

刘丽娜, 许冲, 徐锡伟, 等. GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年芦山地震区滑坡危险性评价[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 183–191. [ Liu Lina, Xu Chong, Xu Xiwei, et al. Gis—Based LANDSLIDE HAZARD EVALUATION USING AHP METHOD IN THE 2013 LUSHAN EARTHQUAKE REGION [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 183–191. ]

## GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年 芦山地震区滑坡危险性评价\*

刘丽娜<sup>1,2</sup>, 许 冲<sup>1</sup>, 徐锡伟<sup>1</sup>, 陈 剑<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地质研究所 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029;

2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

**摘 要:** 在详细综述国内外有关滑坡危险性评价研究进展的基础上, 选取芦山 7.0 级地震区一个大致以震中为中心的 100 km × 100 km 正方形区域作为研究区域, 以 GIS 技术作为操作平台, 确定地震滑坡影响因子, 结合芦山地震滑坡特征将滑坡影响因子分级, 分析高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性和 PGA 等 6 个影响因子经分级概化后所代表的区域与滑坡的分布关系, 采用区域分布面积百分比指标与滑坡密度指标来衡量影响滑坡的各个影响因子分级所代表的研究区间对地震滑坡影响程度; 其次, 使用 AHP 法对研究区内地震滑坡建立 6 个影响因子两两比较的 6 个关系矩阵, 对 6 个关系矩阵分别进行各个参数权重的综合分析, 所形成的影响因子权重分布曲线分析结果显示: 地面峰值加速度 PGA 是影响地震滑坡最严重的因子, 影响因子对芦山地震区滑坡影响程度关系为 PGA > 地层岩性 > 坡度 > 高程 > 斜坡曲率 > 坡向; 取 6 组数据的平均值作为最终所确定的影响因子权重, 以构建研究区内滑坡危险度阈值栅格图, 接着将滑坡危险性阈值栅格图划分为与评价因子分级赋值时对应的极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区, 同时给出研究区滑坡危险性分区图。最后, 根据芦山地震实际所触发的滑坡构建滑坡易发性评价结果检验曲线验证评价结果的合理性, 验证结果表明: AUC 值为 85.41%, 即定量衡量滑坡评价结果的准确率为 85.41%, 表明评价结果准确率较高。

**关键词:** 芦山 7.0 级地震; 滑坡; 层次分析法; GIS; 危险性评价

**中图分类号:** P642; X4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000–811X(2014)04–0183–09

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.04.034

发生在山区的中强地震往往触发大量的滑坡, 这些滑坡可能会造成重大的人员伤亡与财产损失, 如近年来发生在我国的 2008 年汶川 8.0 级地震触发了近 20 万处滑坡<sup>[1–2]</sup>, 2010 年玉树 7.1 级地震触发了超过 2 000 处滑坡<sup>[3–4]</sup>, 2013 年岷县漳县 6.6 级地震也触发了超过 2 000 处的滑坡<sup>[5–6]</sup>。这些滑坡将会产生大量的松散堆积物质<sup>[7–8]</sup>, 这些物质停留在地震区内, 在后续余震或者强降雨条件下极易转化为新的滑坡或泥石流, 为灾区造成严重的威胁。因此, 开展震区地震滑坡的管理与危险性评价工作具有重要的现实意义与科研意义。2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)于北京时间 2013 年 4 月 20 日 8:02 发生 7.0 级地震(简称芦山地震), 此次地震是继汶川 8.0 级地震发生以来在龙门山构造带(即 NE-SW 方

向展布的最大断裂带)南段发生的又一次强烈地震。在大地构造上, 芦山地震发生在喀拉块体与华南块体相互碰撞的边界断裂带, 即龙门山推覆构造带南段。据中国地震台网速报, 截至 2013 年 4 月 26 日 16 时, 共发生余震 5 086 次, 3 级以上余震 112 次, 其中 5.0~5.9 级 4 次, 4.0~4.9 级 21 次, 3.0~3.9 级 87 次; 仅自 2013 年 4 月 26 日至 2013 年 5 月 12 日短短近 20 天的时间里, 所记录到的余震已达 8 791 次, 包括 3 级以上余震 18 次, 即 4.0~4.9 级增长 1 次, 3.0~3.9 级增长 17 次<sup>[9–15]</sup>。芦山地震区新构造运动活跃, 地质构造相对复杂, 地形起伏度大并拥有天然山高谷深的优势地貌; 地震后产生许多处于松而未垮、动而未滚状态的亚稳定状态的山体(岩土体), 这些岩土体易于在余震及降雨等外在因素刺激作用下发

\* 收稿日期: 2014–03–03    修回日期: 2013–04–28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202235); 中国地震局 2013 年“4.20”芦山地震科考(芦山地震发震构造调查和探测)

作者简介: 刘丽娜(1987–), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事 3S 技术在地震地质灾害应用方面的研究工作。

E-mail: liulin0526@126.com

生坡面暂时失稳,从而加促震后诸如崩塌、滑坡和泥石流等震后次生山地灾害的发生或是增加其发生几率。

芦山地震自发生之日起就引起了国内有关专家的广泛关注,众专家纷纷前往重灾区对地震及其产生的次生山地灾害特征展开大量研究工作,截止到目前主要包括发震构造及动态破裂过程的研究、次生山地灾害活动特征分析和遥感快速解译与空间分布分析及基于专家知识的地震滑坡易发性快速评价等几个方面<sup>[16-27]</sup>。但是,尚未见有基于层次分析法的芦山地震区滑坡易发性评价研究,故本文以芦山县境内一个大致以震中为中心 100 km × 100 km 的正方形区域作为研究区域,采用层次分析法对影响滑坡发生的影响因子进行分级及权重赋值,将 GIS 技术作为操作平台对各个影响因子进行加权叠加以构建研究区内滑坡易发性评价栅格图,为后期滑坡减灾预防措施的制定提供定性和定量参考依据。

