

2013年芦山 $M_s7.0$ 级地震滑坡易发性快速评价方法

许冲

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

摘要 2013年4月20日,中国四川省芦山县发生一次 $M_s7.0$ 级强烈地震。地震触发了大量的山体滑坡并造成了严重的灾害。本研究选取地震动峰值加速度、高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性6个地震滑坡影响因子,基于GIS技术开展芦山地震滑坡易发性快速评价工作。基于专家知识与2008年汶川地震研究成果,按照0~9的分级方式,给6个因子赋予权重,给因子内部各个分类赋予滑坡易发等级。根据影响因子权重与因子内部滑坡易发分级,计算出研究区内每个栅格的地震滑坡易发性指数,得到地震滑坡易发性指数索引图。基于3878处芦山地震滑坡开展易发性指数索引图的合理性检验,结果表明正确率超过75%,表明本研究的滑坡易发性评价方法与易发性索引图成果的合理性。将研究区按易发性指数分为5类,分别为极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区,得到研究区滑坡易发性分区图。

关键词 芦山地震;滑坡;易发性评价;人工目视解译;地理信息系统

中图分类号 P642

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.001

Quick Landslide Susceptibly Evaluation and Its Validation for the 2013 $M_s7.0$ Lushan Earthquake

XU Chong

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract On April 20, 2013, a strong earthquake of $M7.0$ occurred at Lushan County, Sichuan Province of China. The earthquake triggered many landslides and some of the landslides resulted in serious hazards. In this paper, six earthquake-triggered landslide impact factors, including the peak ground acceleration (PGA), the elevation, the slope angle; the slope aspect, the slope curvature, and the strata and lithology were selected for a GIS-based quick landslide susceptibility evaluation for the Lushan earthquake. The weights of the six factors and the landslide susceptibility ranks of each factor were assigned in an ordinal rating from 0 to 9 based on the expert knowledge and the information from my previous studies of the 2008 Wenchuan earthquake-triggered landslides. Then, the landslide susceptibility indexes of each grid were calculated and the landslide susceptibility index map of the study area was produced, which was validated based on 3878 landslides triggered by the Lushan earthquake with a success rate of the index map over 75%. This indicates that the method of the quick landslide susceptibility evaluation is reasonable and the result is useful. Finally, based on the landslide susceptibility index values, the study area was divided into five classes, namely the very low susceptibility, the low susceptibility, the moderate susceptibility, the high susceptibility, and the very high susceptibility, and the landslide susceptibility map was produced.

Keywords Lushan earthquake; landslides; susceptibly evaluation; visual interpretation; geographic information system (GIS)

收稿日期:2013-06-24;修回日期:2013-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41202235,91214201);中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1215,IGCEA1302);中国地震局“四川省芦山‘4.20’7.0级强烈地震科学考察”项目

作者简介:许冲,副研究员,研究方向为地震滑坡与活动构造,电子邮箱:xc1111111@126.com;xuchong@ies.ac.cn

0 引言

2013年四川省芦山县 $M_{w}7.0$ 级地震(或 $M_{w}6.6$ 级)触发了大量的滑坡。这些滑坡类型多样,包括岩质崩塌、岩质滑动与土质崩塌等类型^[1]。有的滑坡堵断了公路,破坏了震区的通讯设置,是震区救援生命线工程所面临的最严重的危害与威胁;有的滑坡甚至直接造成了人员伤亡。尽管灾区的紧急救援工作已经结束,然而开展芦山地震后快速的滑坡易发性评价工作可以将地震区按照地震滑坡的易发性分级,可为后续可能的余震或降雨条件下的滑坡防灾减灾,灾后重建中的一些工程的选址提供参考。另外,探索一种快速的地震滑坡易发性评价方法,以为大地震事件的地震滑坡快速易发性与危险性评价提供参考。

目前,二元统计^[2-3]、逻辑回归^[4-20]、人工神经网络^[21-26]、支持向量机^[27-32]等统计分析方法是(地震)滑坡易发性评价常用的方法。这些统计分析方法以滑坡会发生在相似的地形、地质与地震等条件下为前提,以实际发生滑坡为基础,开展不同的地震滑坡影响因子对地震滑坡的影响作用,从而可以得到客观的地震滑坡易发性或危险性评价结果。然而统计分析方法需要有真实的地震滑坡分布数据,由于地震事件触发的滑坡数量多、分布面积广,如2008年 $M_{w}7.9$ 级汶川地震^[33-46]、2010年 $M_{w}7.0$ 级海地地震^[47-49]、2010年 $M_{w}6.9$ 级玉树地震^[50-54]、2005年 $M_{w}7.6$ 级 Kashmir 地震^[55]、1999年 $M_{w}7.6$ 级集集地震^[56]、1994年 $M_{w}6.7$ 级 Northridge 地震^[57]等,完成地震事件触发滑坡的较详细完整的编录工作需要开展大量的野外调查工作,或者要基于覆盖足够大面积的可利用的高分辨率遥感影像,投入大量的时间与精力开展地震滑坡解译工作。然而,要开展的地震滑坡易发性快速评价,等到建立详细的地震滑坡编录图之后显然已经太迟。因此,需要尝试一种不依赖于地震滑坡编录数据的地震滑坡易发性快速评价方法,来开展芦山地震滑坡的易发性评价。

近年来,基于GIS的专家因子分级与权重赋值方法的滑坡危险性评价具有原理简单、对数据要求较低的优势,在许多国家和地区的非地震滑坡评价已经得到了较多成功的应用^[58-64]。这种基于专家知识的因子分级与权重赋值等方法在地震滑坡的易发性或危险性评价研究中的应用较少^[65,66]。因此,有必要开展基于专家知识的因子分级与权重赋值的芦山地震滑坡易发性评价研究工作。且2013年芦山地震发生龙门山断裂的南段,在地形、地质、与地震等方面均与2008年汶川地震有较多类似,汶川地震滑坡分布规律、因子分析、易发性或危险性评价工作已经比较成熟,汶川地震滑坡的相关研究成果^[33-46]可以为芦山地震滑坡的因子分级与权重选择提供可靠的参考信息。

