

范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在滑坡易发性分区中的应用——以贵州桐梓河流域为例[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 124–129. [Fan Qiang, Ju Nengpan, Xiang Xiqiong, et al. Landslides susceptibility assessment using weights of evidence in the Tongzi watershed, China [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 124–129.]

证据权法在滑坡易发性分区中的应用

——以贵州桐梓河流域为例*

范强¹, 巨能攀¹, 向喜琼², 黄健¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 贵州大学 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003)

摘要:应用证据权法对研究区进行滑坡易发性分区。主要数据源有: 历史滑坡灾害点编录数据、地质图、地形图、数字高程模型。首先对数据源进行处理, 生成地层岩性、离断层距离、高程、坡度、坡向、离道路距离、离河流距离 7 个证据图层。应用 ArcGIS 平台, 将各证据图层与滑坡灾害点图层进行叠加分析, 利用累积权重法对连续数据进行分级, 然后求取对连续数据及分类数据因子等级对滑坡灾害贡献的权重值, 然后对各证据图层两两进行条件独立性检验, 选择 4 组证据图层组合, 参与最终易发性指数计算, 得到 4 幅易发性结果图。应用成功率曲线法对计算结果进行验证, 表明由因子组合 1 得出的计算结果, 为最优的因子组合。根据易发性指数将研究区分为高易发性、中等易发性、低易发性三类, 并将分区图与历史灾害点进行叠加分析, 结果表明评价结果与灾害点分布较为吻合, 说明证据权法应用与滑坡灾害易发性分区的可行性。

关键词:证据权法; 滑坡; 易发性分区; 桐梓河流域; 贵州

中图分类号: P642. 22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2015)01–0124–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2015.01.024

地质灾害易发性评价回答“什么地方最容易发生地质灾害”的问题。地质灾害易发性评价是地质灾害管理中的重要组成部分, 是制定城镇基础设施建设、道桥修建等的重要依据, 也是土地利用规划、同时也是社会可持续发展的必要参考。学者们提出了许多行之有效的地质灾害易发性评价方法, 区域地质灾害易发性分析方法总体可以分为两大类^[1]: 定性评价和定量评价。定性评价方法, 也称为知识驱动方法, 是以专家在野外调查的基础上形成的先验知识, 这样可以确定一些假设来判断哪些情况下有利于发生地质灾害, 从而对影响因素进行权重分配, 最终将各影响因素综合而得地质灾害易发性图。定量方法也称为数据驱动方法, 多为统计方法, 将滑坡灾害编录数据与相关评价因子进行空间关联分析, 采用一定的数学模型, 研究灾害发生与评价因子之间的关系, 从而确定各评价因子的权重, 最后叠加个评价因子得到易发性图。本文采用证据权法对研究区进行滑坡灾害易发性评价。

1 方法介绍

证据权法是一种基于贝叶斯准则综合各种证据层来预测某种事件发生的概率的一种定量方法,

最初用于非空间的医疗诊断支持。Agterberg 等将此方法引入地质领域^[2], 应用空间分析方法, 做矿产预测评价, 后被广泛应用于矿产预测领域, 利用矿产形成后的后验概率来圈定研究区有利成矿部位^[3–4]。近年也被用于地质灾害易发性评价^[5–9]。证据权法本身是一种离散的地学多元统计方法, 其实质是根据已有事件发生时各证据存在的概率, 来推断证据存在时发生该事件的概率。对于滑坡预测, 即将已有滑坡灾害和各个证据因子图层空间关联分析, 得到滑坡点出各个证据因子的分布情况, 来求取各个证据层因子对滑坡发生贡献的大小(权重)。

假设研究区被分为 $N(T)$ 个面积相等的评价单元, 某证据 G 存在的单元数为 $N(G)$, 证据 G 不存在的单元数为 $N(\bar{G})$, 存在滑坡的单元数为 $N(L)$, 不存在滑坡的单元数为 $N(\bar{L})$ 。则每个单元当证据层 G 存在时, 发生滑坡的前验概率为 $P\{L|G\}$, 如式(1)所示。

$$P\{L|G\} = \frac{P\{L \cap G\}}{P\{G\}}. \quad (1)$$

用 $O(x)$ 表示几率, 即 x 发生的概率与不发生的概率比值。

$$O(x) = P(x)/[1 - P(x)]. \quad (2)$$

* 收稿日期: 2014–06–30

修回日期: 2014–09–10

基金项目: 国家自然科学基金(41302242)