## 1 国内外地震滑坡危险性研究进展

国内外与滑坡灾害评价相关的研究至今已有近 40 年历史,以 1980 年代作为分界<sup>[28]</sup>,此前主要针对诸如水库等大型工程在野外广泛调查的基础上进行地质灾害危险性评价;此后重点采用筛选若干基本控制因素和影响诱发因素的多样化评价方法,以合适的数学方法进行加权计算得出稳定性或危险性程度指标。近年来,“3S”(GIS, RS 和 GPS)技术作为新的、先进的技术手段,以实现地震地质灾害解译和分析为目的,不断为滑坡的危险性评价提供新的、精确的理论方法。追溯其发展历程,Brabb 于 1977 年以 GIS 为平台对加利福尼亚 San Mateo 地区的地质灾害进行调查研究,最早将 GIS 技术引入到地质灾害的研究,1998 年 Singhroy、Mattar 和 Gray 结合 InSAR、机载 SAR 与 Landsat TM 遥感影像来识别山体滑坡和斜坡特征,证明了提取滑坡特征和滑坡风险评估应用遥感技术的可行性<sup>[29]</sup>;继 Ehlers 和 Goodenough. D 等 1980 年代后期提出遥感与地理信息系统的一体化<sup>[30]</sup>之后,“3S”技术凭借其强大的数据管理能力和空间分析能力在有效全面的提高滑坡地质灾害研究的精确度以及简化和优化分析过程中成效显著,其在 1990 年代以后得到了更好地发展。我国对“3S”技术的应用虽起步较晚,但进展较快。1980 年在西南地区的二滩大型水电站的前期论证为首次应用遥感技术开展的滑坡研究<sup>[31]</sup>;到 1980 年代中期,已形成较为成熟的航片目视解译和判读的技术方法体系<sup>[32]</sup>;目前,“3S”技术被我国广泛应用

于开展地震区域滑坡调查和重要的单体滑坡调查,伴随着其理论技术的不断成熟其在今后几年在地质灾害中的应用仍会是研究的热点。

针对地震滑坡危险性评价的研究国外重要成果主要有: Pachauri 对喜马拉雅山脉地区通过进行地形分类和滑坡的易发性分区来开展滑坡易发性评价<sup>[33]</sup>; Miles、Refice 和 Peng 参考 Newmark 模型,分别基于 GIS 平台、结合概率模型和考虑地形影响因素对地震滑坡进行评价<sup>[34-36]</sup>; Lee 采用多元统计方法对地震滑坡所进行的评价<sup>[37]</sup>; Kamp 介绍滑坡评价的 4 个步骤,即滑坡的索引图—滑坡易发性分区图—滑坡危险性分区图—滑坡风险评价图<sup>[38]</sup>等。2008 年至今国内主要采用三种方法对地震滑坡危险性评价进行研究<sup>[39]</sup>,即基于索引图的直接评价、基于专家知识方法和基于统计的方法。这些方法在 2008 年汶川地震与 2010 年玉树地震滑坡事件中有较多的应用,如基于专家知识方法<sup>[40]</sup>的层次分析法(AHP)<sup>[41]</sup>的研究,基于二元线性统计<sup>[42]</sup>、逻辑回归<sup>[43]</sup>、人工神经网络<sup>[44]</sup>与支持向量机<sup>[45-46]</sup>等统计方法的成果均有出现。以上的研究成果为我们开展基于层次分析法的芦山地震区滑坡危险性评价提供了研究基础与参考。

## 2 2013 年芦山地震与触发滑坡

芦山地震发生在龙门山断裂带,为一个典型的盲逆断层型地震<sup>[47-49]</sup>。据震后野外调查,芦山地震触发了大量的滑坡,类型多种多样,主要包括破坏型滑坡、连贯型滑坡、流滑型滑坡三大类,细分为岩质崩塌、岩质滑动、岩质崩滑、土质崩塌、土质滑动、土质坍塌、慢土流、与快速流滑<sup>[50]</sup>。许冲等<sup>[50]</sup>根据震后可利用的航片,结合地震后野外实地考察建立的地震滑坡应急分布图,标定了 3 883 处滑坡的位置,多数为小型的岩质崩塌、土质崩塌、岩质滑动。需要说明的是,限于当下可利用的震后高分辨率航片与卫星影像,这一地震滑坡编录成果是芦山地震滑坡的初步解译结果,没有覆盖整个芦山地震区且可能会有较多的小规模滑坡的遗漏<sup>[50]</sup>。图 1 展示了一组芦山地震滑坡的野外考察照片。

## 3 地震滑坡影响因子

地震滑坡产生于主控因子(或要素)和诱发因子(或要素)两个方面的共同作用。其中,主控因子是决定滑坡灾害产生以及发展的内在因子,通常包括地形因子、地层岩性因子、地质构造因子、

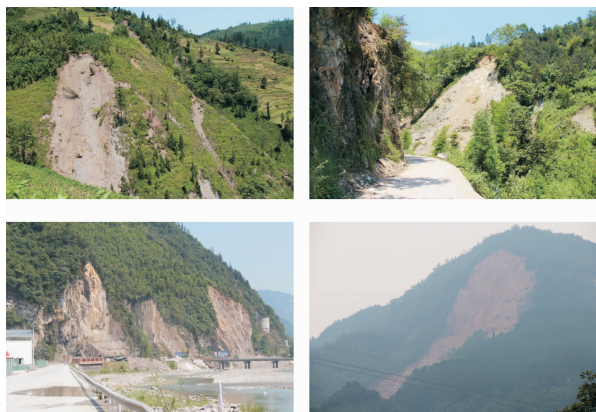


图1 芦山地震触发滑坡野外照片

水文地质因子、植被覆盖因子等;诱发因子是加促地质灾害发生的外在因子,主要有暴雨、地震和人类活动等因子。根据研究区域内震后滑坡特征现将影响滑坡形成的诸多因子概括为3大类,即地形因子、地质因子和地震因子,地形因子和地质因子作为内在因子贡献于滑坡灾害的发生,地震因子作为外在因子影响滑坡发生。其中,地形因子主要包括高程、坡度、坡向和斜坡曲率;地质因子和地震因子分别主要取岩性因子和地面峰值加速度PGA。现将地震滑坡的6个影响因子据研究区特征进行分级,并采用0~9的整数对各个级别进行赋值。采用PoA、PoLN、LC统计分析6个滑坡影响因子与滑坡分布的关系,并衡量影响滑坡的各个影响因子分级赋值所代表的研究区间对地震滑坡影响程度。其中,PoA为分级区间面积占研究区面积百分比;PoLN为滑坡个数占总滑坡个数百分比;LC为滑坡密度,即单位面积内滑坡的个数(个/km<sup>2</sup>)。

