

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.023

基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价

吴常润,赵冬梅,刘澄静,角媛梅,刘志林,刘敬,冯志娟

(云南师范大学旅游与地理科学学院,云南 昆明 650500)

摘 要:云南省陇川县地质环境脆弱,易发生滑坡灾害,对其开展滑坡易发性评价对指导陇川县的滑坡地质灾害防治具有重大意义。根据陇川县地理环境、地质环境、人类活动等条件,选取高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、归一化植被指数、水系距离、断层距离、地层岩性和道路距离等 10 个评价因子,利用信息量模型和 ArcGIS 软件进行滑坡易发性评价。结果表明,滑坡高易发区主要位于研究区北部、东南部和西南部;中易发区主要位于中部、东部和西部部分地区;低易发区主要位于陇把镇、城子镇大部分地区 and 户撒阿昌族乡的西北部;不易发区主要位于清平乡中部、城子镇中部部分地区、以及章凤镇大部分地区。在中易发区和高易发区包含 83.56% 的滑坡灾害点,且滑坡面积随着易发性等级的增加也随之增大。滑坡中、高易发区内发生的滑坡面积分别占研究区滑坡面积的 22.79% 和 58.13%,分析结果与实际灾害分布特征相吻合,可为研究区及类似区域的滑坡地质灾害防灾减灾工作提供参考意见。

关键词:滑坡易发性评价;指标因子;信息量;GIS;陇川县

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)02-0308-13

Landslide Susceptibility Assessment of Longchuan County Based on GIS and Information Value Model

WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, LIU Zhilin,
LIU Jing, FENG Zhijuan

(School of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: The geological environment of Longchuan County, Yunnan Province, is fragile and vulnerable to landslides. Analyzing the susceptibility of regional landslide hazards is of great significance to prevent and control the landslides in this area. Ten evaluation factors are established. They are elevation, slope, slope direction, section curvature, plane curvature, normalized vegetation index, distance from water system, fault distance, lithology and road distance. Landslide susceptibility evaluation is assessed by using information value model and Geographic Information System (GIS). The results show that the high landslide susceptibility zones are mainly located

收稿日期:2019-09-10;修回日期:2019-11-24

基金项目:国家自然科学基金“哈尼梯田遗产区聚落景观快速变化机制与景区化过程及保护”(41761115)“哈尼梯田景观结构-水文连接度与世界遗产保护研究”(41271203),云南师范大学研究生科研创新项目“基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价”(ysdyjs2019146),云南师范大学研究生科研创新重点项目“基于聚落连接度与土壤理化性质的哈尼梯田弃耕风险识别及其生态恢复研究”(ysdyjs2019166)

作者简介:吴常润(1995-),女,在读研究生,主要从事区域灾害研究。E-mail:3255006965@qq.com

in the north, southeast and southwest of the study area; the moderate landslide susceptibility zones are mainly in the central, eastern and western parts of the study area; the low landslide susceptibility zones are mainly in Longba Township, most of Chengzizhen and northwest of Hu Sa Achang; the extremely low landslide susceptibility zones are mainly located in the central and urban areas of Qingping, part of the central part of Chenzi and most of Zhangfeng. 83.56% of the landslide hazards are in the middle and high susceptible zones, and the area of landslide increases with the increase of the susceptibility grade. The area of the middle and the high landslides susceptible zones accounts for 22.79% and 58.13% respectively of the total study area. The results are consistent with the actual distribution of landslide hazards, which can provide theoretical reference for disaster prevention and mitigation in the study area.

Keywords: landslide susceptibility evaluation; index factor; weighted information value; geographic information system (GIS); Longchuan county

0 引言

滑坡灾害是自然灾害中最重要灾害类型之一,具有分布广、发生频率高、运动速度快、致灾严重等特点(殷坤龙等,2001)。从滑坡的成灾条件来看,地质条件复杂,生态环境脆弱的地区易发生滑坡灾害(沈志红,2010)。根据中国地质调查局发展研究中心发布的2018年全国地质灾害通报数据,全国共发生地质灾害2 966起,其中滑坡1 631起,占地质灾害总数的55.0%。其中,地质条件复杂且生态环境脆弱的西南地区是滑坡高发区,占全国地质灾害数量的35.2%(中国地质调查局环境监测院等,2018)。为了预防和减少滑坡的发生及其影响,滑坡灾害易发性分析成为学术界关注的重要研究内容之一(范林峰等,2012)。