作者简介: 范强(1981–), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事地质灾害评价及监测预警方面的工作。

E-mail: fanq@cdut.edu.cn

$$O\{L/G\} = \frac{P\{L/G\}}{1 - P\{L/G\}} = \frac{P\{L|G\}}{P\{\bar{L}|G\}} = O\{L\} \times \frac{P\{G|L\}}{P\{G|\bar{L}\}}. \quad (3)$$

Logit(x) 表示对几率取自然对数,表示 x 发生的逻辑概率。则对式(3) 两侧取自然对数得到:

$$\text{Logit}\{L|G\} = \text{Logit}\{L\} + \ln \frac{P\{G|L\}}{P\{G|\bar{L}\}} = \text{Logit}\{L\} + W^+. \quad (4)$$

同理,当证据层 G 不存在时有:

$$\text{Logit}\{L|\bar{G}\} = \text{Logit}\{L\} + \ln \frac{P\{\bar{G}|L\}}{P\{\bar{G}|\bar{L}\}} = \text{Logit}\{L\} + W^-. \quad (5)$$

其中:

$$W^+ = \ln \frac{P(G|L)}{P(G|\bar{L})} = \ln \frac{N(G \cap L) \times N(\bar{L})}{N(G \cap \bar{L}) \times N(L)}, \quad (6)$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{G}|L)}{P(\bar{G}|\bar{L})} = \ln \frac{N(\bar{G} \cap L) \times N(\bar{L})}{N(\bar{G} \cap \bar{L}) \times N(L)}, \quad (7)$$

$$C = W^+ - W^-. \quad (8)$$

式中: W^+ 为证据层存在时的权重, W^- 为证据层不存在时的权重,当 $W^+ > 0$ 或者 $W^- < 0$ 时,影响因子与滑坡地质灾害呈正相关,当 $W^+ < 0$ 或者 $W^- > 0$ 时,证据层与滑坡地质灾害呈负相关,当 $W^+ = 0$ 或者 $W^- = 0$ 时,证据层与滑坡地质灾害呈不相关。 C 表示综合权重, C 值为正表示滑坡与证据层之间呈正相关,且其值越大,相关性越大,越利于滑坡的发生,反之则不利于滑坡发生^[10-11]。

当存在多个证据层时,假设各个证据层之间满足条件独立性假设,则各个证据层叠加后发生灾害的条件概率为:

$$\text{Logit}\{L|G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n\} = \text{Logit}\{L\} + \sum_{i=1}^n W_i^+, \quad (9)$$

$$\text{Logit}\{L|\bar{G}_1 \cap \bar{G}_2 \cap \dots \cap \bar{G}_n\} = \text{Logit}\{L\} + \sum_{i=1}^n W_i^-. \quad (10)$$

2 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市,由桐梓县、仁怀县、遵义县及习水县的部分区域组成,幅员 2 991 km²,东西跨度 55 km,南北长约 88 km。区内海拔高度在 462 m 和 1 860 m 之间,平均海拔高度为 1 200 m。研究区亚热带季风气候,对研究区 1990—2005 年温度进行统计,平均温度为 13.3 ℃。年平均降雨量为 1 010 mm,主要集中在 4 月到 10 月,占总降雨量的 82%。作为典型的西南山区喀斯特地貌,研究区内地质条件较为复杂,出露地层最老为震旦纪,最新为侏罗纪,缺失泥盆纪和石炭纪地层,其中寒武纪、三叠纪及二叠纪碳酸盐岩广泛分布。区内构造活动强烈,断层分布密集,主要发育 4 组北东向的断层及北西向的次级断层,研究区东部边缘发育一组南北向的断层。特殊的自然气候条件,加上道路修建、矿产资源开采等人类工程的扰动,使得研究区内发生大量的地质灾害。主要类型有滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等。

3 评价数据及评价因子

3.1 评价数据

本次评价收集到的数据主要有:1:5 万滑坡灾害详查数据,1:5 万地质图,1:5 万地形图,Aster GDEM 30 m 空间分辨率数据。根据地质图提取了地层岩性图层、断层要素图层;根据地形图提取了道路图层、水系图层;根据 DEM 数据生成了坡度、坡向。

