岩石类型为辉长岩、火山碎屑岩、碳酸盐岩、灰岩、砂岩、页岩、白云岩等; 芦山地震区在地质构造上处于青藏滇缅印尼“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 3 个构造单元的结合部位。

通过野外灾害调查, 在“4·20”地震之前, 芦山县总共有 144 处灾害点, 在地震之后, 芦山县新增地质灾害点 365 处, 在记录的 509 处灾害点资料中, 滑坡 173 处, 崩塌 199 处, 不稳定斜坡 119 处, 其余的为泥石流点, 研究区地理位置和灾害点分布情况如图 1 所示。

2 评价指标的选取

根据对不稳定斜坡、崩塌、滑坡等的形成条件、发育特征和分布规律的研究, 从地质灾害形成的地质条件、地形条件以及诱发条件 3 个方面出发, 充分考虑研究区域尺度大小、资料的可获取性以及评价精度的要求, 选择地层岩性、断裂带、坡度、相对高程、年平均降雨量、地震动峰值加速度、土地利用类型等 7 个因子作为危险性研究的评价指标, 并建立了危险性评价指标体系(图 2)。

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-05-25

基金项目: 四川省应急测绘与防灾减灾工程技术研究中心开放基金项目(K2015B010); 国家自然科学基金项目(41401598); 西南科技大学博士基金项目(14zx7128)

作者简介: 陈莉, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害与 GIS, 电子邮箱: 573512563@qq.com; 邹强(通信作者), 副教授, 研究方向为山地灾害与 GIS, 电子邮箱: zouqiang@swust.edu.cn

引用格式: 陈莉, 陈廷芳, 邹强. 芦山“4·20”震后地质灾害危险性评价[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 255-259; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.043

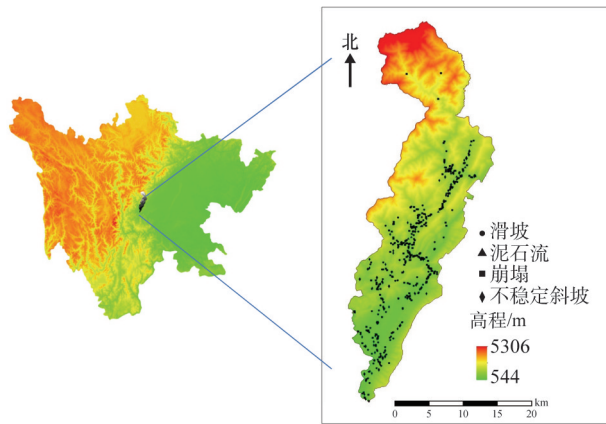


图1 研究区位置和地质灾害分布

Fig. 1 Location and geological hazards map of the study area

地形因素采用坡度、相对高程2个指标,坡度和相对高程是控制斜坡稳定性的最重要的因素,其大小直接影响松散碎屑物的分布和聚集;对于地质因素的判断,主要选择地层岩性、地震动峰值加速度、距断裂带的距离作为参考;诱发因素主要是年平均降雨量与土地利用类型。研究区内地势北高南低,地形微波状起伏,地层岩性为地质灾害的发生提供物质基础,坡度和相对高程的大小反映了斜坡的稳定性以及松散碎屑物的分布和聚集的能力。加之研究区内分布有很多断裂带,断裂带活动的强弱在一定范围内影响着灾害的发生,由于地震频发,地震动峰值加速度在一定程度上反映观测记录在场地附近的整体震动强度情况。降雨尤其是局地性短历时的暴雨,是泥石流的激发因素,中尺度到大尺度的长历时强降雨过程,往往导致大面积群发性滑坡泥石流^[7]。土地利用类型反映地表覆被变化情况,也从一定程度上反映人类活动对地质灾害形成的影响。