本研究基于2008年汶川地震滑坡影像因子的成熟的分析研究成果与专家知识,选择6个芦山地震滑坡的影响因子,包括地震动峰值加速度(PGA)、高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性,对其进行分级与权重赋值,然后在GIS平台下

对这些因子进行叠加操作,开展研究区地震滑坡易发性评价。

1 研究区

大致以震中为中心,选择一个边长为100km的正方形作为研究区。由于芦山地震为盲逆断层型地震^[67],上盘更容易遭受更多的滑坡灾害,因此在选择研究区时上盘的面积更多(图1)。研究区内在1973年之前发生了5次 ≥ 4.7 级的地震,其中1327年9月的 $M6.0$ 级地震与1970年2月24日的 $M6.2$ 级地震均触发了滑坡,甚至造成了人员伤亡^[68-69];1973—2012年研究区内发生了4次4.7~4.9级的地震(美国地质调查局,USGS,http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/)。

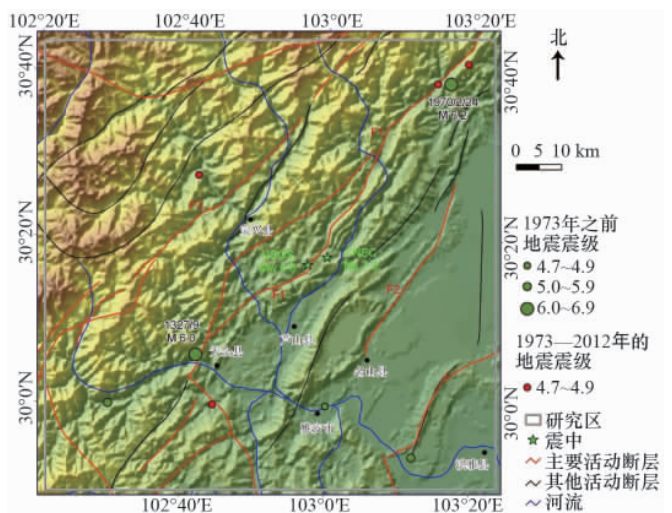


图1 芦山地震区域构造与研究区位置

Fig. 1 Geological setting of the Lushan earthquake struck area and the location of the study area

注:F1:双石-大川断裂;F2:大邑断裂;F3:盐井-五龙断裂。下同。
Notes: F1, the Shuangshi-Dachuan (SD) fault; F2, the Dayi fault; F3, the Yanjing-Wulong fault. The same as below.

2 芦山地震滑坡影响因子及其面积分布分析

选择高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性、PGA 6个因子作为芦山地震滑坡的影响因子。由于芦山地震是一次盲逆断层触发的地震事件^[67],其发震构造未出露地表,且地表投影位置尚不清楚,因此仅选择PGA作为地震因子,暂不考虑发震断裂作为影响因子。

2.1 高程

目前可利用的高程数据主要包括约90m分辨率的SRTM、约30m分辨率的ASTER-DEM。尽管ASTER-DEM的空间分辨率高于SRTM,但是对于一些地形陡峻的区域,SRTM数据的质量要好于ASTER-DEM。因此,本文选择SRTM作为研究区数字高程模型的来源开展研究。为使一些矢量数据(如岩性、PGA)在转换为栅格数据时减少一些边界误差,利

用重采样方法将 SRTM 数据制作为 10m 分辨率的数字高程模型 (DEM)。研究区内的高程范围是 442~5154m, 高程分级标准如下: (1) 442~1000m; (2) 1000~1500m; (3) 1500~2000m; (4) 2000~2500m; (5) 2500~3000m; (6) 3000~3500m; (7) 3500~4000m; (8) 4000~5154m。各个分级所占的面积 (图 2) 表明了分级高程越大, 其覆盖面积越小。大部分区域的高程值相对较低。经统计, 低于 3000m 高程的区域所覆盖面积为 8392km², 占整个研究区的 83.92%。

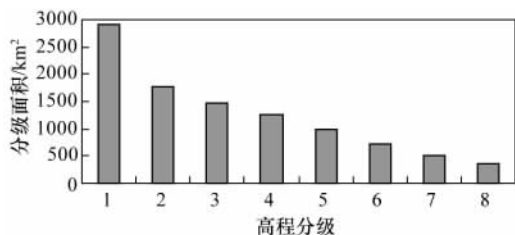


图 2 研究区高程面积分布

Fig. 2 Area distribution in each elevation classes of the study area

2.2 坡度

坡度是对地震滑坡影响较大的一个因素。以往的研究大多表明, 坡度越高, 地震滑坡的易发性越高。整个研究区的坡度范围是 0°~81.9°, 按照如下坡度分级标准将研究区分类: (1) <5°; (2) 5°~10°; (3) 10°~15°; (4) 15°~20°; (5) 20°~25°; (6) 25°~30°; (7) 30°~35°; (8) 35°~40°; (9) 40°~81.9°。各个坡度级别内的面积统计结果见图 3。结果表明, 15°~35°之间的 4 个坡度分级覆盖的面积最大。这 4 个坡度级别所占面积为 5069km², 占整个研究区的 50.69%。