3.2 评价因子分析

3.2.1 水系

水系是影响滑坡灾害的重要因素,底部侵蚀和侧蚀改变了斜坡的临空面状态,使得坡体内部应力发生改变,从而影响坡体的稳定性。本文所用水系数据来自于 1:5 万地形图,数字化为水系线状元素。为了分析水系与滑坡灾害的空间关联关系,将滑坡点图层与水系图层做空间关联分析,分别计算每个评价单元到最近水系线的水平面上的最短距离,应用 ArcGIS 中的 Euclidean Distance 工具求得距水系欧氏距离图,每个像素单元的值表示该单元到最近水系的水平距离。

3.2.2 道路

道路对地质灾害发生有着明显的影响,往往道路两旁发生地质灾害的概率较大。道路对滑坡灾害的发生主要体现在两个方面:道路修建会采取切坡或者填坡的方式,改变了坡体内部应力状态,是坡体趋于不稳定。道路修建时,引起了坡体变形。汽车在道路上行驶所产生的震动,加剧了坡体变形的速度。道路对坡体稳定性的影响随距离变化,离道路越近,影响越大。为分析道路与滑坡灾害的空间关联关系,同样将制作道路欧氏距离图,图上每个像元表示该单元到最近道路的水平距离。

3.2.3 断层

断层主要从两个方面影响滑坡灾害的发生^[12]:断层周围由于地层挤压或拉裂,使得岩石比较破碎,同时加剧了风化速度,其力学强度降低,稳定性降低;断层形成有利于滑坡灾害发生的地形条件。本文采用的断层图层来自 1:5 万地质图,并采用 Euclidean Distance 工具制作距断层线欧氏距离图。

3.2.4 地层岩性

坡体的地层岩性,决定了岩体的物理化学特性,从一定程度上决定了坡体的破坏失稳方式。本文的地层岩性图层来自 1:5 万地质图,并按照岩体的工程特性,将各地层单元划分为 4 类地层岩组:硬质岩体、较硬质岩体、软硬互层岩体、软质岩体。