### 3.1 地形因子

高程、坡度、坡向和斜坡曲率构成影响研究区域内地震滑坡发生的地形因子,坡度、坡向和斜坡曲率这3个影响因子的栅格数据可在GIS平台下通过数字高程模型(DEM)提取得到。

100 km × 100 km 研究区域内的高程范围为442~5 154 m,采用人工分类的方法将研究区高程进行分组,共依次分为8个等级,442~1 000 m, 1 000~1 500 m, 1 500~2 000 m, 2 000~2 500 m, 2 500~3 000 m, 3 000~3 500 m, 3 500~4 000 m, 4 000~5 154 m。高程与滑坡分布关系如图2所示,分级2处即1 000~1 500 m区间范围滑坡密度最大,达1.08个/km<sup>2</sup>,并且仅占研究区不足20%的范围内所发生的滑坡个数几乎为总滑坡个数的1/2,故此高程范围内发生滑坡的危险性最高;6、7、8分级经统计未有滑坡发生,滑坡密度为0,所以3 000~3 500 m, 3 500~4 000 m, 4 000~

5 154 m高程处发生滑坡危险性最低。据分析结果,将8个高程分级依次赋值为3、5、4、2、1、0、0、0。

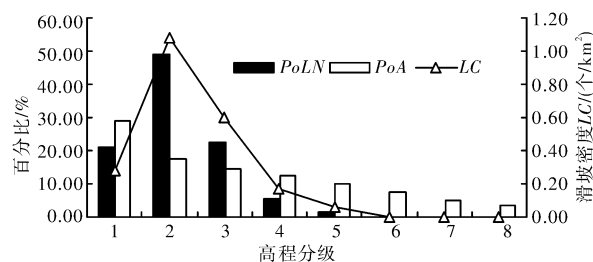


图2 高程与滑坡分布关系图

坡度往往作为从DEM中提取的主要因子常用于滑坡危险性制图研究,坡度的增大,包括重力在内的剪切力也随之增大,故在坡度较大的区域滑坡的危险性亦相对较高;研究区内坡度范围为0°~81.89°,将其依次划分为<5°,5°~10°,10°~15°,15°~20°,20°~25°,25°~30°,30°~35°,35°~40°,40°~81.89°共9个坡度分级。坡度与滑坡分布关系如图3所示,滑坡密度曲线自分级9至分级1以较为平缓的方式由0.72个/km<sup>2</sup>下降到0.05个/km<sup>2</sup>,表现出坡度越大,滑坡发生危险性越大的特点;同时,坡度与滑坡分布关系图反映出9个分级区间所占研究区面积百分比波动较小,坡度在研究区范围内的分布显得十分均匀。据分析结果,将9个坡度分级依次赋值为1、2、3、4、5、6、7、8、9。

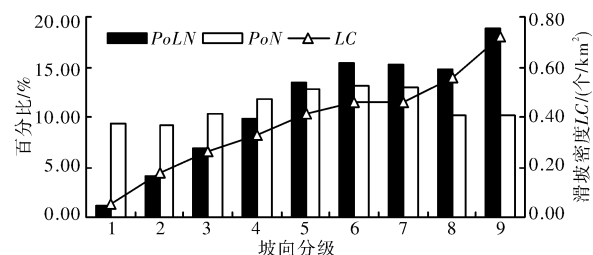


图3 坡度与滑坡分布关系图

坡向造成地震滑坡危险性差异主要与地震波的传播方向、地壳的运动方向以及块体的运动方向相关,同时斜坡干燥程度、光照角度和植被发育情况等也均在一定程度上影响滑坡的发生;按照坡向将研究区依次分为9类,分别为:平坦,北,北东,东,南东,南,南西,西,北西。坡向与滑坡分布关系如图4所示,分级1处的平坦地区所占研究区面积最小,还不及整个研究区面积的5%,仅为3.3%,所发生的滑坡个数与总滑坡个数相比也显得微不足道,仅为总滑坡个数的0.72%;相比之下,分级5处的南东向滑坡密度为0.59个/km<sup>2</sup>,此区域有相对更高的危险性。据分

析结果, 将9个坡向分级依次赋值为1、3、4、5、6、4、3、2、3。

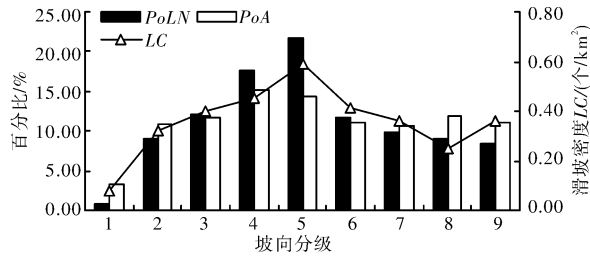


图4 坡向与滑坡分布关系图

斜坡曲率为正值代表斜坡为凸坡, 负值代表凹坡, 斜坡曲率为0或接近于0代表斜坡越平坦, 一般具较陡峭临空面以及地震波放大效应的凸坡发生滑坡危险性越大; 按照斜坡曲率分级标准将研究区依次分为6类, 即 $< -2$ ,  $-2 \sim -1$ ,  $-1 \sim 0$ ,  $0 \sim 1$ ,  $1 \sim 2$ ,  $> 2$ 。斜坡曲率与滑坡分布关系如图5所示, 滑坡密度在 $> 2$ 的凸坡高居第一, 反映出斜坡为凸坡时发生滑坡的危险性大, 斜坡曲率 $-1 \sim 0$ 区间所占研究区面积百分比和滑坡个数占总滑坡个数百分比其他分级赋值区间大, 但滑坡密度几乎为分级6处的1/2, 说明凹坡发生滑坡危险性低。根据分析结果, 将6类斜坡曲率依次赋值为2、2、1、3、3、4。