有关滑坡易发性评估的方法,早期主要使用理论推导法、地理相关分析法、主导因素法等地理学上的评价方法对滑坡灾害进行定性分析,但这些方法的预测精度低(吴少元等,2019)。随着地理信息系统技术[Geographic Information System(GIS)]在地质灾害评价中应用越来越成熟,评价模型和数学方法与GIS的结合逐渐取代了传统的定性分析,定量与定性的结合研究成为主要的趋势(王志旺等,2012)。应用比较广泛的包括统计预测模型(逻辑回归、决策树、确定性系数法等)(AYALEW L et al., 2005;杜谦等,2017)、以及基于GIS的信息量模型(杜军等,2010;阮沈勇等,2001;陈立华等,2016)和模式识别模型(BP神经网络、支持向量机等)(ADI-

TIAN A et al.,2018;HUANG Y et al.,2018)等。其中,基于GIS技术的信息量模型由于其具有物理意义明确、易于实现、能将主观和客观结合的优点,是滑坡灾害易发性评价中的主流模型之一。如北川曲山-擂鼓片区(杨根云等,2018)、三峡库区万州区(张俊等,2016;王佳佳等,2014)、重庆涪陵区(谭玉敏等,2015)、广西花岗岩分布区(许英姿等,2016)、云南省福贡县(谈树成等,2018)等都得到了很好的效果。以上研究充分说明这个方法的有效性。

云南省陇川县地形地貌复杂,地貌类型以构造剥蚀地貌和侵蚀堆积地貌为主,岩石风化强烈,同时位于龙陵-瑞丽大断裂西侧,次级断裂较发育,位于中国地质灾害尤其是滑坡灾害多发区,是云南省受灾害威胁较大的56个县之一(管新邦,2018;陇川县国土资源局等,2016;云南省自然资源厅,2018)。因此,对其滑坡灾害进行易发性评价可为当地防灾减灾提供决策参考。因此,笔者以得到广泛应用的基于GIS的信息量模型对陇川县滑坡灾害易发性进行评价,通过实地调查、资料收集,并阅读大量文献的基础上,选取高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、植被指数、水系、断层距离、地层岩性、道路距离10个评价指标,应用该模型进行陇川县滑坡易发性评价,并进行易发性分区。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

陇川县位于中国西南边陲,滇西横断山地。行政区划上属德宏傣族景颇族自治州,地理范围在

24°08′~24°39′N, 97°39′~98°17′E, 面积约为 1 913 km²(图 1)。境内地形多属中山和高山区,以中山为主,呈西南走向,东北高峻,西南低平,地貌特征为“三山两坝-河谷”;研究区海拔为 712~2 627 m,地形高差大,绝大部分山体坡度在 30°~35°,山坡坡度及河、沟谷比降都较大;河网密度较大,境内有户撒河流域、南宛河流域、萝卜坝河流域和龙江 4 个流域;气候属南亚热带季风气候,干湿季、立体气候明显,年平均气温 18.9℃,降水比较充沛,多年平均降雨量为 1 582.2 mm,气候较湿润,水量充足;区内岩石组成复杂,共划分出砂岩砾岩粘土岩、加里东期混合花岗岩、第四系松散土类、华力西期辉长岩、第四系安山岩、寒武系微晶片岩和片麻岩等 6 类岩石。区内新构造活动强烈,断裂、褶皱较发育,存在多组活跃性强的断裂构造,如王子树-南京里倒转背斜、瓦德龙断裂、殿厂-平山断裂、龙陵-瑞丽大断裂带,历史上曾发生过特大滑坡泥石流灾害。

