

# 基于 GIS 的城市滑坡灾害易发性评价

——以湖北省宜昌市城区为例

孙小凡<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 党超<sup>1,2</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** [目的] 对城市滑坡灾害进行易发性分区评价, 为城市规划与防灾减灾工程提供理论依据。[方法] 以湖北省宜昌市城区为研究区, 通过 GIS 平台选取高程、坡度、地层岩性、归一化植被指数(NDVI)、与水系的距离和道路密度等 6 个评价因子, 采用似然比方法分析评价因子和滑坡发育的关系, 并以归一化似然比值将评价因子参数分类量化; 以量化值作为 Logistic 回归模型的自变量, 抽取样本数据建立滑坡易发性评价回归模型。[结果] 评价因子结果显著, 模型的整体准确率达到 79.2%, ROC 曲线下面积达 0.871; 极低易发区和低易发区占全区面积的 61.59%, 包含滑坡灾害的 11.29%; 高易发区和极高易发区虽仅占全区面积的 17.88%, 却发育了 68.55% 的滑坡灾害, 结果与滑坡灾害分布特征相符合。[结论] 对宜昌市城区的滑坡易发性进行了等级划分。采用 GIS 和 Logistic 回归相结合的滑坡易发性评价方法, 结果准确可靠。

**关键词:** 滑坡易发性评价; 地理信息系统; 似然比; Logistic 回归模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2018)06-0304-06

**中图分类号:** P642.22

**文献参数:** 孙小凡, 张鹏, 党超. 基于 GIS 的城市滑坡灾害易发性评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 304-309. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.045. Sun Xiaofan, Zhang Peng, Dang Chao. Landslide proneness evaluation based on GIS platform in urban area of Yichang City, Hubei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):304-309.

## Landslide Proneness Evaluation Based on GIS Platform in Urban Area of Yichang City, Hubei Province

SUN Xiaofan<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, DANG Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorge University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide a theoretical basis for urban planning and disaster prevention and mitigation engineering, the zoning evaluation on urban landslide proneness was conducted. [Methods] The evaluation was conducted at urban area of Yichang City, Hubei Province. Evaluation indicators, i. e. elevation, slope gradient, lithology, normalized difference vegetation index(NDVI), distance to watercourse and roading density, were identified by GIS platform; the relations between landslide proneness and evaluation indicators were analyzed based on likelihood ratio method, and the evaluation indicators could be quantified using the generalized likelihood ratio. As the independent variable in Logistic regression model, the regression model of landslide proneness evaluation was established based on sample datum. [Results] The significance of evaluation indicators was tested notable. The overall accuracy and the area under the ROC curve of evaluation model reached to 79.2% and 0.871 respectively. The extremely low proneness zone and the low proneness zone covered 61.59% of the total area, where landslide contributed 11.29% of the total landslides. Landslides in the high proneness zone and the extremely high proneness zone accounted for 68.55%, although it covered only 17.88% of the total area. The evaluation outcomes were coincided with the distribution of historical

收稿日期: 2018-06-06

修回日期: 2018-06-20

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“卡口地形段泥石流的堵溃效应研究”(41701013)

第一作者: 孙小凡(1993—), 男(汉族), 湖北省钟祥市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害形成机理与防治。Email: sunxiaofan2016@163.com。

通讯作者: 党超(1982—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害防治与成灾机理方面的研究。E-mail: dangchao1982@126.com。

landslides by and large. [Conclusion] The landslide proneness of urban area of Yichang City is classified. The result of landslide proneness evaluation based on GIS and Logistic regression model is accurate and reliable.