3.2.5 地形地貌

地形地貌包括高程、坡度、坡向等方面。坡

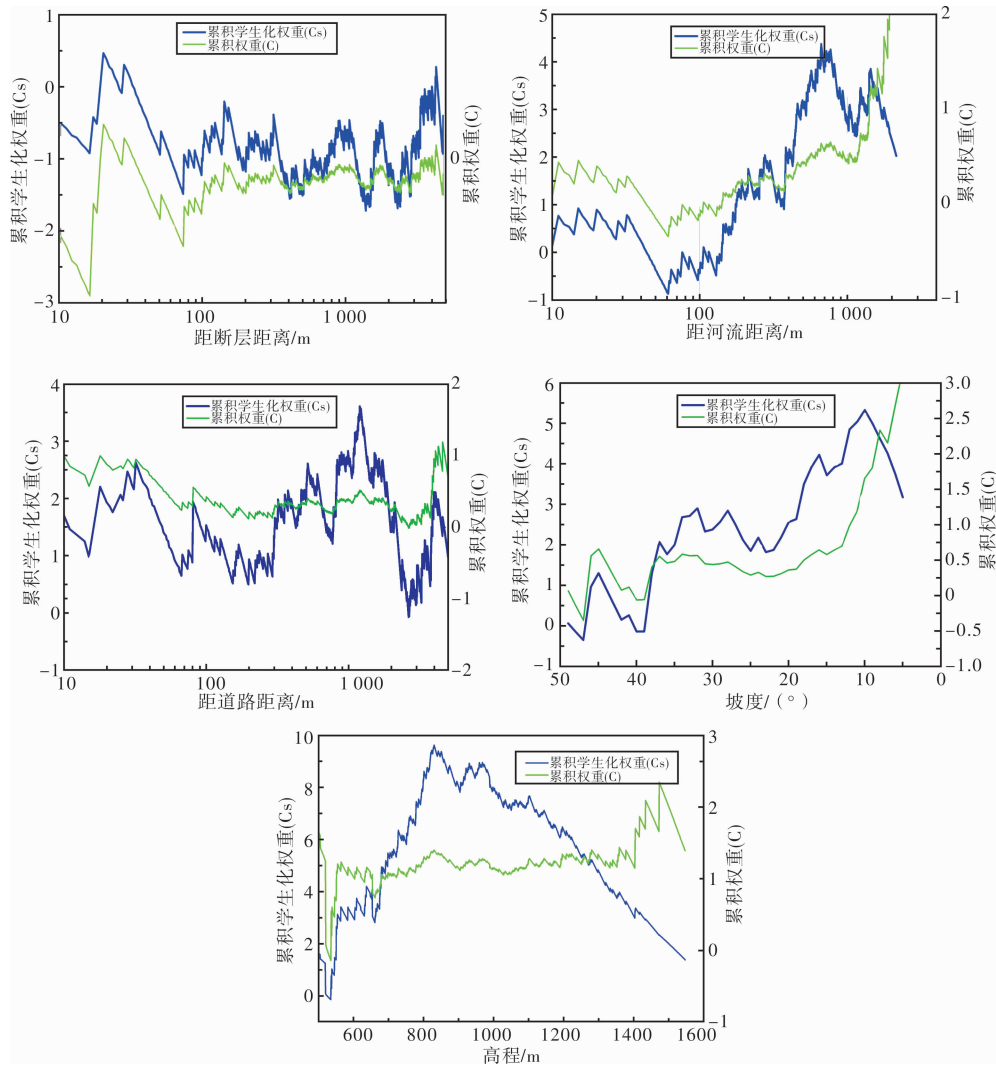


图1 累积权重曲线图

度被广泛用着地质灾害危险性评价因子,不同坡度坡体,其内部应力分布不同,稳定性不同,研究表明坡度越大越利于发生地质灾害;坡向决定了坡体受阳光照射时点及时长,进而影响岩体风化速度,从一定程度上影响着地质灾害的发生;不同高程的地方,受河流切割作用不同,往往形成不同的地形地貌,其与地质灾害的分布存在一定关联关系。高程、坡度、坡向图层均由 Aster GDEM 数据生成。

3.3 证据因子分级

证据层因子有分类数据(地层单元等)和连续数据(坡度、距河流距离等),要对评价因子进行权重计算,需要对评价因子进行等级划分。以往的应用中,往往根据专家经验等将评价因子人为地分为若干等级,这种依据先验知识的划分方法具有一定的可行性,但难免具有一定的主观性,由于研究区实际特性的差别,在根据经验划分等级后,存在将对滑坡贡献差别较大的因素划分在一个等级之中的情况,割裂了评价因子和滑坡灾害点的原始空间关联关系。最适宜的等级划分应

该将对滑坡具有相同或相似影响程度的范围划分为一个等级,使得依据这些分类求取的各等级权重更具统计意义。对于分类数据,笔者采用普遍使用的方法,即根据专家经验及前人研究成果,按照对滑坡影响程度相近的原则,将分类数据归纳为较少的几个等级。而对于连续数据,本文采用累积权重拐点法来进行分类,先计算累积权重(W^+ 、 W^- 、 C),然后根据累积权重曲线的拐点作为证据层因子等级的边界值,将证据层因子划分为若干个等级。最后重新计算各因子等级的权重,再和累积权重进行比较分析,在必要的情况下,调整分类。为更加明显的显示权重曲线的拐点,引入学生化权重(C_s),计算公式见公式 11,各连续数据的累积权重曲线见图 1,各因子等级划分见表 1。

$$C_s = C / \sqrt{s^2(W^+) + s^2(W^-)} \quad (11)$$

式中: $s^2(W^+)$ 和 $s^2(W^-)$ 分别表示 W^+ 和 W^- 的方差,其粗略计算公式如下:

$$s^2(W^+) = \frac{1}{N(G \cap L)} + \frac{1}{N(\bar{G} \cap \bar{L})}, \quad (12)$$

$$s^2(W^-) = \frac{1}{N(\bar{G} \cap L)} + \frac{1}{N(G \cap \bar{L})} \quad (13)$$