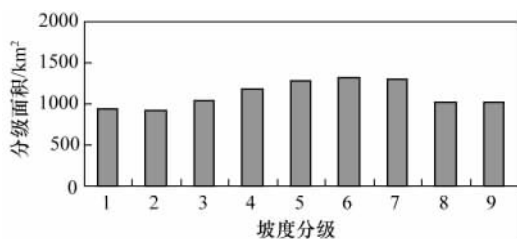


图 3 研究区坡度面积分布

Fig. 3 Area distribution in each slope angle classes of the study area

2.3 坡向

斜坡坡向对地震滑坡也具有一定的影响作用。除了斜坡坡向自身长期以来由于阳光照射、植被发育、降雨的差异导致的滑坡易发性不同之外, 更重要的地震滑坡会受到地震波传播方向与块体运动方向的影响^[33,70,71]。在 GIS 平台下, 将研究区按照坡向分为 9 类: (1) 平坦; (2) 北; (3) 北东; (4) 东; (5) 南东; (6) 南; (7) 南西; (8) 西; (9) 北西。统计每个分级内的面积见图 4。结果表明, 东、南东、南、北西这 4 个分级所占的面积较大。这 4 个分级覆盖面积为 5396km², 占总研究区的 53.96%。

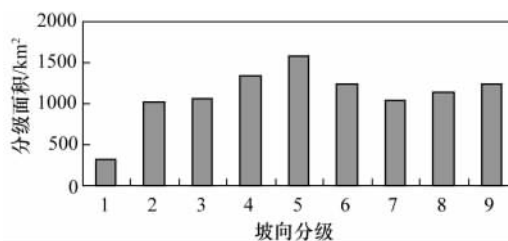


图 4 研究区坡向面积分布

Fig. 4 Area distribution in each slope aspect classes of the study area

2.4 斜坡曲率

斜坡曲率对地震滑坡也有一定的影响, 凸坡的一般具有较陡峭的临空面, 且具有一定的地震波放大效应与震动惯性荷载, 因此容易发生滑坡; 而平坡与凹坡不具有这种效应。曲率为负值代表斜坡为凹坡, 正值代表斜坡为凸坡, 曲率值为 0 或接近 0 代表斜坡的坡面较为平坦, 接近于平坡。本研究中, 将斜坡曲率按照如下分级标准进分为 6 类: (1) <-2; (2) -2~-1; (3) -1~0; (4) 0~1; (5) 1~2; (6) >2。统计每个分级结果内的面积结果见图 5。研究区凹坡所占面积为 6535km², 占总研究区的 65.35%; 凸坡所占的面积仅是 3465km², 占总研究区的 34.65%。覆盖面积最广的斜坡曲率分级是 -1~0, 覆盖面积为 3047km², 占整个研究区的 30.47%。

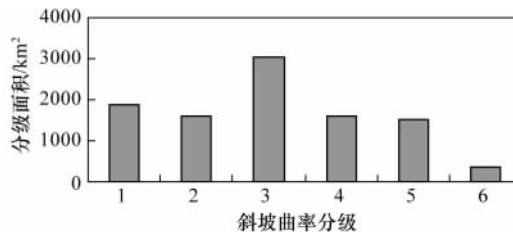


图 5 研究区斜坡曲率分布

Fig. 5 Area distribution in each slope curvature classes of the study area

2.5 地层岩性

地层岩性是决定斜坡的结构强度, 同时也是滑坡发生的物质基础, 因此岩性对地震滑坡的发生具有重要的影响。将研究内按照地层分为如下 11 类: (1) 第四系; (2) 第三系、白垩系; (3) 侏罗系; (4) 三叠系; (5) 二叠系; (6) 二叠-石炭系; (7) 泥盆系; (8) 奥陶系、志留系; (9) 震旦系; (10) 前震旦系; (11) 花岗岩。结果表明, 覆盖研究区最广的地层是第三系与白垩系地层, 覆盖面积 2379km², 占整个研究区的 23.79%; 然后是泥盆系地层, 覆盖面积为 1409km², 占整个研究区的 14.09%; 排在第三位的是花岗岩地层, 覆盖面积为 1258km², 占整个研究区的 12.58% (图 6)。

2.6 PGA

PGA 越大, 区域经受的震动强度越大, 滑坡越易发生。研究区内芦山地震的 PGA 等值线数据提取自从美国地质调查局 (US Geological Survey) 网站^[72]下载的矢量数据。各个分级的

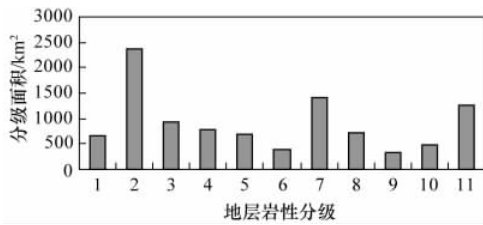


图6 研究区地层岩性分布

Fig. 6 Area distribution in each stratum classes of the study area

PGA 值分别为: (1) 0.04g; (2) 0.08g; (3) 0.12g; (4) 0.16g; (5) 0.2g; (6) 0.24g; (7) 0.28g; (8) 0.32g; (9) 0.36g; (10) 0.4g; (11) 0.44g; (12) 0.48g; (13) 0.52g; (14) 0.56g。由于 0.58g 覆盖的面积很小,因此将其与 0.56g 归为一类。图 7 的统计结果

表明了研究区中覆盖面积最广的 PGA 值是 0.08g 与 0.12g 的分类,分别覆盖面积为 3404km² 与 2479km²,分别占研究区总面积的 34.04%与 24.79%。从 0.04g 到 0.16g 这 4 个分类覆盖面积合计为 7899km²,占整个研究区的 78.99%。这 6 个因子的专题图见图 8。

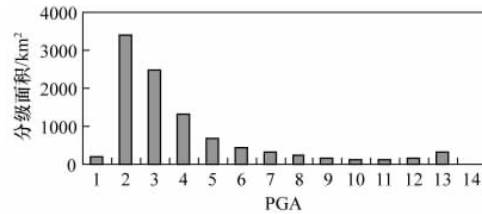
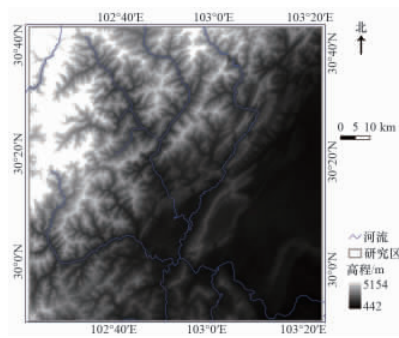