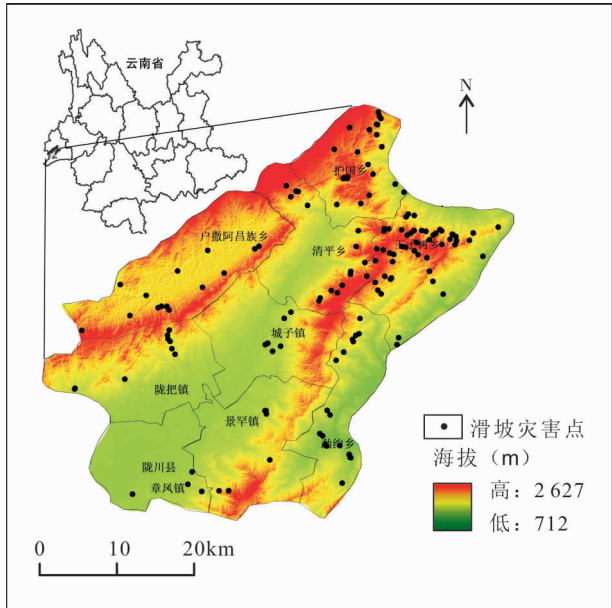


图 1 研究区范围及滑坡灾害点分布

Fig. 1 Study area and distribution of landslide disaster points

1.2 数据来源

在滑坡点来源上,滑坡灾害点数据共 150 个,来源于德宏州陇川县国土资源局“云南省地质灾害详细调查项目——陇川县地质灾害详细调查报告(2016 年)”所提供数据,并在 2019 年 2 月经过一周实地考察和访谈复核 146 个。在滑坡灾害点详细调

查中,通过 GPS 工具精确定位各滑坡点的经纬度、海拔高度。

在相关因子数据上,地理环境因子和人类活动因子(道路)数据来源于国家地理空间数据云提供的遥感影像和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的分析解译;地质因子(地层岩性和断层)数据来源于云南省陇川县国土资源局提供的 1:5 万地质灾害详细调查区域工程地质条件图数字化。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 GIS 的制图综合

在研究方法上,选用信息量模型和 GIS 结合展开对研究区滑坡易发性评价研究。同时,利用软件制图、文献和已有数据等进行综合分析和判断,制图采用 ArcGIS、Excel 软件。选取地理环境因子、地质环境因子、人类活动等 10 个因子叠加滑坡灾害点进行制图。其中,从 DEM 数据中提取了 6 个地形因子,分别为高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率和水系,距水系距离先后利用水文分析模块及欧式距离进行处理得到;归一化植被指数则通过下载遥感影像后进行波段运算得到。地质因子中地层岩性和断层因子则由云南省陇川县国土资源局提供的 1:5 万地质灾害详细调查区域工程地质条件图数字化得出,并通过欧氏距离从中提取断层距离;道路数据从国家地理空间数据云提供的遥感影像分析解译得到,而后在 GIS 软件平台进行配准栅格化而成,并通过欧氏距离从中提取道路距离。所有栅格图层统一到 WGS_1984_UTM_Zone_48 N 坐标,并对各个因子进行重分类,通过 ArcGIS 的重采样和掩膜提取功能将每个因子图层大小不同的栅格转化为相同大小的单元格。同时,统计各重分类因子在不同等级中的信息量值,并通过赋值完成各因子的信息量图。最后,利用栅格计算器对 10 个因子的信息量图进行相加完成易发性区划图。

1.3.2 信息量模型

信息量模型是利用信息量的大小来综合研究各种影响滑坡灾害发生因素作用下滑坡灾害易发性的模型,是预测区域地质灾害评价的一种有效方法,用信息量来衡量滑坡灾害的发生强度。一般来说,信息量越大,滑坡灾害发生的可能性越大(阮沈勇等, 2001;张以晨等, 2018),其公式如下。

$$I(y, x_1x_2...x_n) = LnP(y | x_1x_2...x_n) / p(y)$$

(1)

式中: $I(x_1x_2...x_n)$ ——影响因素 $x_1x_2...x_n$ 对滑坡灾害提供的信息量;

$p(y | x_1x_2...x_n)$ ——因素 $x_1x_2...x_n$ 综合条件下滑坡灾害发生的概率;

$p(y)$ ——滑坡灾害发生的概率。

滑坡灾害空间预测以研究区栅格单元划分为基础,先采用单因素信息量模型计算,再进行叠加,其信息量模型可改写为(陈立华等,2016)。

$$I_i = \ln(N_i/N) / (S_i/S)$$

(2)

式中: I_i ——滑坡影响因素 x_i 对滑坡提供的信息量;

S ——研究区栅格单元总数;

N ——研究区内已经发生滑坡的栅格单元总数;

S_i ——研究区内含有评价因素 X_i 单元数;

N_i ——分布在因素 X_i 特定类别中发生滑坡的栅格单元数。

则预测研究区栅格单元总的信息量预测值为:

$$I = \sum n_i = \ln(N_i/N) / (S_i/S)$$

(3)

式中: I ——评价单元总的信息量值;