**Keywords: landslide proneness evaluation; GIS; likelihood ratio; Logistic regression model**

中国山地丘陵地貌分布广泛,其地质环境非常脆弱,滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害多发。特别是在三峡库区沿线,城市均分布于丘陵山地地貌区,地质灾害发育更加强烈,对城市建设及居民的生产生活产生了极大的威胁。近年来,对滑坡等地质灾害的研究已经从单个灾害体的现象描述、分类及治理发展到以定性和定量描述为基础的区域地质灾害定量预测、预报阶段<sup>[1-2]</sup>。以区域滑坡孕育为研究对象,进行易发性评价,是滑坡灾害风险评估和预测预防的基础,有助于潜在滑坡的及时发现和滑坡灾害防治防范资源的有效利用,减少损失。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)的发展,空间信息处理技术已被应用到滑坡灾害易发性评价中。空间信息处理软件和统计分析工具的结合,大大提高了数据的获取、处理与分析的效率,也促进了更多评价模型和方法的应用。区域滑坡灾害易发性评价模型可以分为定性、线性定量和非线性定量研究 3 大类<sup>[2]</sup>。定性研究,如层次分析法<sup>[3]</sup>,常具有较强的主观性和经验性<sup>[2-3]</sup>,评价结果常常因人而异,需要严格控制人为误差。线性定量研究,如统计量模型和 Logistic 回归模型等统计方法<sup>[4-5]</sup>,统计量模型来源于信息量模型,属于二元线性模型;而 Logistic 回归模型是一种多元线性回归模型,应用更为广泛,其原理简单、实现方便,可以同时处理离散型和连续型数据<sup>[6-7]</sup>。非线性定量研究,如信息量模型和人工神经网络模型等<sup>[8-13]</sup>,信息量模型在目前的地质灾害易发性和危险性评价中最为广泛<sup>[8-10]</sup>,其物理意义明确,操作简单<sup>[11]</sup>,但对因子的选择比较严格,因子选取及其标志状态划分的合理性影响着评价结果的可靠性<sup>[2]</sup>;人工神经网络是一种典型的非线性模型,目前应用最为广泛的是基于误差反向传播算法(BP 算法)的 BP 神经网络<sup>[12]</sup>,其具有高速的运行处理能力和自组织学习能力等优点<sup>[12-13]</sup>,但目前的应用还不够深入成熟,不能充分发挥其优势。Logistic 回归模型可将滑坡的发生与否用 1 和 0 表示,通过建立因变量和多个自变量的多元线性回归关系,预测某一区域滑坡的发生概率<sup>[14]</sup>。其不需要获得大量的滑坡体的物理力学参数<sup>[7]</sup>,通过统计分析方法,选取与滑坡发生有关的关键影响因子,即可建立滑坡的易发性评价模型,具有较高的准确性和客观性,近年来,在滑坡等地质灾害的预测预报中得到了广泛应用。为此,本研究将以宜昌市城区作为研究对

象,选取与滑坡发育密切相关的因子,通过似然比法分析因子与滑坡发育的相关性,并将因子参数分类量化,用分类量化值作为 Logistic 回归模型的自变量,建立回归模型,对滑坡的易发性进行分区评价,以期城市规划与防灾减灾工程提供理论依据。

## 1 研究区概况

宜昌市位于湖北省西南部,长江中上游分界处,城区面积 1 012.13 km<sup>2</sup>。区域属鄂西黄陵山地与江汉平原过渡地带,地势西高东低,形成自西向东由山地、丘陵向平原过渡的地貌形态;构造上处于黄陵背斜与江汉拗陷间的宜昌单斜凹陷的西缘,受到喜马拉雅山运动的影响,区内西部上升,东部下降,白垩系地层南东向倾伏,区域内无大断裂存在,地质构造相对稳定。鄂西地区降雨集中,多暴雨、大雨;河流水系发育,长江自西向东流经该区,流长达 14 km,长江支流众多,流量丰沛。城区内主要出露寒武系、奥陶系、白垩系和第四系地层,岩土体类型以碳酸盐岩、碎屑岩及全新统松散堆积层为主。近年来,随着城区开发建设,人类工程活动的日益增强,致使地质环境持续恶化,滑坡灾害发生的数量与规模均有所扩大。据 2016 年的调查统计,区内共发育有滑坡地质灾害 175 处,多分布在海拔为 100~200 m 地形较平缓的中部及中南部等人类活动较为剧烈的区域,滑坡的易发性与城市的发展建设关系密切。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究的基础数据源包括:比例尺为 1:5 万的数字化地形图、数字化地质图等矢量数据,和由地理空间数据云平台下载的 Landsat 8OLI 影像数据(编号为 LC81250392015104LGN00);滑坡数据来源于 2016 年的滑坡详细调查数据。在 ArcGIS 平台上,将全区划分成大小为 300 m×300 m 的共 11 804 个评价单元网格,其中 175 处滑坡被划分到 248 个单元中。数字化地形图包含有等高线、水系、道路等信息,利用等高距为 20 m 的地形等高线插值生成不规则三角网(TIN)地形模型,由 TIN 转换生成数字高程模型(DEM),由 DEM 可得到坡度因子图层。在 ENVI 平台上将 Landsat 8OLI 影像数据进行辐射定标和大气校正后,计算可得 NDVI(归一化植被指数)。