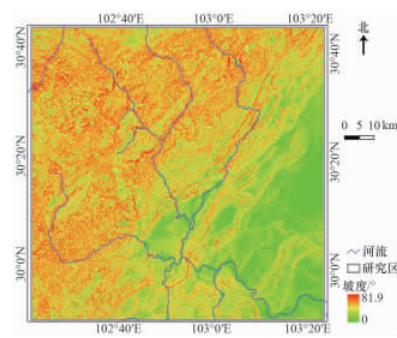
图7 研究区 PGA 分布

Fig. 7 Area distribution in each PGA classes of the study area



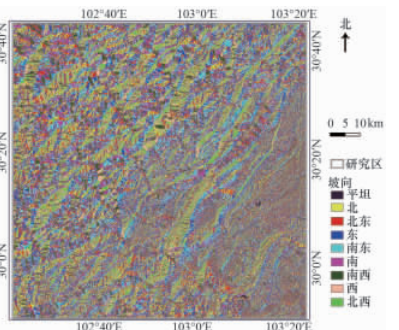
(a) 高程

(a) Digital elevation model



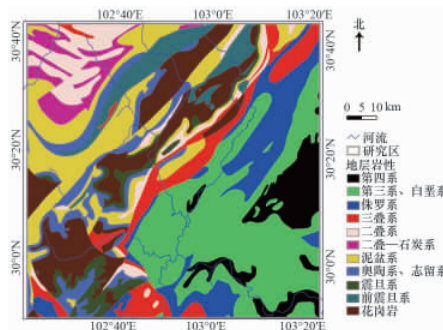
(b) 坡度

(b) Slope angle



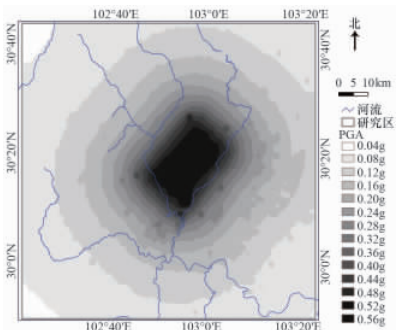
(c) 坡向

(c) Slope aspect



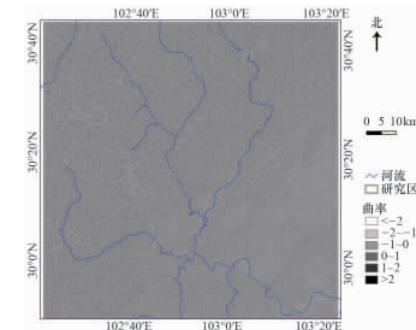
(d) 斜坡曲率

(d) Slope curvature



(e) 地层岩性

(e) Lithology



(f) PGA

(f) PGA

图8 研究区因子专题图

Fig. 8 Thematic maps of the study area

3 地震滑坡易发性评价

3.1 影响因子分级与权重选择

由于 2013 年 4 月 20 日芦山地震发生龙门山断裂的南段,震中距离 2008 年汶川地震的震中仅为约 80km²。两次地震事件的震源机制有类似之处;且地震区域在地形、地质力量有较多的类似。因此,主要根据汶川地震滑坡的一些控制因子内的滑坡分布特征^[3],给予芦山地震滑坡的这 6 个影响因子赋予权重,以及给予各个因子的不同分级赋予级别。因子内各个分级与因子的权重均采用 0~9 的整数值来赋值(表 1)。

表 1 芦山地震滑坡影响因子的权重-级别赋值
Table 1 The Lushan earthquake-triggered landslide susceptibility weighting-rating system

因子	因子分级	因子权重	分级值	因子	因子分级	因子权重	分级值
PGA	1:0.04g	9	1	坡度	1:0°~5°	8	1
	2:0.08g		1		2:5°~10°		2
	3:0.12g		1		3:10°~15°		3
	4:0.16g		1		4:15°~20°		4
	5:0.2g		2		5:20°~25°		5
	6:0.24g		2		6:25°~30°		6
	7:0.28g		3		7:30°~35°		7
	8:0.32g		4		8:35°~40°		8
	9:0.36g		5		9:>40°		9
	10:0.40g		6	坡向	1:平坦	0	
	11:0.44g		7		2:北	3	
	12:0.48g		8		3:北东	5	
	13:0.52g		9		4:东	8	
	14:0.56g		9		5:南东	5	
		6:南	8				
高程	1:442~1000m	4	1	地层	7:南西	7	5
	2:1000~1500m		5		8:西		3
	3:1500~2000m		7		9:北西		1
	4:2000~2500m		9		1:第四系		1
	5:2500~3000m		4		2:第三系、白垩系		1
	6:3000~3500m		5		3:侏罗系		2
	7:3500~4000m		3		4:三叠系		7
	8:4000~5154m		1		5:二叠系		7
曲率	1:<-2	6	1		6:二叠-石炭		3
	2:-2~-1		2	7:泥盆系	5		
	3:-1~0		3	8:奥陶系、志留系	4		
	4:0~1		5	9:震旦系	8		
	5:1~2		7	10:前震旦系	3		
	6:>2		9	11:花岗岩	9		