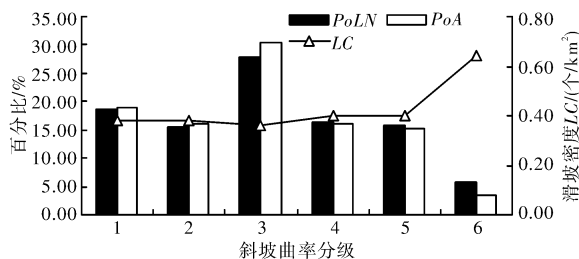


图5 斜坡曲率与滑坡分布关系图

### 3.2 岩性与地面峰值加速度 PGA

地层岩性决定斜坡结构强度, 对地震滑坡的发生具有重要作用。研究区内地层岩组可依次概括为如下11类: I 第四系, II 第三系、白垩系, III 侏罗系, IV 三叠系, V 二叠系, VI 二叠-石炭, VII 泥盆系, VIII 奥陶系、志留系, IX 震旦系, X 前震旦系, XI 花岗岩。地层岩性与滑坡分布关系如图6所示, 滑坡密度分布曲线在研究区地层岩性范围内呈现出较大的波动, 分级2与分级4处滑坡密度分别高达 $0.75 \text{ 个/km}^2$ 和 $0.72 \text{ 个/km}^2$ 表示滑坡在第三系、白垩系以及三叠系地层中多有发生; 滑坡的最危险地层为第三系、白垩系地层, 其次是三叠系, 相比之下第三系、白垩系地层所发生滑坡个数几乎占总滑坡数的1/2。根据分析结果, 将11类岩性依次赋值为2、8、5、7、4、0、3、

1、6、0、4。

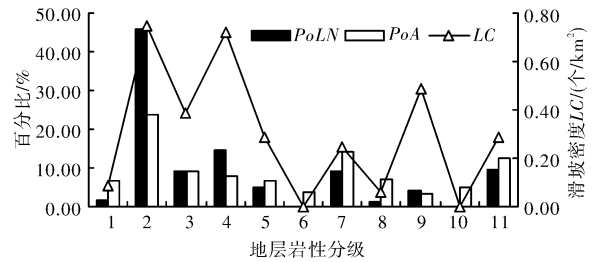


图6 地层岩性与滑坡分布关系图

由于芦山地震的发震断层为一条尚未出露地表深埋于地下的盲逆断层, 没有明确的地表投影位置, 故取地面峰值加速度 PGA 作为唯一影响地震滑坡发生的地震因子。PGA 与区域所经受的震动强度相关, 即 PGA 越大, 区域经受的震动强度往往越大, 滑坡发生危险性越大。将从美国地质调查局 (US Geological Survey) 下载的 PGA 矢量数据依次分为如下14类:  $0.04 \text{ g}$ ,  $0.08 \text{ g}$ ,  $0.12 \text{ g}$ ,  $0.16 \text{ g}$ ,  $0.20 \text{ g}$ ,  $0.24 \text{ g}$ ,  $0.28 \text{ g}$ ,  $0.32 \text{ g}$ ,  $0.36 \text{ g}$ ,  $0.40 \text{ g}$ ,  $0.44 \text{ g}$ ,  $0.48 \text{ g}$ ,  $0.52 \text{ g}$ ,  $0.56 \text{ g}$ 。PGA 与滑坡分布关系如图7所示, 明显看出滑坡分布很不均匀, 滑坡最大密度峰值 $5.05 \text{ 个/km}^2$ 出现在 $0.48 \text{ g}$ 处, 滑坡在此震动强度作用下发生的危险性很大, 在 $0.04 \text{ g}$ 、 $0.08 \text{ g}$ 处滑坡密度值为0, 且在 $0.12 \text{ g}$ 至 $0.28 \text{ g}$ 区间滑坡密度值也均很低, 表明地震区滑坡受 PGA 影响较大, PGA 越小, 滑坡发生的危险性越低; 数据分析显示 $0.44 \text{ g}$ 和 $0.52 \text{ g}$ 处滑坡密度大致相当, 但 $0.52 \text{ g}$ 处滑坡个数占总滑坡数的百分比却是 $0.44 \text{ g}$ 处的2倍以上。根据分析结果, 将14类 PGA 依次赋值为0、0、1、2、2、3、3、4、5、6、5、7、5、3。

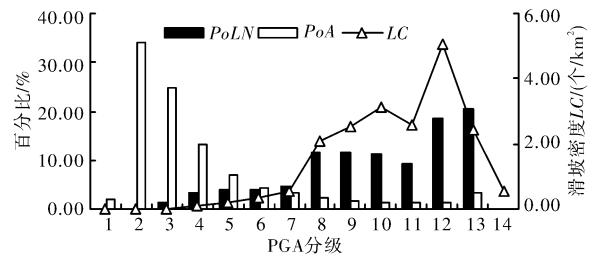


图7 PGA 与滑坡分布关系图

## 4 滑坡危险性评价

### 4.1 层次分析法

层次分析法即 AHP 法, 是基于专家知识通过估计每两个影响因子之间的关系来确定所有影响因子两两比较关系判别矩阵, 从而决定各个影响因子比重的一种多因素分析、多指标分级的评价方法。处于同一层次的若干因子经两两比较总能分