## 2.2 研究方法

根据滑坡的形成条件和诱发因素,选取与滑坡发育密切相关的影响因子,建立易发性评价指标体系。将评价因子区间划分为若干个连续分类子集,通过似然比法分析单个评价因子的不同分类子集对滑坡发生的影响程度,并将归一化的似然比值作为自变量,以滑坡的发生与否作为因变量,建立 Logistic 回归模型;通过对样本数据的训练和验证,得到可靠、合理的滑坡易发性回归模型,最后将模型应用于整个区域,完成易发性分级分区评价。

**2.2.1 因子选取** 滑坡的发生是许多因子共同作用的结果,从滑坡形成的地质环境出发,可分为背景因子和触发因子两大类。背景因子是指滑坡发生的基本地质环境条件,主要包括地形地貌、地层岩性、斜坡类型、地质构造、植被覆盖情况等;触发因子是指影响和诱发滑坡形成的外界因素,主要包括河流冲刷、降雨、地震、人类工程活动等。虽然滑坡的发生与这些因子间常具有非线性和不确定性等特点;但从统计学的角度考虑,滑坡的发生与否可以看作是基于各种因子综合影响下的概率事件,具有一定的重复性和随机性<sup>[1]</sup>,这是进行滑坡易发性评价的前提和基础。由于宜昌市城区内无大断裂的存在,地质构造较稳定,地震活动微弱,且区内降雨强度无较大差别,影响滑坡发育的主要是地形地貌、地层岩性、植被覆盖、河流冲刷和人类工程活动等因子。所以本研究选取高程、坡度、地层岩性和 NDVI(归一化植被指数)作为滑坡的形成背景因子;以道路密度表示人类工程活动强度,和与水系的距离共同作为滑坡发生的触发因子,以此 6 个因子建立滑坡易发性评价模型。

**2.2.2 似然比法** 滑坡因子与滑坡发育的关系主要体现为滑坡因子的不同分类子集对滑坡发育的不同影响程度。通过滑坡因子分析可以直观地描述因子的不同分类子集对滑坡发育的影响程度大小。目前应用较多的因子分析方法有确定性系数法(CF)<sup>[17-18]</sup>、信息量法<sup>[9-11]</sup>、似然比概率模型<sup>[19]</sup>和二元分析法<sup>[20]</sup>等。本研究采用似然比法<sup>[19,21]</sup>作为滑坡因子分析和量化的方法,分析滑坡因子与滑坡发育和形成的关系,并将因子参数分类量化。

结合野外经验和数据特征,以一定的步长,将连续型的评价因子数据划分为连续紧密的分类子集;对于地层岩性因子,以其本身的岩性类别作为分类子集。则评价因子  $X_i$  的分类子集  $Z_j$  在滑坡发生条件下的似然比  $L_{ij}$ :

$$L_{ij} = \frac{N_{ij}/N}{S_{ij}/S} \quad (1)$$

式中: $N_{ij}$ ——评价因子  $X_i$  的分类子集  $Z_j$  包含的滑坡单元数; $N$ ——整个研究区的所有滑坡单元总数; $S_{ij}$ ——评价因子  $X_i$  的分类子集  $Z_j$  包含的评价单元总数; $S$ ——整个研究区的所有评价单元总数。