汶川地震中,滑坡的高密度高程范围为 1400~3000m,滑坡密度随着高程的增加(>3000m)或降低(<1400m)而减少^[3]。在>3000m 的高程范围内滑坡密度下降较慢,在<1400m 的高程范围内滑坡密度值下降较快。因此,将高程范围 2000~2500m 的分级滑坡影响值设置为 9,然后向两侧逐渐减少(表 1);汶川地震中的坡度与滑坡发育密度的统计结果表明滑坡易发性随着坡度的增加而增加^[3],因此坡度分级赋值按照根据坡度从低到高,分级滑坡影响值也从低到高的方式赋值(表 1)。2008 年汶川地震滑坡密度与坡向的统计结果表明,滑坡发生的优势坡向是南东、东、南方向^[3]。这恰好与上盘的逆冲方向是一致的。因此对芦山地震区的坡向赋值也将这 3 个方向设置为滑坡的易发坡向,其余坡向分级的滑坡影响值均低于这 3 个坡向分级,平坦区域的值设置为 0(表 1)。在 2008 汶川地震滑坡^[3]与 2010 年玉树地震滑坡^[5]研究中,基于滑坡面数据(包括滑坡源区与运动堆积区)与斜坡曲率的统计结果表明了凸凹坡均容易发生滑坡,而平坡不易发生滑坡,这是由于松散物质易在凹坡停留汇聚。基于滑坡源区的统计结果表明了凸坡更容易发生滑坡,而凹坡与平坡较不容易发生滑坡。因此,芦山地震滑坡影响区采用从凹坡到凸坡,即斜坡曲率从低到高,滑坡影响值从低到高的方式赋值(表 1)。

汶川地震的岩性与滑坡密度的统计关系表明,滑坡发育的易发岩性为震旦系(Z)砂岩与粉砂岩、元古界花岗岩^[3]。因此,在芦山地震中也将这两类地层岩组的滑坡级别值设置为最高,其他的级别也大概参照 2008 年汶川地震滑坡的相关研究成果^[3]。与其他震例类似,不同的 PGA 分级的滑坡发生级别从高到低的赋值依据 PGA 值从高到低的方式赋值(表 1)。

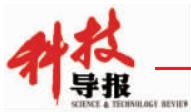
不同因子的权重赋值也参考 2008 年汶川地震的成果^[3],结果见表 1。PGA 是地震滑坡发生的外动力因素,其对地震滑坡的影响最大,将其权重值设置为 9;其次是坡度,坡度对滑坡的发生也起着决定性的作用,将其权重值设置为 8;接下来是地层岩性,其权重值设置为 7;曲率的权重值设置为 6;坡向的权重值设置为 5;高程对滑坡的影响最小,其权重值设置为 4。

3.2 构建研究区滑坡易发性索引图

通过对 PGA、高程、坡角、坡向、斜坡曲率、地层岩性 6 个因子的考虑权重的叠加操作,可获得研究区的地震滑坡易发性索引(Landslide Susceptibility Index,LSI)图。根据因子的权重,这 6 个影响因子按照公式(1)进行基于考虑因子权重的叠加计算,得到研究区内的滑坡易发性索引图(图 9)。

$$LSI=[PGA] \times 9 + [Elevation] \times 4 + [Slope] \times 8 + [Aspect] \times 5 + [Curvature] \times 6 + [Lithology] \times 7 \quad (1)$$

其中,[PGA]为地震动峰值加速度,是一个地震因子;[Elevation]为高程因子;[Slope]为坡度因子;[Aspect]为坡向因子;[Curvature]为斜坡曲率因子;[Lithology]代表地层岩性因子。



从图9可以看出,虽然没有考虑发震断层与上盘因素,但是滑坡的高易发区多位于震中附近的双石-大川断裂的上盘,这主要是因为PGA等值线数据表现出了一定的上盘效应。这一区域内的灵关镇到双石镇的公路沿线,以及灵关镇到宝兴县的公路沿线也的确是芦山地震滑坡多发与易发区域,这与实际情况是一致的。图10表示每个滑坡易发性索引值所覆盖的面积大小分布情况曲线,除个别异常外,滑坡易发性索引值位于中间的部分所占的面积大,而两边所占的面积小。这与其他研究成果^[59,66]得到的趋势相类似,表明应用这种方法得到的成果不受研究区不同的影响。

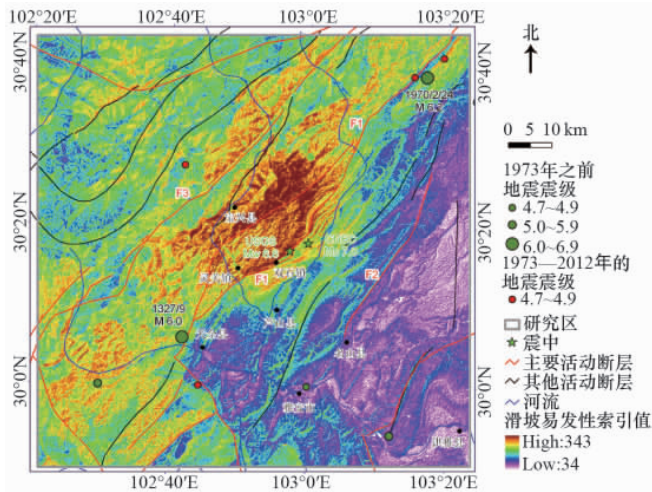


图9 芦山地震滑坡易发性索引
Fig. 9 The Lushan earthquake-triggered landslide susceptibility map of the study area

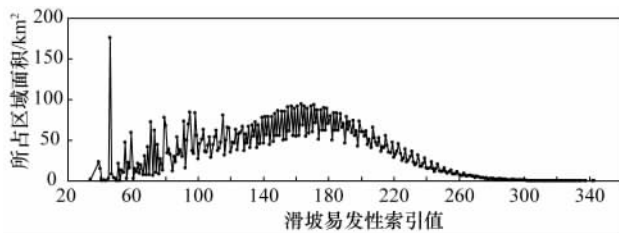


图10 基于LSI的面积分布曲线
Fig. 10 Landslide susceptibility index vs. covering area

3.3 结果检验

采用实际芦山地震触发滑坡来验证结果的合理性。芦山地震后,基于一些可利用的航片,根据芦山地震滑坡实地考察成果^[1]建立的地震滑坡解译标准,开展芦山地震滑坡解译工作,结果表明了在航片覆盖范围内,芦山地震触发了3883处滑坡,其中3878处滑坡分布在本文研究区之内(图11)。利用3878处滑坡开展图9的易发性索引图的定量合理性检验。