出优劣,两两因子定性比较的数量标度值如表 1 所示。为避免其它因素对判别矩阵的干扰,保证判断矩阵排序的可信度和准确性,在实际中要求进行一致性检验计算  $CI$  值( $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ ,  $n$  表示判别矩阵的阶数),若  $CI = 0$ ,则表示该判断矩阵具有完全的一致性;反之,若  $CI$  值越大,该判断矩阵的一致性就越差,一般要求  $CI$  小于 0.1。当  $n > 3$  时,为消除  $CI$  所受  $n$  的影响,引入平均随机一致性指标  $RI$ ,  $RI$  指标取值<sup>[51]</sup>如表 2 所示。 $CR = CI/RI$ ,一般要求  $CR$  的值小于 0.1,若该值小于 0.1 则表示该判别矩阵具有满意的一致性并能通过一致性检验,否则需要对判别矩阵进行修正。

表 1 判断矩阵标度值及含义

标度值	含义
1	表示两个因子相比,具有同等重要性
3	表示两个因子相比,前者比后者稍微重要
5	表示两个因子相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因子相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因子相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 $i$ 与元素 $j$ 的重要性之比为 $a$ , 那么元素 $j$ 与元素 $i$ 的重要性之比为其倒数

表 2 平均随机一致性指标  $RI$  取值表

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$RI$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

表 3 影响因子权重两两比较矩阵统计表

因子	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$		因子	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	
组 A	$a$	1	1/4	3	1/2	1/5	1/7	0.051 1	组 D	$a$	1	1/6	3	1/2	1/5	1/7	0.044 9
	$b$	4	1	7	3	2	1/2	0.225 1		$b$	6	1	8	5	3	1/2	0.275 2
	$c$	1/3	1/7	1	1/3	1/9	1/9	0.026 7		$c$	1/3	1/8	1	1/5	1/7	1/9	0.024 3
	$d$	2	1/3	3	1	1/4	1/5	0.073 3		$d$	2	1/5	5	1	1/4	1/6	0.067 5
	$e$	5	1/2	9	4	1	1/5	0.185 3		$e$	5	1/3	7	4	1	1/5	0.165 7
	$f$	7	2	9	5	5	1	0.438 5		$f$	7	2	9	6	5	1	0.422 4
组 B	$a$	1	1/3	6	1/3	1/5	1/6	0.069 6	组 E	$a$	1	1/4	5	3	1/5	1/6	0.079 6
	$b$	3	1	7	2	1/2	1/3	0.159 2		$b$	4	1	6	6	1/2	1/3	0.185 1
	$c$	1/6	1/7	1	1/5	1/8	1/8	0.026		$c$	1/5	1/6	1	1/3	1/7	1/8	0.027 2
	$d$	1/3	1/2	5	1	1/5	1/4	0.075 7		$d$	1/3	1/6	3	1	1/6	1/6	0.045 4
	$e$	5	2	8	5	1	1/2	0.283 2		$e$	5	2	7	6	1	1/3	0.249 2
	$f$	6	3	8	4	2	1	0.386 3		$f$	6	3	8	6	3	1	0.413 5
组 C	$a$	1	1/5	4	3	1/6	1/7	0.068 1	组 F	$a$	1	1/5	5	3	1/3	1/6	0.078 3
	$b$	5	1	8	6	1/2	1/4	0.190 3		$b$	5	1	7	6	2	1/4	0.225 9
	$c$	1/4	1/8	1	1/2	1/8	1/9	0.025 9		$c$	1/5	1/7	1	1/2	1/6	1/9	0.026 8
	$d$	1/3	1/6	2	1	1/5	1/6	0.041 8		$d$	1/3	1/6	2	1	1/5	1/7	0.039 5
	$e$	6	2	8	5	1	1/2	0.260 4		$e$	3	1/2	6	5	1	1/5	0.147 4
	$f$	7	4	9	6	2	1	0.413 5		$f$	6	4	9	7	5	1	0.482 1

注:表 3 中  $a \sim f$  分别代表 6 个影响因子,依次为高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性和  $PGA$ 。

## 4.2 危险性模型构建

以诱发滑坡的因子为基础建立评价指标,其中一级评价指标包括地形因子、地质因子和地震因子 3 个指标;二级评价指标包括高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性和  $PGA$  6 个指标;各影响因子两两之间相互影响、相互作用。

滑坡危险性阈值  $R$  可通过影响因子权重与影响因子分级赋值来实现; $R$  值越高,意味着该范围内发生滑坡的可能性越大。所构建的滑坡危险性评价模型为:

$$R = \sum_{i=1}^6 W_i X_i \quad (1)$$

式中:  $W_i$  分别为各影响因子权重;  $X_i$  为各影响因子分级赋值。

为尽量降低估计结果可能产生的较大误差,文中作者采用多名专家估计的方案来建立影响因子两两之间关系构造矩阵,经一致性检验良好后对所得到的特征向量进行归一化处理,所得到的  $A \sim F$  共 6 组影响因子权重两两比较矩阵统计如表 3 所示,并建立如图 8 所示的影响因子权重统计图。统计结果表明,6 组数据影响因子权重之间相关性较好,100 km × 100 km 研究区范围内  $PGA$  是影响滑坡稳定性最严重的因子,坡度与地层岩性对滑坡的影响程度大体相同,故影响因子对芦山地震区滑坡影响程度有如下关系:  $PGA > \text{地层岩性} > \text{坡度} > \text{高程} > \text{斜坡曲率} > \text{坡向}$ 。取 6 组数据的平均值



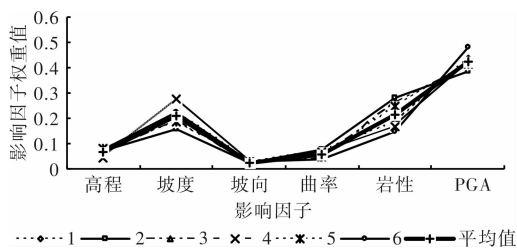


图8 影响因子权重统计图

(注：图8中1~6代表依次对应组A~F权重所形成的折线。)

{0.065 3, 0.210 1, 0.026 1, 0.057 2, 0.215 2, 0.426 1}作为最终所确定的影响因子权重，以构建研究区内滑坡危险性阈值栅格图。