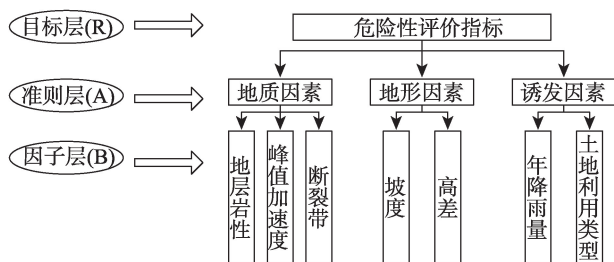


图2 地质灾害危险性评价指标体系

Fig. 2 Indicators of risk assessment of geological hazards

3 基于灾害熵的危险性评价方法

熵是对信息不确定性的一种度量,可通过计算熵值来判断某个指标的离散程度^[8]。灾害的发生也是不确定性的,可

通过研究区的现实情况和已有的信息,将各种影响区域危险性因素的数据转化为反映区域危险性的信息量。信息量越大,不确定性就越小,熵值越小,该指标被赋予的权重也就越大;信息量越小,不确定性就越大,熵值越大,该指标被赋予的权重也就越小。因此,可根据各项指标的变异程度,利用灾害熵的原理,计算出各个指标的权重,可以为多指标综合评价提供依据。

其具体步骤为:将 M 个待评方案, N 项评价指标,形成原始指标数据矩阵:

$$X = (X_{ij})_{mn} \quad (1)$$

式中,元素 X_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标上的数值。

对数据进行标准化处理,再计算第 j 项指标下第 i 个方案占该指标的比重 P_{ij} 。然后再利用公式(2)计算第 j 项指标的熵值。

$$e_j = k \times \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2)$$

式中, $k > 0$, \ln 为自然对数, $e_j \geq 0$,常数 k 与总的样本数量 m 有关,一般令 $k=1/nm$ 。

计算第 j 项指标的差异系数 g_j ,最后由公式(3)求权值。

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

在GIS技术支持下,芦山县地质灾害危险性评价可归纳为如下基本步骤:

- 1) 提取对芦山县地质灾害造成危险的7个因素;
- 2) 对各因素进行数据处理、量化;
- 3) 根据灾害熵的原理计算各因素的权重;
- 4) 利用ArcGIS的空间分析工具中的地图代数工具,根据权重构建评价公式,划分地质灾害危险等级。

4 芦山县地质灾害危险性评价

4.1 数据来源

在充分考虑资料的可获取性、研究区大小以及评价精度等因素的情况下,利用研究区 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的DEM数据,结合ArcGIS平台空间分析下的表面分析工具提取坡度和相对高程;采用1:25万地质图提取研究区的岩性、断裂带等地质信息;地震动峰值加速度是根据全国区划图编制委员会编制的1:100万四川、甘肃、陕西部分地区地震动峰值加速度区划图获取;年平均降雨量由2014年芦山县气象站点数据进行空间插值方法获得;研究区土地利用类型数据来源于2014年四川省土地利用现状图。在野外考察的基础上,整理芦山地质灾害数据的空间与属性信息,并在此基础上开展进一步的研究工作。

4.2 指标分级

指标分级旨在建立评价因子的层次关系,二级指标是对上一级指标的进一步细化。根据对野外调查数据的分析,结

合研究区孕灾环境条件、专家意见以及各专家对该区域的研究,对因子进行分级,并将分级指标作为灾害熵计算的判别指标。

因子的提取与处理:利用 ArcGIS 软件矢量化工具将地质图进行矢量化,分别提取岩性、主断裂带和次断裂带信息,通过后编辑,绘制了该县的地层岩性图和断裂带影响图。坡度和相对高程是控制斜坡稳定性最重要的因素之一,山坡坡度的陡缓直接影响松散碎屑物的分布和聚集。利用芦山县的 DEM 数据,通过 ArcGIS 坡度提取工具,提取整个县城的坡度和高程信息,再利用重分类功能,对坡度和高程数据划分等级,绘制因子图。震动峰值加速度是地震记录中比较容易获得而且应用最为广泛的一个地震动参数,很多学者针对地