表1 证据层因子等级权重

评价因子	因子等级	W^+	W^-	C
坡向	45 ~ 135	0.124	-0.046	0.170
	135 ~ 225	-0.072	0.021	-0.093
	225 ~ 315	0.143	-0.052	0.194
	315 ~ 360, 0 ~ 45	-0.235	0.073	-0.308
坡度/m	0 ~ 10	1.582	0.255	-1.837
	10 ~ 25	0.223	-0.328	0.551
	25 ~ 35	0.221	-0.045	0.266
	35 ~	0.605	-0.047	0.652
高程/m	< 650	0.964	-0.049	1.013
	650 ~ 850	1.003	-0.269	1.272
	850 ~ 1 200	-0.048	0.056	-0.104
	> 1 200	-1.003	0.322	-1.325
距断层距离/m	0 ~ 70	-0.584	0.025	-0.609
	70 ~ 200	-0.080	0.008	-0.088
	200 ~ 500	-0.123	0.023	-0.146
	500 ~ 1 000	0.147	-0.035	0.182
距河流距离/m	1000 ~	0.043	-0.047	0.090
	0 ~ 60	0.214	-0.007	0.220
	60 ~ 150	0.074	-0.007	0.082
	150 ~ 300	0.324	-0.049	0.373
距道路距离/m	300 ~ 700	0.264	-0.123	0.386
	700 ~	-0.334	0.246	-0.579
	0 ~ 40	0.275	-0.013	0.288
	40 ~ 300	0.180	-0.021	0.201
工程岩组	300 ~ 700	0.079	-0.015	0.094
	> 700	-0.065	0.147	-0.212
	硬质岩体	-0.593	0.234	-0.828
	软硬互层岩	0.194	-0.125	0.319
	较硬质岩体	-0.022	0.008	-0.029
	软质岩体	0.777	-0.065	0.842

4 易发性评价

4.1 权重计算

根据式(6)、(7)、(8),分别计算每个证据因子等级的权重,见表1。从表中可以看出,坡向为东、西的因子等级与滑坡发生呈正相关,南北向呈负相关;当坡度小于 10° 时,不利于滑坡发生,大于 35° 则有利于滑坡发生;高海拔地区(> 850 m)与滑坡呈负相关,高程低于850 m的地区则有利于滑坡的发生,这 and 低海拔地区人类活动对自然界扰动大有关;对于距断层距离,根据以往研究成果,一般认为距离断层距离越近,越利

于发生滑坡地质灾害,而计算结果恰恰相反,表现出距离断层距离越近,越不利于发生滑坡地质灾害的关系。对于河流对滑坡的影响,表现出距河流距离大于700 m时不利于滑坡发生的特征,而在300 ~ 700 m之间,则表现出较强的正相关。离道路越近的地方,越利于发生滑坡,这与道路修建过程中的切坡及填坡工程,改变斜坡内部应力状态,以及汽车行驶产生的震动有关。对于地层岩性,软性岩体及软硬互层岩体均与滑坡发生呈正相关,而硬质岩体和较硬质岩体与滑坡发生呈负相关。

4.2 条件独立性检验及因子优选

由于证据权法基于贝叶斯法则,参与评价的各个证据层相互之间均应满足条件独立性假设。因此,在计算最终的权重和之前,必须对各个证据层因子进行两两条件独立性检验,选择满足条件独立性检验的因子组合进行综合计算^[13]。采用卡方检验(χ^2)对各个证据层进行条件独立性检验。首先要将各个证据因子图层转换为二值模式图层,按照权重计算结果划分,将各个因子等级重新分类为二值模式(0:不利于滑坡发生、1:利于滑坡发生)。如前所述,证据层权重 C 表示证据因子等级对滑坡灾害的综合权重, $C > 0$ 表示利于滑坡发生, $C < 0$ 表示不利于滑坡发生, $C = 0$ 表示没有统计意义或者与滑坡发生没有关系。故将 $C > 0$ 的等级所在单元赋值为1,将 $C = 0$ 、 $C < 0$ 的等级所在单元赋值为0。将滑坡灾害点图层与二值模式图叠加分析,计算其观测值和期望值,得到 2×2 列联表如表1。并根据列联表计算卡方值式(14)。由于将证据层简化成了二值模式,故自由度为 $(2 - 1) \times (2 - 1) = 1$,在99%的置信水平下,查表得到其临界值为6.635,即若计算所得卡方值大于6.635,表示条件独立性假设不成立,两组证据层因子不能同时参与最终易发性值计算。条件独立性检验结果见表3。其中高程和距河流距离(χ^2 为14.742)、工程岩组和距道路距离(χ^2 为10.461)不能同时参与最终的易发性计算。根据检验结果可知,有4种证据因子组合满足条件独立性假设,分别是:

组合1:坡向、坡度、高程、距河流距离、工程岩组

组合2:坡向、坡度、高程、距河流距离、距道路距离。

组合3:坡向、坡度、距断层距离、距河流距离、工程岩组。

组合4:坡向、坡度、距断层距离、距河流距离、距道路距离。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (14)$$