似然比值的大小表示某个评价因子的不同分类子集间滑坡发生的相对可能性大小,似然比值越大,滑坡相对越易发生,可以直观地反映独立的单个滑坡因子与滑坡发育的关系。本研究对每个评价因子的似然比值做归一化处理(公式 2),将其转换到  $[0, 1]$  区间内,用以表示各评价因子各分类子集参数的量化值,作为 Logistic 回归模型的自变量。

$$L_{ij}' = \frac{L_{ij} - \min(L_i)}{\max(L_i) - \min(L_i)} \quad (2)$$

式中: $L_i$ ——评价因子  $X_i$  的所有分类子集的似然比集合。

**2.2.3 Logistic 回归模型** Logistic 回归模型是一种基于统计学的多元线性回归分析模型,其原理是在一个因变量和多个自变量之间建立多元回归关系,预测某一事件的发生概率<sup>[14]</sup>,概率取值为  $[0, 1]$ 。当模型的因变量为二项分布(0 和 1)时,即为二分类变量 Logistic 回归,用 0 表示滑坡不发生,1 表示滑坡发生,评价因子的参数值作为自变量,即可建立滑坡发生条件下的回归模型:

$$P(Y=1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}} \quad (3)$$

式中: $X_1, X_2, \dots, X_n$ ——自变量,即各滑坡因子的参数值; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ——逻辑回归系数,是在单个  $X$  发生变化时,事件发生与不发生概率之比的对数变化值<sup>[14]</sup>; $\beta_0$ ——常数项,表示没有自变量参与的情况下,事件发生与不发生概率之比的对数值<sup>[14-15]</sup>。本研究以评价因子分类子集参数的归一化似然比值作为 Logistic 回归模型的自变量,则  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  表示滑坡因子在评价模型中的权重大小。

## 3 结果与分析

### 3.1 评价因子量化结果

将评价因子区间划分为对滑坡发育的影响具有显著差别的若干分类子集(附图 7),根据公式(1)计算每个评价因子的分类子集似然比值,并利用公式(2)进行归一化处理,处理结果详见表 1。

**3.1.1 高程** 高程在一定程度上决定了某一区域的地貌形态、植被分布、松散物质堆积和人类工程活动强度等因素的差异,从而引起不同高程滑坡发育程度的显著差异。宜昌市城区的高程总体呈现西高东低的规律,西部最大高程达 1 200 m 以上,中南部长江

沿岸高程仅为 40~50 m。近半数以上的滑坡都分布在高程 100~200 m 的区域,如附图 7 所示,这一区域多为由地势较低的冲洪积扇或河流阶地向地势相对较高的低山丘陵的过渡地带,堆积层类滑坡异常发育,且由于河流冲刷强烈,极易引起土质类的滑坡。高程大于 400 m 的区域,岩体完整,残坡积层普遍较薄,植被覆盖良好,滑坡的分布密度较低。

3.1.2 坡度 坡度的大小对斜坡的应力分布和破坏的动力学过程等有重要的影响。从附图 7 可以看出,坡度 $<15^\circ$ 的区域滑坡数量较小;但在城区中南部,由于第四系膨胀土的广泛发育,滑坡发育密度明显增加。坡度 $15^\circ\sim 25^\circ$ 的区域,多为牵引式土质滑坡,分布密度最大;随着坡度的继续增大,坡度 $25^\circ\sim 40^\circ$ 的区域,滑坡发育则相对减少;坡度 $>40^\circ$ 的区域多为完整坚硬的岩体,基本上没有滑坡灾害的发生。

3.1.3 地层岩性 岩性条件是滑坡发育的物质基础,不同岩性条件下,滑坡的易发性差异显著。如附图 7,区内寒武系、奥陶系等以石灰岩、白云岩为主的化学岩系,近水平产出,垂向裂隙发育,属易崩地层,滑坡的易发性较低;而以粉~粗砂岩、泥岩为主的白垩系地层,由于岩体软弱,易风化,残坡积层厚度较大,为滑坡的孕育提供了物质基础;第四系地层中,特别是在城区中南部,由于富含膨胀土夹层,是滑坡分布密度最高的区域,虽然第四系地层仅占全区面积的 25%,却有 55%的滑坡分布于该区域。