震进行了研究^[9-13],利用地震动参数可以在一定程度上反映观测记录在场地附近的整体震动强度情况。根据四川、甘肃、陕西部分地区地震动峰值加速度区划图绘制了芦山地区的地震动峰值加速度图。目前芦山地区并无大降雨天气出现,根据从气象站点获取的数据,利用空间插值方法绘制该县的年平均降雨量图。依照土地二调时国家出台的土地利用分类标准,结合人类活动等情况,对该县的土地利用类型进行分级。

根据分级标准,利用 ArcGIS 的重分类工具对 7 个因子进行赋值预处理,将划分的高度、中度、低度、微度 4 个级别危险区分别赋值 3、2、1、0,具体分级如表 1 所示。

表 1 评价因子的分级

Table 1 Classification of evaluation factors

因子	地层岩性	距断裂带距离/m	坡度/(°)	相对高程/m	年平均降雨量/mm	地震动峰值加速度/g	土地利用类型
微度危险(0)	—	≥2000	≤6	≤25	≤1000	≤0.10	林地
低度危险(1)	硬岩组	1000~2000	6~10、≥60	25~50	1000~1100	0.10~0.15	草地
中度危险(2)	软岩组	500~1000	10~25、40~60	50~100	1100~1300	0.15~0.30	耕地、水域
高度危险(3)	软硬相间岩组	≤500	25~40	≥100	≥1300	≥0.30	建设用地、其他

注:—表示无此项分类,1g=9.8 m/s²,下表同。

4.3 构造判断矩阵和灾害熵的计算

判断矩阵用数值反应了每一层次各个元素之间的相互重要性。本文采用 Saaty^[14]的 1~9 标度来定量描述各因素的相

对重要性。依据其判断标度,对指标的每一层各因素之间的相对重要性做出判断,得到判断矩阵,之后利用灾害熵的计算原理,计算权重,结果见表 2。

表 2 熵值计算结果

Table 2 Calculation results of entropy

因子	地层岩性	距断裂带距离/m	坡度/(°)	相对高程/m	年平均降雨量/mm	地震动峰值加速度/g	土地利用类型
权重 1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.22	0.39	0.39
权重 2		0.31		0.26		0.43	

4.4 结果与验证

利用 ArcGIS 的空间分析功能,采用栅格加权叠加运算的方法,对 7 个影响芦山县地质灾害危险性的单因子图进行综合评价,得到 25 m×25 m 的栅格评价结果图(图 3(a)),为了更直观地反应研究区危险程度,利用自然断点法对评价结果进行分组区划,划分高度、中度、低度、微度 4 个级别危险区,再用不同图斑圈定本区域地质灾害危险等级,得到研究区的危险性评价分区图(图 3(b))。

从图 3 可以看出,该区域地质灾害东部、南部、西部较重,北部较轻。高危险区占 29.99%,受地形、人类活动、地震动峰值加速度影响,主要位于大川镇小河与黑河子流域、中林乡和宝胜乡西南部、灵关河与玉溪河流域、龙门乡和清源乡北

东部以及凤禾乡与飞仙关镇,而且灾害点都集中呈带状发育。此区域主要是居民点,人口密度大,分布有大量居民建筑、道路和农田,人类活动相对强烈,破坏性极大;中危险区占 19.90%,主要位于思廷乡、升隆乡,这些区域坡度相对较大,人类活动相对较弱;低、微度危险区主要分布在芦山县北部,宝胜乡东北部等高山地区,这些区域虽受断裂带影响,但基本无人活动,危险性不大。

为了检验评价结果,对危险性分区图与实际调查的灾害点数据进行统计分析,统计出每个危险等级所占面积和灾害点数量(表 3)。进一步分析可知,高度危险区共有灾害点 358 个,灾害点密度 0.9353/km²;中度危险区共有灾害点 58 个,灾害点密度 0.2283/km²,主要是原有的大中山滑坡、新发的木坪

子组麻柳村滑坡等灾害点;低度危险区共有灾害点 91 个,灾害点密度 0.2126/km²,此区域主要存在许多小型灾害,如金润矿部崩塌、K314 崩塌;微度危险区位于高山地区,灾害点很少,基本无危险。由此可知,评价结果与灾害点的实际分布基本一致。