4.3 易发性指数计算及检验

根据表1,对每个因子图层赋权重值,将每个

表 2 2 × 2 列联表

	观测频率(O_i)			期望频率(E_i)		
	A_1	A_0	合计	A_1	A_0	合计
B_1	$A_1 \cap B_1 \cap L$	$A_0 \cap B_1 \cap L$	$B_1 \cap L$	$(A_1 \cap L)(B_1 \cap L)/L$	$(A_0 \cap L)(B_1 \cap L)/L$	$B_1 \cap L$
B_0	$A_1 \cap B_0 \cap L$	$A_0 \cap B_0 \cap L$	$B_0 \cap L$	$(A_1 \cap L)(B_0 \cap L)/L$	$(A_0 \cap L)(B_0 \cap L)/L$	$B_0 \cap L$
合计	$A_1 \cap L$	$A_0 \cap L$	L	$A_1 \cap L$	$A_0 \cap L$	L

表 3 条件独立性检验结果(χ^2)

	坡向	坡度	高程	距断层距离	距河流距离	距道路距离	工程岩组
坡向		0.179	1.778	0.024	0.423	0.002	3.767
坡度			4.765	0.414	1.525	0.173	3.616
高程				3.182	14.742	3.678	3.488
距断层距离					0.004	0.265	5.302
距河流距离						1.938	0.335
距道路距离							10.461
工程岩组							

评价单元各个因子等级的权重叠加，得到该单元最终的易发性指数(LSI)，见式(15)。分别对选取的4种因子组合进行易发性指数计算。采用成功率曲线法^[14]选取最优的因子组合，即将滑坡灾害点图层与最终计算的易发性指数图层进行叠加分析，按照易发性指数从高到低的评价单元累积面积比例(横坐标)与落在这些评价单元中的滑坡比例(纵坐标)作图，生成一条曲线，曲线下方的面积(AUC)越大，表示发生滑坡的单元易发性指数越高，模

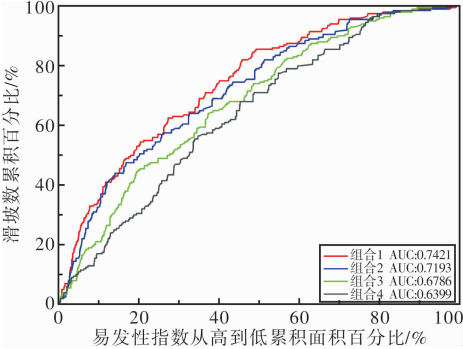


图 2 成功率曲线图

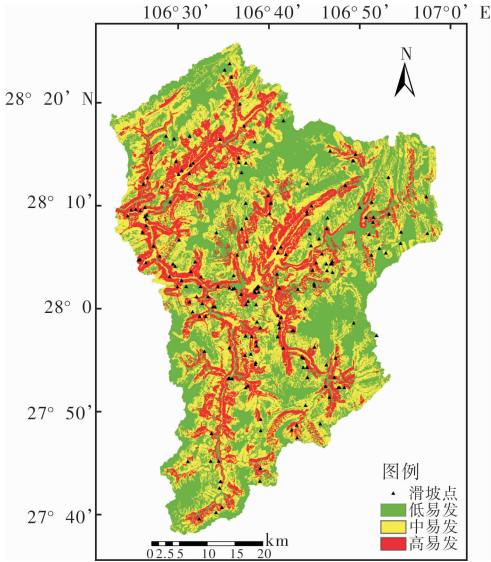


图 3 易发性分区图(根据因子组合 1)

型的对滑坡灾害点的拟合性越好^[15-16]，成功率曲线图见图2。因子组合1计算出来的易发性指数图的成功率曲线下方面积最大，为0.7421，故组合1为最优因子组合，本次评价采用因子组合1计算结果作为最终评价结果。从图1中因子组合1计算结果的成功率曲线可以看出，在易发性指数从高到低20%的评价单元中，发生的滑坡占总数的54%，说明这次评价的结果比较好。将易发性指数分为高易发(易发性指数从高到低20%区域)、中易发(易发性指数从高到低20%~60%区域)及低易发(易发性指数从高到低60%~100%区域)三级，得最终易发性分区图(图3)。

$$LSI = \sum_{i=0}^n C_{ij} \quad (15)$$

5 结语

本文采用证据权法对研究区进行滑坡地质灾害易发性评价，采用成功率曲线法对评价结果进行验证，其最优因子组合计算结果的AUC为0.7421，表明多数滑坡发生在易发性指数较高的单元，评价效果较好。将研究区按照易发性指数分为高易发区、中易发区、低易发区。其中高易发区占总面积的20%，有54%的滑坡点发生；中易发区占总面积的40%，有34%的滑坡发生；低易发区占总面积的40%，有12%的滑坡发生。这次评价过程中，有如下几点认识：