3.1.4 归一化植被指数(NDVI) NDVI 是指遥感

影像中近红外波段(NIR)的反射值和红光波段(R)的反射值之差与两者之和的比值。NDVI 值的范围为 $[-1,1]$ ,负值表示地面为江、河、湖泊等水体或有雪覆盖,对可见光高反射;0 表示为岩石或裸土等,NIR 和 R 近似相等;正值表示有植被覆盖,数值越大表示植被覆盖越好<sup>[14]</sup>。通过统计,宜昌市城区的滑坡主要分布在 NDVI 为 0.2~0.3 的区域,如附图 7 所示,这些区域为人类工程活动强烈的区域向植被覆盖良好区域的过渡地带,植被覆盖较差,且斜坡常常受到人工开挖等破坏,易发生滑坡灾害;NDVI $<0.2$ 的区域主要是河流等水体或人口密集的中心城区,NDVI $>0.4$ 的区域植被覆盖良好,这些区域都不利于滑坡的发生。

3.1.5 与水系的距离 距河流水系越近,受河流的冲刷作用、软化作用和动水压力作用越强烈,斜坡岩土体的稳定性越差,越易发生滑坡灾害。通过统计计算,到水系的距离小于 300 m 的区域滑坡的密集最为集中(如附图 7 所示),距离大于 2 000 m 的区域受河流的影响较小,滑坡发育较少。

3.1.6 道路密度 以道路密度表示人类工程活动的强度大小。道路密度越大,人类工程活动强度越大,则斜坡受人类活动的影响越大,当有不稳定的斜坡存在时,极易发生滑坡。如附图 7 所示,在长江以北的中部区域,人口密集,道路密度相对较大,但缺乏滑坡孕育的基本条件,滑坡发生较少;在城区的南部区域,道路密度普遍较大,在有不稳定斜坡存在的区域,受道路建设过程中开挖土体的影响,有较多滑坡发育。

表 1 滑坡灾害评价因子分类及量化

评价因子	分类子集	似然比值	归一化	评价因子	分类子集	似然比值	归一化
高程/m	40~100	1.116 7	0.699 7	NDVI	-1~-0.3	0.101 7	0
	100~200	1.595 9	1		-0.3~0	1.337 0	0.715 1
	200~400	0.372 0	0.233 1		0~0.2	1.829 2	1
	400~700	0.151 2	0.094 8		0.2~0.4	1.183 0	0.625 9
	>700	0	0		>0.4	0.246 4	0.083 8
坡度/ $^\circ$	0~15	1.183 1	1	道路密度/m	0~0.01	0.919 4	0.030 8
	15~25	0.745 4	0.630 0		0.01~0.02	0.893 1	0
	25~40	0.367 3	0.310 4		0.02~0.03	1.141 7	0.295 3
	>40	0	0		>0.03	1.745 3	1
地层岩性	Z,O,E	0	0	与水系的距离/m	0~300	1.262 4	1
	Є	0.464 3	0.217 2		300~1 200	0.844 7	0.636 6
	K	0.803 1	0.375 8		1 200~1 800	1.105 7	0.863 7
	Q	2.137 3	1		1 800~2 500	0.112 9	0
					>250 0	1.003 8	0.775 0

### 3.2 回归模型与验证

将评价因子的分类子集参数用归一化似然比值量化后,以 248 个滑坡单元和随机提取的具有代表性

的 248 个非滑坡单元的数据作为 Logistic 回归模型的样本数据,建立 Logistic 回归模型,进行运算和验证。运算结果显示,以向前 LR 法(基于最大似然估