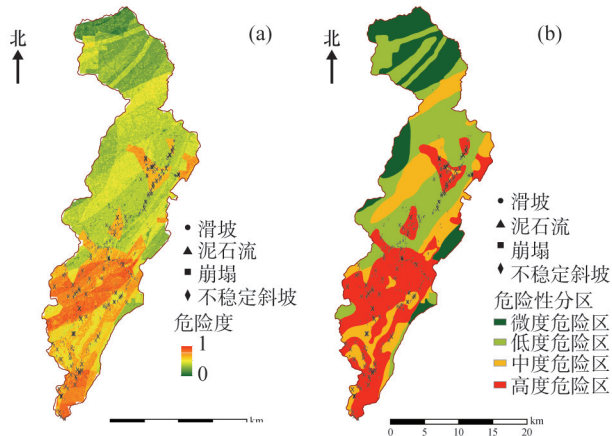


图3 芦山县地质灾害危险性评价结果 (a) 与分区结果 (b)
Fig. 3 Geological hazards in Lushan County, the results of hazard assessment (a) and regionalization (b)

表3 危险性评价结果统计

Table 3 Risk assessment results and statistics

危险等级	面积/km ²	占总面积比例/%	灾害点数量	灾害点密度/km ²
微度危险区	211.54	16.57	2	0.0095
低度危险区	428.13	33.54	91	0.2126
中度危险区	254.07	19.90	58	0.2283
高度危险区	382.76	29.99	358	0.9353

5 结论

分析芦山县的地形、地质、水文、气象等孕灾条件,结合GIS技术和灾害熵理论,建立地质灾害危险性评价指标体系与评价方法,并对该县地质灾害的危险性进行评价。

1) 针对各指标的不确定性,把GIS技术和灾害熵理论应用于评价中,提出了基于灾害熵的地质灾害危险性评价方法,能快速对资料进行分析,减少主观干扰因素,提高地质灾害的科学性。

2) 考虑区域差异对地质灾害成灾条件的影响,分析了芦山县地质灾害现状以及成灾环境背景条件,选取地层岩性、断裂带、坡度、相对高程、年平均降雨量、地震动峰值加速度、土地利用类型等7个因子对地质灾害的危险性进行了分析,划分了危险分区,评价结果与实际情况基本一致。可见,本文建立的地质灾害危险性评价指标体系与评价方法是切实

可行的,对研究区与地质灾害多发区的灾后重建及防灾减灾决策提供科学参考。

3) 由于地震的影响,坡体失稳,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害潜在危险性增大。芦山县高危险区面积占29.99%,主要位于大川镇小河与黑河子流域、中林乡和宝胜乡西南部等地,这些区域人类活动相对强烈,受地形、地震影响,地质灾害破坏性极大,在后期建设与防灾减灾中应当给予高度关注。

参考文献 (References)

- [1] 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.
Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhang Jianqiang, et al. Activities and tendency mountain hazards induced by the $M_{7.0}$ Lushan earthquake, April 20, 2013[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 257-265.
- [2] 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): 2585-2592.
Huang Runqiu, Li Weile. 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): 2585-2592.
- [3] 韩金良, 吴树仁, 何淑军, 等. “5·12”汶川8级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J]. 地质前缘, 2009, 16(3): 306-326.
Han Jinliang, Wu Shuren, He Shujun, et al. Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 306-326.
- [4] 李为乐, 黄润秋, 许强, 等. “4·20”芦山地震次生地质灾害预测评价[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 264-274.
Li Weile, Huang Runqiu, Xu Qiang, et al. Rapid prediction of co-seismic landslides triggered by Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(3): 264-274.
- [5] 许冲. 2013年芦山 $M_{7.0}$ 级地震滑坡易发性快速评价方法[J]. 科技导报, 2013, 31(28/29): 15-23.
Xu Chong. Quick landslide susceptibility evaluation and its validation for the 2013 $M_{7.0}$ Lushan earthquake[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(28/29): 15-23.
- [6] 王庆安, 张翔, 毛竹. 汶川地震生态环境破坏严重区地形高程和起伏度分布特点[J]. 科技导报, 2009, 27(16): 53-59.
Wang Qingan, Zhang Xiang, Mao Zhu. Distribution of elevation and relief amplitude in the eco-environment seriously damaged areas of Wenchuan Earthquake[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(16): 53-59.
- [7] 邹强, 崔鹏, 杨伟. G318川藏公路段泥石流危险性评价[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 342-348.
Zou Qiang, Cui Peng, Yang Wei. Hazard assessment of debris flows along G318 Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 342-348.
- [8] Chien C C, Tseng C Y, Dong J J. New entropy-based method for variables selection and its application to the debris-flow hazard