I_i ——评价因素 X_i 的信息量值;

n ——所选取的评价因子的总数。

将信息量总值 I 作为判断该单元在影响滑坡灾害时的综合作用指标: $I > 0$ 时,该单元处有利于滑坡灾害的形成,且 I 值越大,易发性程度越高; $I < 0$ 时,该单元处不利于滑坡灾害的形成,且 I 值越

小,易发性程度越低(阮沈勇等,2001;张以晨等,2018)。

2 基于 GIS 的滑坡易发性评价

2.1 评价单元与指标因子的选取

评价单元的划分很重要,会直接影响评价结果的合理性(孟庆华等,2011)。陇川县总面积为 1 913 km²,滑坡灾害点在地图上呈现点状分布。根据数据源比例尺和精度,选用规则的栅格单元作为滑坡易发性评价的评价单元(殷坤龙等,2001)。笔者所用数字高程图分辨率为 30 m,故将单元格划分为 30 m 的大小(许英姿等,2016)。并通过 ArcGIS 的重采样和掩膜提取功能将每个因子图层大小不同的栅格转化为相同大小的单元格。

滑坡灾害的发生受其所处地理环境的影响。因此,笔者在充分考虑资料的可获性、研究区范围大小、研究精度等因素的前提下,从滑坡发生的背景出发,从地理环境因子、地质环境因子、人类活动因子 3 个方面选取高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、归一化植被指数、距河流距离为地理环境因子;选取距断裂构造距离、地层岩性为地质环境因子;选取距道路距离为人类活动因子。利用 ArcGIS 中的波段集统计工具对上述 10 种指标进行相关性检验(表 1),结果显示因子间均只有弱相关性甚至不相关,笔者指标因子选取合理。

表 1 因子相关性矩阵表
Tab. 1 Factor correlation matrix

因子	高程	坡度	坡向	剖面曲率	平面曲率	NDVI	距水系距离	距断层距离	地层岩性	人类活动
高程	1.000 0									
坡度	0.122 1	1.000 0								
坡向	0.016 1	0.000 2	1.000 0							
剖面曲率	0.100 3	0.305 2	-0.011	1.000						
平面曲率	0.000 6	0.031 0	-0.008	0.001	1.000 0					
NDVI	-0.054	-0.142	0.080 6	-0.10	-0.019 4	1.000 00				
距水系距离	0.046 5	0.037 1	-0.016	0.019	-0.001 0	-0.022 0	1.000 00			
距断层距离	-0.007	0.072 2	0.056 8	0.033	0.005 7	0.056 70	-0.005 4	1.000 00		
地层岩性	0.130 6	0.416 6	0.031 6	0.243	0.029 8	-0.155 0	0.035 18	0.315 65	1.000 00	
人类活动	-0.105	-0.136	0.035 6	-0.09	-0.006 0	0.171 98	-0.028 4	0.111 20	-0.098 5	1.000 00

2.2 指标因子的分级

利用 GIS 的空间分析功能将笔者所选 10 个因子和滑坡灾害点进行叠加分析,并进行信息量的计算。离散型指标因子的划分依据野外调查以及已有的分类标准,如笔者选取的评价指标:地层岩性(张以晨等,2018)。连续型指标因子的划分是在各因素分级状态下滑坡比例曲线的前提下进行等距离划分,做出各指标因子的状态分级图,并统计各个区域内的滑坡比例和分级比例。

2.2.1 地理环境因子

(1)海拔。滑坡灾害的发生受海拔高度的影响,不同海拔范围内下垫面条件差异及人类活动强度不同,这些都影响着滑坡灾害的发生。研究区最高海拔 2 627 m,最低海拔 712 m,高差 1 900 余米,从 712 m 起,以 200 m 为间隔,利用 ArcGIS 中的自然间断点分级法进行分级,统计滑坡比例、分级比例、

信息量值。可以看出,滑坡主要分布在 1 300 ~ 1 900 m内(图 2A、图 3A)。

(2)坡度。坡度影响着斜坡的稳定性,滑坡发生在一定范围内。以 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析工具生成。从 0°起,以 5°为间隔,使用自然间断点分级法进行分级,统计滑坡比例、分级比例、信息量值,可以看出,滑坡主要分布在 10°~20°内(图 2B、图 3B)。