### 4.3 危险性评价结果

利用 ArcGIS 中的栅格计算器工具对各个评价指标进行因子加权叠加后求出滑坡的危险度阈值  $R$ ，从而构建研究区范围内地震滑坡危险度值图层，即基于 ArcGIS 平台将各评价因子的权重值及分级赋值图层代入滑坡危险性评价模型关系式中，接着采用 Raster Calculator 函数进行栅格代数运算并给出泥石流危险度值图；然后，采用 ArcGIS 空间分析中的栅格重分类工具按能保持类别一致性的自然间距分类方法将滑坡危险性阈值图划分为与评价因子分级赋值时对应的5个分区：极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区，同时给出研究区滑坡危险性等级图。滑坡危险性阈值图和滑坡危险性区划图分别如9与图10所示。

研究区滑坡危险性阈值图(图9)分析结果显示，大致以震中太平镇(30.3°N, 103.0°E)为中心约1 000 km<sup>2</sup>范围内图像近似呈现出一个矩形区域，滑坡危险性阈值  $R$  位于该椭圆形区域的绝大部分图像呈现出明显的亮灰白色和少许浅灰白色调，表明该范围内滑坡危险性阈值很大；距离椭圆形区域近10 km以外的环形区域图像以浅灰白色调为主并夹杂部分灰白色调，表明该范围内滑坡危险性阈值较大。仅面积近3 000 km<sup>2</sup>的椭圆形区域与其距离10 km以外的环形区域就有3条空间分布大致平行且尚未出露地表的断层在此穿过，这3条断层分别为双石-大川断裂、大邑断裂和盐井-五龙断裂；其中，大邑断裂为晚更新世隐伏断层，双石-大川断裂与盐井-五龙断裂分别为全新世断层和晚更新世断层，芦山地震即为发生于龙门山推覆构造带南段双石-大川断裂附近的地震。其次，占100 km×100 km研究区2/3以上的区域多呈灰色和灰黑色调，；灰色调较集中分布于近3

000 km<sup>2</sup>椭圆形区域与其距离10 km以外环形区域周围，并且在整个研究区其他范围也有零星分布，灰黑色调分布遍及除灰色调区域范围以外的区域；此区域范围图像颜色相对较深，表明该范围内滑坡危险性阈值较小。

研究区滑坡危险性区划图(图10)分析结果显示，黄色区域代表极高危险区，表示发生滑坡的几率最大，主要集中分布于NNE向双石-大川断裂横穿过的椭圆形区域内，分布面积不足研究区面积的10%，仅占研究区面积的8.46%；紫色区域代表高危险区，该区域发生滑坡的危险性亦很大，仅次于极高危险区，区域除双石-大川断裂主活动断层外，大邑隐伏断裂和盐井-五龙断裂也有穿过，分布面积为10 000 km<sup>2</sup>研究区总面积的15.69%；绿色区域代表中危险区，中危险区在研究区范围内分布面积达到整个研究区面积的28.28%，分布集中于高危险分区周围；红色区域代表低危险区，表示滑坡发生危险性较低，低危险区在整个研究区范围内分布最广，遍布整个研究区范围的80%及以上，分布面积占研究区面积的30.4%；淡蓝色区域代表极低危险区，此区域发生滑坡的危险性最低，除在整个研究区域零星分布外，主要集中于除双石-大川断裂、大邑断裂和盐井-五龙断裂这3条断层外诸如茂汶-北川断裂带、金汤弧形断裂等活动断层临近区域，分布面积占研究区面积的17.17%。

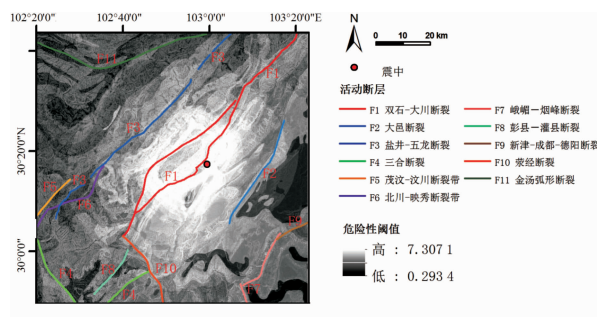


图9 研究区滑坡危险性阈值图

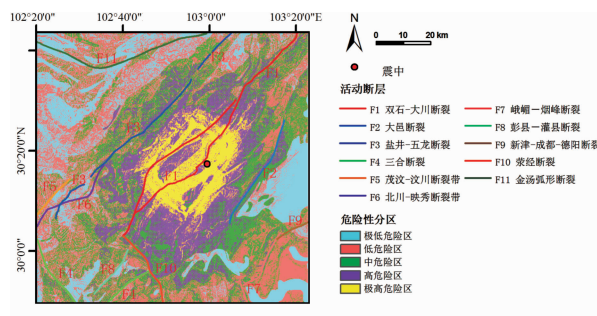


图10 研究区滑坡危险性区划图

## 5 评价结果检验

芦山地震滑坡初步解译结果标定了3 883处滑坡的位置<sup>[51]</sup>,其中3 878处滑坡位于本文的研究区内,通过构建预测滑坡危险性面积百分比累积与实际滑坡数量百分比累积评价结果检验曲线,采用曲线下的面积百分比AUC(Area Under Curve)定量衡量评价结果的准确性,从而实现对100 km×100 km研究区范围内6个滑坡影响因子作用下的滑坡危险性评价结果的准确性检验,滑坡危险性评价结果检验曲线如图11所示。检验结果显示:滑坡危险性评价结果检验曲线呈现出明显的凸形,表明发生在极高危险区和高危险区内的滑坡数量更多,滑坡危险性评价结果的准确率也更高。极高危险区与高危险区面积为2 414.75 km<sup>2</sup>,占整个研究区面积的24.15%,几乎近1/4的研究区面积;极高危险区与高危险区所发生的3 695处滑坡数量占研究区总滑坡数量的95.28%,24.15%的研究区范围能较好的预测到95.28%的滑坡,说明滑坡危险性评价结果相比实际滑坡检验效果好。AUC值为85.41%,即定量衡量滑坡评价结果的准确率为85.41%。