- assessment[J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1): 19–26.
- [9] Joyner W B, Boore D M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 imperial valley, California earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2011–2038.
- [10] Campbell K W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2039–2070.
- [11] Fukushima Y, Tannaka T. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(4): 757–783.
- [12] 陈颢, 朱宏任. 地震灾害定量化研究[J]. *国际地震动态*, 1991, 5: 5–9. Chen Yong, Zhu Hongren. Research on quantification of earthquake disasters[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 1991, 5: 5–9.
- [13] 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43: 1064–1072. Chen Yuntai, Yang Zhixian, Zhang Yong, et al. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43: 1064–1072.
- [14] Saaty T L. *The analytic hierarchy process*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] Zou Qiang. Hazard assessment of highways affected by debris flows[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 501–504: 2455–2462.
- [16] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价—以重庆万州为例[J]. *岩石力学与工程学*, 2006, 25(5): 991–996. Gao Kechang, Cui Peng, Zhao Chunyong, et al. Landslide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS information value method in the three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 991–996.
- [17] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(1): 96–102. Zhang Chunshan, Wu Manlu, Zhang Yecheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 96–102.
- [18] 朱阿兴, 裴韬, 乔建平, 等. 基于专家知识的滑坡危险性模糊评估方法[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 1–12. Zhu Axing, Pei Tao, Qiao Jianping, et al. A landslide susceptibility mapping approach using expert knowledge and fuzzy logic under GIS [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 1–12.
- [19] 刘希林. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995. Liu Xilin. *Debris flow hazard assessment*[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [20] 罗元华. 论泥石流灾害风险评估方法[J]. *中国矿业*, 2000, 9(6): 70–72. Luo Yuanhua. Assessment of danger degree of mudrock flow[J]. *China Mining Magazine*, 2000, 9(6): 70–72.
- [21] 段永侯. 中国地质灾害[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. Duan Yonghou. *Geological calamity in China*[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1993.

Hazard assessment of geological disaster after "4·20" earthquake in Lushan County

CHEN Li^{1,2}, CHEN Tingfang¹, ZOU Qiang¹

1. College of Environmental and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China
2. Sichuan Engineering Research Center for Emergency Mapping & Disaster Reduction, Chengdu 610041, China

Abstract After the "4·20" earthquake in Lushan County, secondary geological disasters such as landslides, collapses and debris flows occurred frequently. There are 365 new geological hazard spots which seriously impact local economic construction and post-disaster reconstruction. This paper selects lithology, fault zone, slope, relative elevation, annual rainfall, peak ground acceleration, and the type of land use based on geological disasters environmental conditions to build up a geological disasters hazard evaluation methodology of entropy, which has been applied to Lushan's geological disasters risk assessment. The results show that 49.89% of Lushan's area belong to a medium and high dangerous region, among which 29.99% are in high dangerous region situated in Zheng River, Yuxi River and Lingguan River drainage basin. Impacted by terrain, human activities and earthquake, the geological disasters always damage heavily, so we should pay more attention to it during subsequent construction and disaster prevention and mitigation.

Keywords geological disaster; hazard; disaster entropy; GIS; Lushan

(责任编辑 吴晓丽)