(1)在地质灾害易发性评价中，评价因子的数量影响着评价结果的准确性和可信度，这是因为地质灾害影响因素的复杂性和多样性，但是如果简单地引入较多的评价因子，不对评价因子做独立性分析，所得结果往往适得其反。

(2)累积权重曲线法对连续数据进行分级有一定指导作用，分级结果较为客观，但统计样本的数量从一定程度上限制了该方法的使用。故在采用该方法时尚需结合定性分析来进行因子等级划分。

(3)对评价结果的验证采用成功率曲线法,该方法能从多种评价因子组合中选取最优因子组合,但由于滑坡灾害点数量有限,本文验证结果选用的滑坡灾害点同时也是参与权重计算时的滑坡灾害点,评价结果的预测效果还需以后该区域新的滑坡灾害发生后才可验证。

参考文献:

- [1] 谢洪斌,杨雪,谭德军,等. 模糊证据权法在地震滑坡危险度区划中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 164-170.
- [2] Agterberg F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation[J]. Nonrenewable Resources, 1992, 1(1): 39-50.
- [3] 刘世翔,薛林福,鄢瑞卿,等. 基于GIS的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007(5): 889-894.
- [4] 陈建平,陈勇,王全明. 基于GIS的多元信息成矿预测研究——以赤峰地区为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 18-26.
- [5] 赵艳南,牛瑞卿. 基于证据权法的滑坡危险性区划探索[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 19-23.
- [6] 许冲,戴福初,徐锡伟. 基于GIS平台与证据权的地震滑坡易发性评价[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(6): 1155-1164.
- [7] Neuhäuser B, Damm B, Terhorst B. GIS-based assessment of landslide susceptibility on the base of the Weights-of-Evidence model[J]. Landslides, 2012, 9(4): 511-528.
- [8] Regmi N R, Giardino J R, Vittek J D. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA[J]. Geomorphology, 2010, 115(1/2): 172-187.
- [9] Agterberg F P, Cheng Q M. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling[J]. Natural Resources Research, 2002, 11(4): 249-255.
- [10] 王志旺,李端有,王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1268-1273.
- [11] 张艳玲,南征兵,周平根. 利用证据权法实现滑坡易发性区划[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 121-125.
- [12] 吴树仁,石菊松,张春山,等. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [13] Lee S, Choi J. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18(8): 789-814.
- [14] Van Westen C J, Rengers N, Soeters R. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment[J]. Natural Hazards, 2003, 30(3): 399-419.
- [15] Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, et al. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping[J]. Environmental Geology, 2008, 54(2): 311-324.
- [16] Chung C F, Fabbri A G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping[J]. Photogram Eng Remote Sens, 1999, 65(12): 1389-1399.

Application of Weights of Evidence Method in Landslide Susceptibility Zoning ——A Case Study on Tongzi River Basin in Guizhou

Fan Qiang¹, Ju Nengpan¹, Xiang Xiqiong² and Huang Jian¹

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geo-hazard Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Weights of evidence method is applied in landslide susceptibility zoning of the study area. The main data sources used are logging data of disaster points of historical landslides, geological map, topographic map and digital elevation model. Firstly, the data sources are processed to generate seven evidence layers as lithology, distance from faults, elevation, slope, slope direction, distance from road, and distance from the river. Based on ArcGIS platform, overlay analyses are done between each evidence layer and landslide hazard point layer. The continuous data are classified by using the cumulative weight method and then the weights of the continuous data and classification data factor rating contributed to landslide hazard are calculated. Conditional independence test are done to each two evidence layers, four groups of evidence layers are chosen in a final susceptibility index calculation to get at last four pieces of susceptibility results maps. The calculation results are validated by curve method, which indicate that factor combination 1 is the best. The study area is divided into three types according to susceptibility index as of high, moderate and low susceptibility, and overlay analysis is done to the partition map and historical disaster points. The results show that the evaluation results and the hazard point distribution are consistent, indicating the feasibility of application of Weights of Evidence and landslide hazard susceptibility zoning.

Key words: Weights of Evidence; landslide; susceptibility zoning; Tongzi River Basin; Guizhou