计的向前逐步回归法)作为模型的变量筛选方法时,模型效果最优,所有的因子都通过显著性检验(Sig. < 0.05),如表 2 所示。该方法下的回归模型预测结果:对已观测的 248 例滑坡单元,有 195 例预测正确,预测准确率为 78.6%;对已观测的 248 例无滑坡单元,有 198 例预测正确,预测准确率为 79.8%,综合准确率达到 79.2%。

表 2 滑坡易发性评价模型方程中的变量

变量	回归系数	Wald 统计量	sig. 显著性水平
高程	1.920	42.180	0.000
坡度	-1.360	10.910	0.001
地层岩性	1.361	40.343	0.000
NDVI	1.535	30.906	0.000
与水系距离	1.222	12.956	0.000
道路密度	1.119	10.247	0.001
常量	-7.697	235.722	0.000

设评价单元的高程、坡度、地层岩性、NDVI、与水系的距离和道路密度的归一化似然比值分别为  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  和  $X_6$ ,则可以写出滑坡发生条件下的回归模型:

$$P = \frac{e^{-7.697 + 1.920X_1 - 1.360X_2 + 1.361X_3 + 1.535X_4 + 1.222X_5 + 1.119X_6}}{1 + e^{-7.697 + 1.920X_1 - 1.360X_2 + 1.361X_3 + 1.535X_4 + 1.222X_5 + 1.119X_6}} \quad (4)$$

该模型计算的结果即为滑坡发生的概率预测值,利用预测值与观测值做 ROC 曲线,并以此为基础判断模型的优劣:当曲线下面积(AUC)越趋近 1,效果

越好,达到 1 时为完全理想的预测;值为 0.5 时为完全无效的预测;一般认为当值大于 0.8 时,模型可靠有效<sup>[23]</sup>。本模型的 AUC 为 0.871,说明模型具有较高的准确性,预测结果可靠。

### 3.3 易发性评价结果

将通过检验的回归模型公式(4)应用于整个区域,得到所有评价单元的滑坡易发性预测值,根据其大小将其分级,即可完成滑坡易发性分级分区。根据 Can 等<sup>[24]</sup>提出的分级原则,采用自然间断点分级法,将宜昌市城区划分为极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区 5 个滑坡易发性等级区域(附图 8)。

各分区的评价单元数和滑坡单元数统计结果如表 3 所示。滑坡高易发区和极高易发区主要集中在中南部,虽然这些区域地形较平坦、坡度较小,但分布有较多第四系膨胀土,导致许多不稳定斜坡的发生,在人类工程活动的影响下极易发生滑坡地质灾害;在北部长江沿岸和西部低山区也有零星的高易发区和极高易发区存在,这些区域地形较为陡峭、地层岩性复杂、河流切割强烈,导致许多临空面广泛发育,有利于滑坡的孕育;在人口密集、经济发达的中部区域基本没有高易发区和极高易发区存在,这些区域地形平坦,分布有密集的居民住房和商业建筑,人类工程活动强烈,很多山体边坡都得到支护治理,缺少滑坡灾害发育的条件;在山谷和长江支流沿线,受降雨和河流冲刷的影响,以及水的动力作用,有利于滑坡的发育。

表 3 研究区滑坡灾害易发性评价分区信息统计

滑坡易发性分区	分区单元数/个	分区单元占总单元百分比/%	滑坡单元数/个	滑坡单元占总滑坡单元百分比/%	滑坡单元占分区单元百分比/%
极低易发区	3 829	32.44	8	3.23	0.21
低易发区	3 441	29.15	20	8.06	0.58
中易发区	2 423	20.53	50	20.16	2.06
高易发区	1 627	13.78	97	39.11	5.96
极高易发区	484	4.10	73	29.44	15.08
总计	11 804	100	248	100	

## 4 结论与讨论

(1) 根据滑坡发育的基本形成条件和影响因素,选取与滑坡发育有密切关系的高程、坡度、地层岩性、NDVI 值、与水系的距离和道路密度等 6 个因子作为滑坡易发性评价的评价因子,建立评价指标体系,并通过 Logistic 回归模型进行显著性检验,结果表明评价因子的选取合理准确。