(3)坡向。不同坡向由于阳坡阴坡的差异,造成水分热量不同,进而影响到了土壤植被岩石等发育情况,最终影响滑坡灾害的发生。以 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析工具生成,分为 10 个类别,统计各分级状态下的滑坡比例、分级比例、信息量值。可以看出,滑坡主要分布在东、北、西北坡向方向(图 2C、图 3C)。

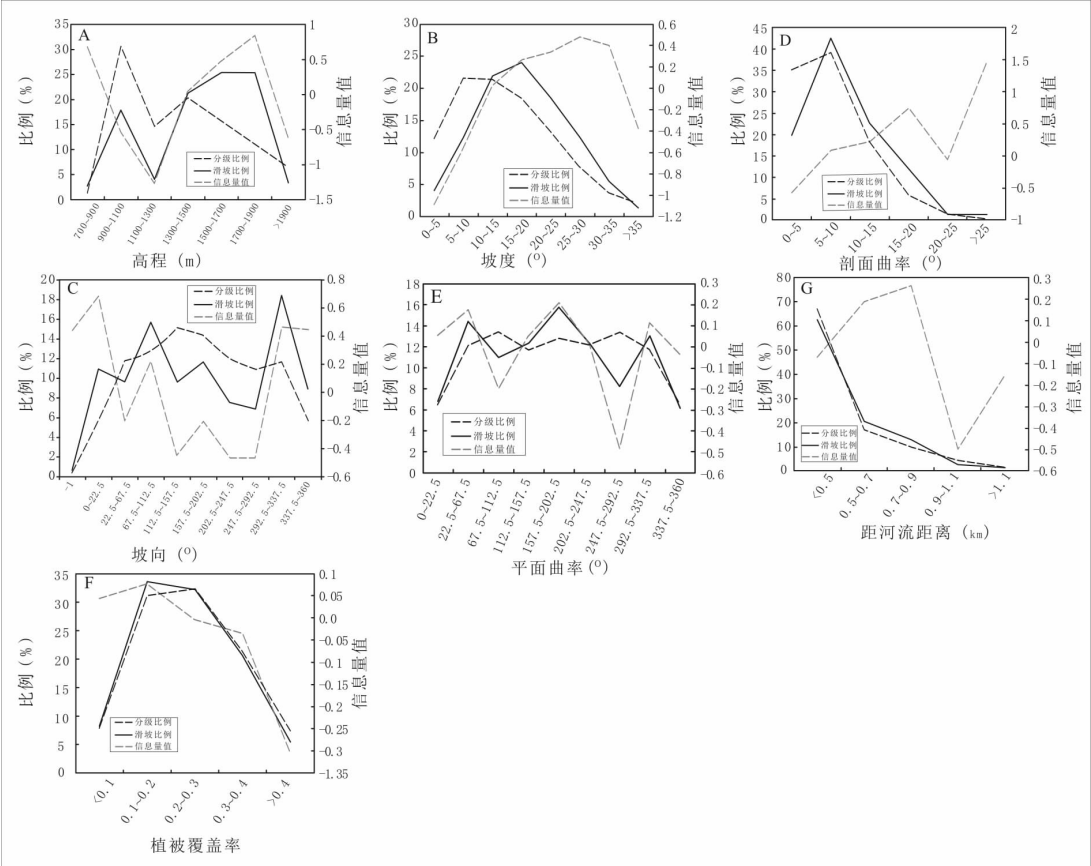


图 2 地理环境因子各区间滑坡比例、分级比例、信息量分布曲线图

Fig. 2 Landslide proportion, grading proportion and information distribution curve of geographical environment factors in each interval