以滑坡易发性索引值降序预测结果分级面积百分比累加与对应分级内的实际滑坡数量百分比累加关系来构建评价结果检验曲线(图11)。曲线的弯曲度代表评价结果的优劣,曲线越往上凸,曲线下的面积百分比越大,表明越多的地

震滑坡发生在地震滑坡的高易发区内,评价结果越优秀;反之,则评价结果越差。根据3878处滑坡得到的检验曲线下的面积百分比为75.64%(图12),表明了结果的正确率为75.64%。尽管这不是一个很高的正确率,但是对于没有使用实际滑坡数据的基于专家知识的地震滑坡易发性快速评价来说,这个正确率已是合理的范围之内,表明了评价结果比较客观。

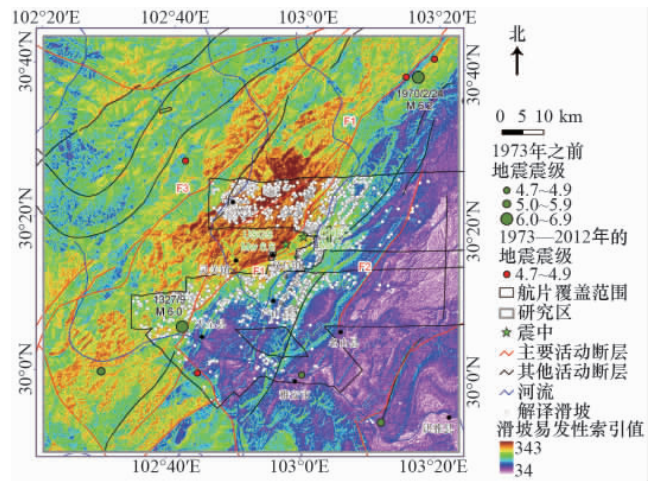


图11 研究区震后航片图像与解译的同震滑坡
Fig. 11 Air photos after the Lushan earthquake of the study area and the interpreted co-seismic landslides

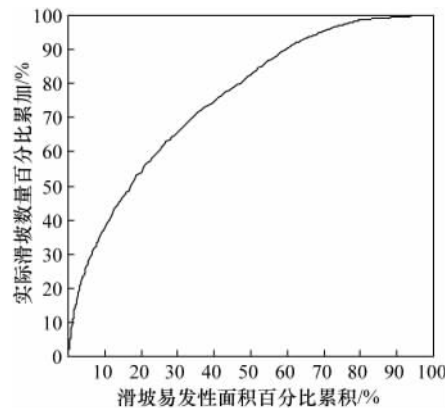


图12 滑坡易发性评价结果检验曲线
Fig. 12 Success rate for landslide susceptibility index map

3.4 构建研究区地震滑坡易发性分级图

滑坡的易发性索引值为34~343,根据等间隔方法,分为5个地震滑坡易发性级别,分别为极低易发区(索引值为34~95)、低易发区(索引值为96~157)、中易发区(索引值为158~219)、高易发区(索引值为220~281)、极高易发区(索引值为282~343),得到整个研究区的芦山地震滑坡易发性结果图(图13)。统计每个滑坡易发性等级的面积分布,其中滑坡极高易发区面积为29.9km²;高易发区面积为931.6km²。两者的面积之和仅占总研究区面积的9.615%。而极高易发区中发生滑坡113处,高易发区发生滑坡1320处,两者中的滑坡占研

究区中目前得到的总滑坡数量的 36.95%。这一比例远高于滑坡极高易发区与高易发区占研究区面积的比率,说明了评价结果的合理性。图 14 展示了基于当前滑坡解译结果的不同分级内的滑坡密度,结果表明滑坡密度随着评价结果易发性等级的升高而升高,且在极高易发区与高易发区的滑坡密度急剧上升,表明了芦山地震滑坡快速评价结果的合理性。

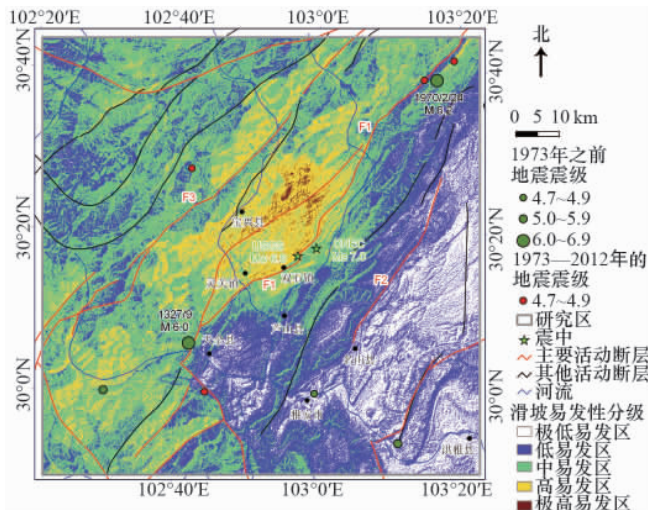


图 13 芦山地震滑坡易发性分级

Fig. 13 Landslide susceptibility maps of the study area

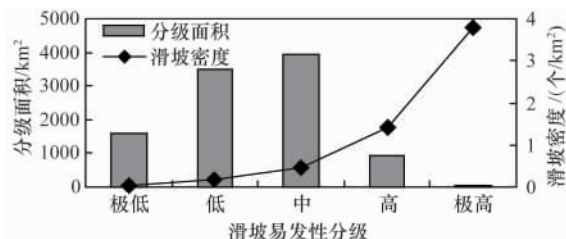


图 14 芦山地震滑坡易发性分级与各分级内滑坡密度

Fig. 14 Landslide susceptibility classes vs. covering area and landslides number density