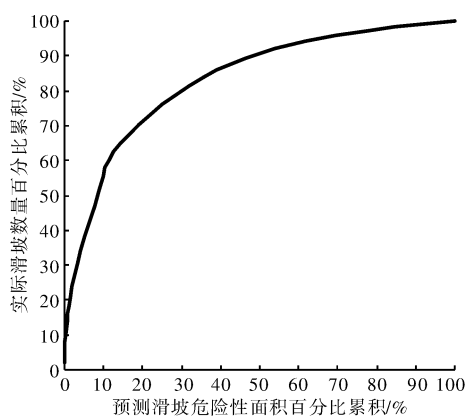


图11 滑坡危险性评价结果检验曲线

## 6 结论

芦山地震区滑坡6个影响因子与滑坡分布关系的研究表明1 000~1 500 m区间范围内发生滑坡危险性较高,此处高程所覆盖的面积占整个研究区面积的17.71%;随着坡度的增加,滑坡危险性也会相应增高,40°~81.6°坡度范围内发生滑坡危险性最高;坡向为南东向时有较高的滑坡危险性;斜坡具有凸坡时发生滑坡的危险性大,凹坡发生

滑坡危险性低的特点;滑坡的最危险地层为第三系、白垩系地层,其次是三叠系,相比之下第三系、白垩系地层所发生滑坡个数几乎占总滑坡数的1/2;PGA越大,滑坡危险性往往也大,滑坡最大密度峰值5.05个/km<sup>2</sup>出现在0.48 g处,滑坡在此震动强度作用下发生的危险性很大。

采用多名专家的估计方案来建立影响因子两两之间关系构造矩阵,经一致性检验良好后对所得到的特征向量进行归一化处理。其中,PGA是影响滑坡稳定性最严重的因子,坡度与地层岩性对滑坡的影响程度大体相同,影响因子对芦山地震区滑坡影响程度有如下关系:PGA>地层岩性>坡度>高程>斜坡曲率>坡向。取6组数据的平均值{0.0653, 0.2101, 0.0261, 0.0572, 0.2152, 0.4261}作为最终所确定的影响因子权重。

GIS平台下所制作的研究区滑坡危险性分区图按照危险性程度划分为5个分区,即极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区。经滑坡危险性阈值图和滑坡危险性区划图分析显示,滑坡极高危险区主要集中分布集中于NNE向双石-大川断裂横穿过的椭圆形区域内,分布面积不足研究区面积的10%,仅占研究区面积的8.46%。所构建的评价结果检验曲线中AUC值为85.41%,表明定量衡量的评价结果准确率较高。

## 参考文献:

- [1] 许冲,徐锡伟,吴熙彦,等. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 25-44.
- [2] Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis [J]. Landslides, 2013. doi: 10.1007/s10346-013-0404-6.
- [3] Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. Landslides triggered by slip-ping-fault-generated earthquake on a plateau: An example of the 14 April 2010, Ms 7.1, Yushu, China earthquake [J]. Landslides, 2013, 10(4): 421-431.
- [4] 许冲,徐锡伟,于贵华. 玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制[J]. 地震地质, 2012, 34(1): 47-62.
- [5] 许冲,徐锡伟,郑文俊,等. 2013年甘肃岷县漳县6.6级地震触发滑坡及其构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 616-626.
- [6] 许冲,徐锡伟,郑文俊. 2013年7月22日岷县漳县Ms6.6级地震滑坡编录与空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 736-749.