(2) 将评价因子区间划分为对滑坡发育的影响

具有显著差别的若干分类子集,计算其似然比值,以归一化的似然比值作为 Logistic 回归模型的自变量。选取样本数据,建立滑坡发生条件下的 Logistic 回归模型,最后将通过检验的回归模型应用于整个区域。回归模型的预测准确率达到 79.2%,ROC 曲线下面积(AUC)达到 0.871,说明模型的结果准确可靠。

(3) 通过滑坡易发性分析,极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区分别占研究区总面积的 32.44%,29.15%,20.53%,13.78%和

4.10%,滑坡面积分别占各分区面积的3.23%,8.06%,20.16%,39.11%和29.44%,滑坡面积与分区面积的比例随着易发性等级的增大而增大,在极高易发区达到15.08%,与历史滑坡灾害的发育情况相符。本文的滑坡易发性分区评价与历史滑坡的发育情况相吻合,合理准确地反映了研究区内滑坡的形成条件、发育规律,揭示了滑坡发育的关键影响因子,对当地的滑坡灾害防治防范具有一定的借鉴意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 殷坤龙,朱良峰. 滑坡灾害空间区划及GIS应用研究[J]. 地学前缘,2001,8(2):279-284.
- [2] 丛威青,潘懋,李铁锋,等. 基于GIS的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J]. 地学前缘,2006,13(1):185-190.
- [3] 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.
- [4] Lee S, Min K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea[J]. Environmental Geology, 2001,40(9):1095-1113.
- [5] 许湘华. 用Logistic回归模型编制滑坡灾害敏感性区划图的方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2010,7(5):87-91.
- [6] 曾忠平,汪华斌,张志,等. 地理信息系统/遥感技术支持下三峡库区青干河流域滑坡危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2777-2784.
- [7] 司康平,田原,汪大明,等. 滑坡灾害危险性评价的3种统计方法比较:以深圳市为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2008,45(4):19-26.
- [8] 阮沈勇,黄润秋. 基于GIS的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001,28(1):89-92.
- [9] 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]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):991-996.
- [10] 宁娜,马金珠,张鹏,等. 基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. 资源科学,2013,35(4):892-899.
- [11] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价:以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808.
- [12] Pradhan B J, Lee S. Utilization of optical remote sensing data and GIS tools for regional landslide hazard analysis using an artificial neural network model[J]. Earth Science Frontiers, 2007,14(6):143-152.
- [13] 赵向辉,付忠良,谢会云,等. 神经网络和集成学习在地质灾害危险度区划中的应用研究[J]. 工程科学与技术,2010,42(S1):50-55.
- [14] 孙正超. 基于GIS和Logistic回归模型的区域泥石流危险性评价[D]. 四川成都:西南石油大学,2016.
- [15] 王济川. Logistic回归模型[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [16] 刘斌. 基于WEBGIS的滑坡灾害空间预测与系统开发研究:以三峡坝区至巴东段为例[D]. 湖北武汉:中国地质大学,2009.
- [17] 王卫东,陈燕平,钟晟. 应用CF和Logistic回归模型编制滑坡危险性区划图[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(4):1127-1133.
- [18] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. 基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [19] 胡爱军,李宁,吴吉东,等. 基于经验似然比函数模型的降水型滑坡灾害概率风险分析与预测[J]. 灾害学,2009,24(3):1-6.
- [20] 王卫东,钟晟. 基于GIS的Logistic回归模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 工程勘察,2009(11):5-10.
- [21] Lee S. Application of likelihood ration and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS[J]. Environmental Management, 2005,34(2):223-232.
- [22] 李雪平. 基于GIS的区域斜坡稳定性评价Logistic回归模型研究[D]. 湖北武汉:中国地质大学,2005.
- [23] 李春林,刘森,胡远满,等. 基于增强回归树和Logistic回归的城市扩展驱动力分析[J]. 生态学报,2014,34(3):727-737.
- [24] Can T, Nefeslioglu H A, Gokceoglu C, et al. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses[J]. Geomorphology, 2005,72(1):250-271.