4 讨论

开展地震滑坡易发性快速评价研究不仅对于地震区应急救援、灾区恢复重建、震后强余震或降雨条件下滑坡防灾减灾具有重要的实际意义,而且对于后续的地震滑坡详细调查,详细地震滑坡编录图的建立也具有重要的科研与指导意义。从图 11 可以看出,灵关镇到双石镇之间区域及其北部区域,宝兴县北东方向约 10~20km 的地区为滑坡极高易发区与易发区,因暂时还没有这些地区的震后遥感数据,通过本研究可以预计这些区域将会发生较多的滑坡,而本文可以给予指导,在后期的整个地震区的地震滑坡详细完整编录工作中需要重点关注这些区域。

天全县西部的一些山区也被划入了地震滑坡高易发区的类别,这些区域虽然经历的地震动较低($PGA < 0.1g$),在芦山地震事件中并没有触发太多的滑坡。但是从地形与地质因子

上来说,是滑坡易发区,在后期强余震与强降雨条件可能会发生较多的滑坡,因此在后期的工作中也应适当的关注。

本研究结果虽然是基于 2008 汶川地震滑坡研究成果与专家知识,但是滑坡易发性评价模型的正确率超过了 75%,表明了本研究的合理性与可取性。但是,基于真实地震滑坡分布数据的统计分析方法是数据驱动,其结果始终优于基于专家知识得到的成果,这也是以后需要注意的一个方面。

5 结论

基于 GIS 平台,选取 PGA、高程、坡度、坡向、斜坡曲率、地层岩性 6 个地震滑坡影响因子,采用基于专家知识与 2008 汶川地震研究基础的因子分级与权重赋值方法,对 2013 年芦山地震灾区覆盖 10^4km^2 的区域开展了滑坡易发性快速评价。根据因子叠加方法建立了研究区地震滑坡易发性索引图。

依据可利用的震后高分辨率航片数据,在研究区内解译得到了 3878 处芦山地震滑坡。应用这些滑坡开展了快速评价结果的合理性检验,结果表明评价结果的正确率超过 75%。

致谢 感谢中国科学院遥感与数字地球研究所、四川省测绘局、中国科学院光电技术研究所提供震后航片。

参考文献 (References)

- [1] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等. 四川省芦山“4.20”7.0 级强烈地震触发滑坡[J]. 地震地质, 2013, 58(3): 3-16.
Xu Chong, Xu Xiwei, Zheng Wenjun, et al. Seismology and Geology, 2013, 58(3): 3-16.
- [2] 许冲, 徐锡伟, 于贵华. 基于证据权方法的玉树地震滑坡危险性评价[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 151-164.
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. Seismology and Geology, 2013, 35(1): 151-164.
- [3] Saha A K, Gupta R P, Sarkar I, et al. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation-with a case study in the Himalayas[J]. Landslides, 2005, 2(1): 61-69.
- [4] Singh L P, van Westen C J, Champati Ray P K, et al. Accuracy assessment of InSAR derived input maps for landslide susceptibility analysis: A case study from the Swiss Alps [J]. Landslides, 2005, 2(3): 221-228.
- [5] Bednank M, Magulová B, Matys M, et al. Landslide susceptibility assessment of the Kral'ovany-Liptovský Mikul's railway case study[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, 35(3-5): 162-171.
- [6] Xu C, Xu X W, Dai F C, 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.
- [7] Xu C, Xu X W, Yu G H. Earthquake triggered landslide hazard mapping and validation related with the 2010 Port-au-Prince, Haiti earthquake[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 1297-1304.
- [8] Xu C, Xu X W, Lee Y H, et al. The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modeling[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1603-1616.
- [9] Oh H J, Lee S. Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system [J]. Environmental

- Earth Sciences, 2011, 62(5): 935-951.
- [10] Pareek N, Shama M L, Arora M K. Impact of seismic factors on landslide susceptibility zonation: a case study in part of Indian Himalayas[J]. Landslides, 2010, 7(2): 191-201.
- [11] Pradhan B, Lee S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling[J]. Environmental Modelling and Software, 2010, 25(6): 747-759.
- [12] Xu C, Xu X W. Controlling parameter analyses and hazard mapping for earthquake triggered-landslides: an example from a square region in Beichuan County, Sichuan Province, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013. doi:10.1007/s12517-012-0646-y.
- [13] Xu C, Xu X W, Yao Q, et al. GIS-based bivariate statistical modelling for earthquake-triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2013, 46(2): 221-236.
- [14] Ayalew L, Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan[J]. Geomorphology, 2005, 65(1-2): 15-31.
- [15] Dai F C, Lee C F, Tham L G, et al. Logistic regression modelling of storm-induced shallow landsliding in time and space on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63(4): 315-327.
- [16] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Application of an incomplete 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.
- [17] Nefeslioglu H A, Gokceoglu C, Sonmez H. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps [J]. Engineering Geology, 2008, 97(3-4): 171-191.
- [18] Garcia-Rodriguez M J, Malpica J A, Benito B, et al. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression[J]. Geomorphology, 2008, 95(3-4): 172-191.
- [19] Park N W. Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 62(2), 367-376.
- [20] 许冲, 徐锡伟. 逻辑回归模型在玉树地震滑坡危险性评价中的应用与检验[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 326-333.
Xu Chong, Xu Xiwei. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 326-333.
- [21] Xu C, Xu X W, Dai F C, 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.
- [22] Sezer E A, Pradhan B, Gokceoglu C. Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(7): 8208-8219.
- [23] Arora M K, Das Gupta A S, Gupta R P. An artificial neural networks approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(3): 559-572.
- [24] Yilmaz I. A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 297-306.
- [25] Yilmaz I. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(4): 821-836.
- [26] Pradhan B, Youssef A M, Varathrajoo R. Approaches for delineating landslide hazard areas using different training sites in an advanced artificial neural networks model [J]. Geo-spatial Information Science, 2010, 13(2): 93-102.
- [27] Brenning A. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(6): 853-862.
- [28] Yao X, Tham L G, Dai F C. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China[J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 572-582.
- [29] Gallus D, Abecker A, Richter D. Classification of Landslide Susceptibility in the Development of Early Warning Systems [J]. Headway in Spatial Data Handling, 2008, 55-75.
- [30] Xu C, Xu X W. Spatial prediction models for seismic landslides based on support vector machine and varied kernel functions: A case study of the 14 April 2010 Yushu earthquake in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 666-679.
- [31] Xu C, Dai F C, Xu X W, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. Geomorphology, 2012, 145-146: 70-80.
- [32] 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.
Xu Chong, Xu Xiwei. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2994-3005.
- [33] Xu C, Xu X W, Yao X, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. Landslides. 2013. doi:10.1007/s10346-013-0404-6.
- [34] Gorum T, Fan X M, van Westen C J, et al. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake[J]. Geomorphology, 2011, 133(3-4): 152-167.
- [35] Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 883-895.
- [36] Parker R N, Densmore A L, Rosser N J, et al. Mass wasting triggered by 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(7): 449-452.
- [37] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. 地质论评, 2010, 56(6): 860-874.
Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. Geological Review, 2010, 56(6): 860-874.
- [38] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [39] 许冲. 汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比[J]. 科技导报, 2012, 30(25): 18-26.
Xu Chong. Science & Technology Review, 2012, 30(25): 18-26.
- [40] 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.
Xu Chong, Xu Xiwei, Wu Xiyan, et al. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 25-44.
- [41] Xu C, Xu X W. Comment on "Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China" by Shengwen Qi, Qiang Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu [Engineering