- [7] Xu Chong. Correlations of earthquake-triggered landslides volume and seismogenic fault: A case study of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake, China [C]// International Symposium & 9th Asian Regional Conference of IAEG. Beijing: IAEG, 2013: 93–98.
- [8] 许冲, 徐锡伟. 2008 年汶川地震导致的斜坡物质响应率及其空间分布规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (Supp 2): 3888–3908.
- [9] 中国地震局. 4·20 芦山地震专题报道[EB/OL]. (2013–04–20) [2013–04–22]. <http://www.Cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/index.html>.
- [10] 中国地震局. 4·20 芦山地震专题报道[EB/OL]. (2013–04–27) [2013–04–28]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100347/20130427174324060108454/index.html>.
- [11] 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川雅安芦山 6.7 级地震震源破裂过程反演初步结果[EB/OL]. (2013–04–20) [2013–04–21]. [http://www.igg.cas.cn/xwzx/zhxu/201304/t20130420\\_3823903.html](http://www.igg.cas.cn/xwzx/zhxu/201304/t20130420_3823903.html).
- [12] 中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0 级地震断层破裂长度约 40 公里, 最大滑动量达 1.6 米[EB/OL]. (2013–04–23) [2013–04–25]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100343/20130423205445248545384/index.html>.
- [13] 中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震共记录到余震 5086 次[EB/OL]. (2013–04–26) [2013–04–38]. [http://www.eqsc.gov.cn/zt/ljysdzst\\_2191/yztj/201304/t20130426\\_26030.html](http://www.eqsc.gov.cn/zt/ljysdzst_2191/yztj/201304/t20130426_26030.html).
- [14] 中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震共记录到余震 8791 次[EB/OL]. (2013–05–14) [2013–05–15]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/515/20130514143912363341965/index.html>.
- [15] 徐锡伟, 陈桂华, 丁贵华, 等. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. 地学前缘, 2013, 20 (3): 11–20.
- [16] 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.
- [17] 杨宗估. “4·20”芦山 Ms7.0 级地震次生山地灾害特征[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45 (4): 76–83.
- [18] 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.
- [19] 许强, 朱星, 李为乐. “4·20”芦山地震次生波研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40 (3): 225–231.
- [20] 裴向军, 黄润秋. “4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40 (3): 257–263.
- [21] 常鸣, 唐川, 李为乐, 等. “4·20”芦山地震地质灾害遥感快速解译与空间分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40 (3): 275–281.
- [22] 罗永红, 王运生, 何源, 等. “4·20”芦山地震冷竹关地震动响应监测数据分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40 (3): 232–241.
- [23] 陈晓清, 崔鹏, 游勇, 等. 4·20 芦山地震次生山地灾害与减灾对策[J]. 地学前缘, 2013, 20 (3): 1–6.
- [24] 刘成利, 郑勇, 葛桀, 等. 2013 年芦山 7.0 级地震的动态破裂过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43 (6): 1020–1026.
- [25] 许冲, 肖建章. 2013 年芦山地震滑坡空间分布分析—以太平镇东北方向的一个典型矩形区为例[J]. 地震地质, 2013, 35 (2): 435–451.
- [26] 王运生, 全清, 罗永红, 等. 四川芦山 Ms7.0 级地震的地质环境影响分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35 (2): 92–98.
- [27] 许冲. 2013 年芦山 Ms7.0 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.
- [28] 尚永生, 张海峰. 滑坡灾害危险性评价方法研究综述[J]. 山西建筑, 2006, 32 (24): 87–88.
- [29] Nilsen Tor H, Brabb Earl E. Slope-Stability Studies in the San Francisco Bay Region, California [J]. Reviews in Engineering Geology, 1977 (3): 235–243.
- [30] 杨建存, 周成虎. TM 影像的居民地信息提取方法研究[J]. 遥感学报, 2000, 4 (2): 146–150.
- [31] 王治华. 中国滑坡遥感及新进展[J]. 国土资源遥感, 2007 (4): 7–10.
- [32] 卓宝熙. 工程地质遥感判译与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [33] Pachauri, A. K, P. V. Gupta et al. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas [J]. Environmental Geology, 1998, 36 (3/4): 325–334.
- [34] Miles, S B, Ho C L. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18 (4): 305–323.
- [35] Refice A, Capolongo D. Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment [J]. Computers and Geosciences, 2002, 28 (6): 735–749.
- [36] Peng W F, Wang C L, Chen S T, et al. A seismic landslide hazard analysis with topographic effect, a case study in the 99 Peaks region, Central Taiwan [J]. Environmental Geology, 2008, 57 (3): 537–549.
- [37] Lee Chyi-Tyi, Huang Chien-Cheng, Lee Jiin-Fa, et al. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility [J]. Engineering Geology, 2008, 100 (1–2): 43–58.
- [38] Kamp U, Growley B J, Khattak, G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake Region [J]. Geomorphology, 2008, 101 (4): 631–642.
- [39] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡研究灾害综述[J]. 地质论评, 2010, 56 (6): 860–874.
- [40] 许冲. 青海玉树 2010–4–14 地震发震构造与地震滑坡危险性初步评价[J]. 工程地质计算机应用, 2012 (1): 1–14.
- [41] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (Supp 2): 3978–3985.
- [42] Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui River watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region [J]. Journal of Earth Science, 2012, 23 (1): 97–120.
- [43] Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Application of an incom-



- plete landslide inventory, logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping related to the May 12, 2008 Wenchuan earthquake of China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 883–900.
- [44] Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 46: 317–329.
- [45] 许冲, 徐锡伟. 基于不同核函数的 2010 年玉树地震滑坡空间预测模型研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2994–3005.
- [46] Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. *Geomorphology*, 2012, 145: 70–80.
- [47] Xu Xiwei, Wen Xuze, Han Zhujun, et al. Lushan Ms 7.0 earthquake: A blind reserve-fault event [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(28/29): 3437–3443.
- [48] 李传友, 徐锡伟, 甘卫军, 等. 四川省芦山 MS7.0 地震发震构造分析[J]. *地震地质*, 2013, 35(3): 671–683.
- [49] Xu Chong, Xu Xiwei. The spatial distribution pattern of landslides triggered by the 20 April 2013 Lushan earthquake of China and its implication to identification of the seismogenic fault. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(13): 1416–1424.
- [50] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 2013 年四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震触发滑坡[J]. *地震地质*, 2013, 35(3): 641–660.
- [51] 李雅晖, 杨武年, 杨鑫, 等. 基于流域系统的地貌信息熵泥石流敏感性评价[J]. *中国水土保持*, 2011(1): 55–57.

## GIS-based Landslide Hazard Evaluation Using AHP Method in the 2013 Lushan Earthquake Region

Liu Lina<sup>1,2</sup>, Xu Chong<sup>1</sup>, Xu Xiwei<sup>1</sup> and Chen Jian<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China*; 2. *Department of Civil Engineering School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Based on the detailed review on the basis of domestic and foreign research progress on landslide hazard evaluation, the paper selected a great extend square area of 100 km × 100 km that centered around the epicenter as the study area in Lushan earthquake region. With GIS technology as a platform and combined with the feature of Lushan earthquake determined earthquake landslide impact factors for classification; analyzing the relationship between the represented area after a generalized assignment of the six impact factors on elevation, slope, aspect, curvature, lithology, and PGA after the distribution of landslides; zonal area percentage and landslide density index was used to measure the influence degree of various influence factors from earthquake landslide. Secondly, Using the method of AHP set up six relation matrix by six impact factors comparing the two for comprehensive analyzing each parameter weight; the influence factor weight distribution curve analysis results showed that PGA is the most serious factor affecting earthquake landslide and PGA > lithology > slope > elevation > curvature > aspect is a relationship of impact factor to measure the influence degree of landslide Lushan earthquake region; Taking the average of six sets data as the final factor weight to build the landslide hazard threshold grid graph in the study area, and then dividing landslide hazard threshold grid graph into extremely high hazard zone, high hazard zone, middle hazard zone, low hazard zone, extremely low hazard zone which correspond the classification and assignment of evaluation factor; simultaneously, landslide hazard zoning map of the study area was provided. Finally, the rationality of the evaluation results was verified according to the landslide hazard evaluation results test curve of the actual triggered by Lushan earthquake landslide; Verification results showed that the value of AUC is percent 85.41, the accuracy of quantitative measure of landslide evaluation result for percent 85.41 implied that the evaluation results accuracy is higher.

**Key words:** Lushan M7.0 earthquake; landslide; Analytical Hierarchy Process (AHP); GIS; hazard evaluation