- Geology 116 (2010) 95–108[J]. Engineering Geology, 2012, 133–134: 40–42.
- [42] Qi S W, Xu Q, Lan H X, et al. Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China [J]. Engineering Geology, 2010, 116(1–2): 95–108.
- [43] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 15–26.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 15–26.
- [44] 许冲, 戴福初, 陈剑, 等. 汶川 Ms8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 745–762.
Xu Chong, Dai Fuchu, Chen Jian, et al. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 745–762.
- [45] 许冲, 戴福初, 姚鑫. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积 [J]. 科技导报, 2009, 27(11): 79–81.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 79–81.
- [46] 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 Mingning, et al. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(3): 737–746.
- [47] 许冲, 徐锡伟. 俯冲带地区压扭断裂型地震触发滑坡及其剥蚀厚度空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 732–744.
Xu Chong, Xu Xiwei. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 732–744.
- [48] Gorum T, van Westen C J, Konup O, et al. Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake[J]. Geomorphology, 2013, 184: 127–138.
- [49] Harp E L, Jibson R W, Dart R L. The effect of complex fault rupture on the distribution of landslides triggered by the 12 January 2010, Haiti earthquake [C]//Proceedings of the Second World Landslide Forum, October 3–7, 2011, Rome, 1–5.
- [50] Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides triggered by slipping-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.
- [51] 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.
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. Seismology and Geology, 2012, 34(1): 47–62.
- [52] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 Ms 7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 289–296.
Yin Yueping, Zhang Yongshuang, Ma Yinsheng, et al. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289–296.
- [53] 许冲, 徐锡伟, 戴福初, 等. 2010 年 4 月 14 日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 505–510.
Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 505–510.
- [54] 许冲, 徐锡伟. 走滑断裂型地震诱发的滑坡在断裂两盘的空间分布差异[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 532–540.
Xu Chong, Xu Xiwei. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 532–540.
- [55] Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery[J]. Landslides, 2007, 4(2): 113–122.
- [56] Wang W N, Wu H L, Nakamura H, et al. Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-chi earthquake in central Taiwan [J]. The Island Arc, 2003, 12(4): 325–334.
- [57] Harp E L, Jibson R W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(1B): S319–S332.
- [58] Pandey A, Dabral P P, Chowdary V M, et al. Landslide Hazard Zonation using Remote Sensing and GIS: A case study of Dikrong river basin, Arunachal Pradesh, India [J]. Environmental Geology, 2008, 54(7): 1517–1529.
- [59] Saha A K, Gupta R P, Arora M K. GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(2): 357–369.
- [60] Shaban A, Khawlie M, Kheir R B, et al. Assessment of road instability along a typical mountainous road using GIS and aerial photos, Lebanon-eastern Mediterranean[J]. Landslides, 2001, 60(2): 93–101.
- [61] Temesgen B, Mohammed M U, Korme T. Natural Hazard Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C, 2001, 26(9): 665–675.
- [62] Saleh B, Al-Sheriadeh M. Mapping of landslide hazard zones in Jordan using remote sensing and GIS [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2000, 126(1): 1–17.
- [63] Wachal D J, Hudak P F. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA[J]. GeoJournal, 2000, 51(3): 245–253.
- [64] Liu J G, Mason P J, Clerici N, et al. Landslide hazard assessment in the Three Gorges area of the Yangtze River using ASTER imagery [C]//IEEE. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 21–25 2003, Toulouse, France, 1302–1304.
- [65] 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(S2): 3978–3985.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3978–3985.
- [66] 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.
Xu Chong. Engineering Geological Computer Applications, 2012(1): 1–14.
- [67] 徐锡伟, 韩竹军, 李传友, 等. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震[J]. 科学通报, 2013, 58(20): 1887–1893.
Xu Xiwei, Han Zhujun, Li Chuanyou, et al. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 1887–1893.
- [68] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
Disaster Prevention Department of National Seismological Bureau. Catalog of strong historical earthquake of China (23 century B.C.—1911 A.D.)[M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [69] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年 Ms \geq 4.7)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
Disaster Prevention Department of China Earthquake Administration. Catalog of modern earthquake of China (1912 A.D.—1990 A.D.)[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999.
- [70] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2972–2981.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2972–2981.
- [71] Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides and slope fissures triggered by the April 14, 2010 Yushu Earthquake, China [J]. Earthquake Research in China, 2013, 27(1): 1–22.
- [72] USGS. Shakemap usb000gcdd [EB/OL]. (2013–03–01)[2013–05–01]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/b000gcdd/>.