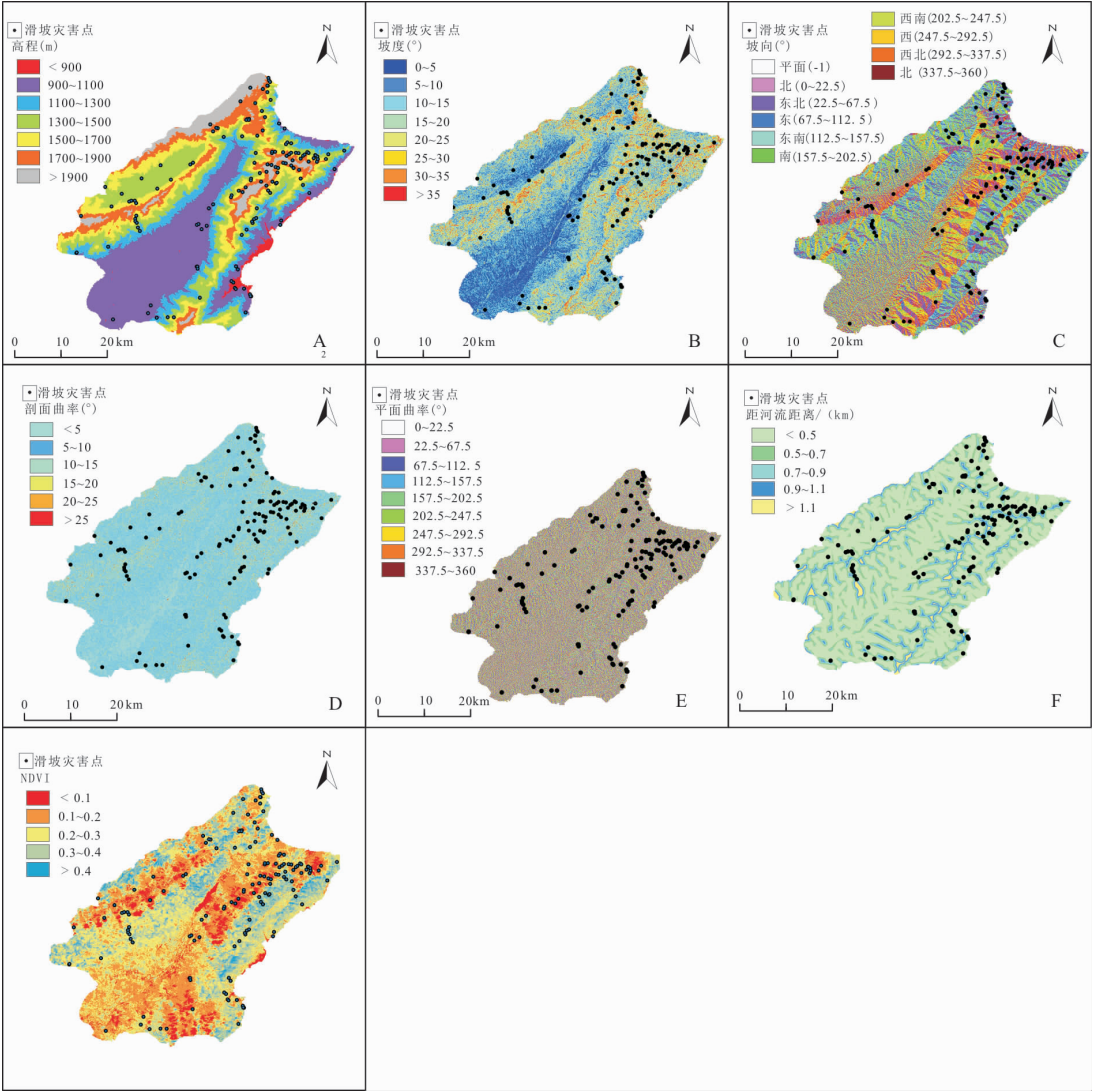


图 3 地理环境因子状态分级图

Fig. 3 Classification diagram of geographical environment factors

(4)剖面曲率。剖面曲率描述地形的复杂度(郭子正等,2019),以 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析工具生成。从 0° 起,以 5° 为间隔,使用自然间断点分级法进行分级,统计滑坡比例、分级比例、信息量值。可以看出,滑坡主要分布在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 内(图 2D、图 3D)。

(5)平面曲率。平面曲率指地形在水平方向的特征,在数值上等于某栅格处坡向在坡度上的变化(郭子正等,2019)。以 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析工具生成栅格。平面曲率分为 9 个类别,统计各分级状态下的滑坡比例、分级比例、信息量值。可以看出,滑坡主要分在南、东北、西北坡向方向(图 2E、图 3E)。

(6)归一化植被指数。归一化植被指数是植物生长的状态以及植被空间分布密度的最佳指标因子,通常用来估算植被覆盖度,植被覆盖程度也影响着滑坡灾害的发生(谈树成等,2018;李苗苗等,2013)。笔者将 NDVI 分为 5 个类别,以 0.1 为间隔,使用自然间断点分级法进行分级,统计滑坡比例、分级比例、信息量值。可以看出,滑坡主要分布在小于 0.3 范围内(图 2F、图 3F)。

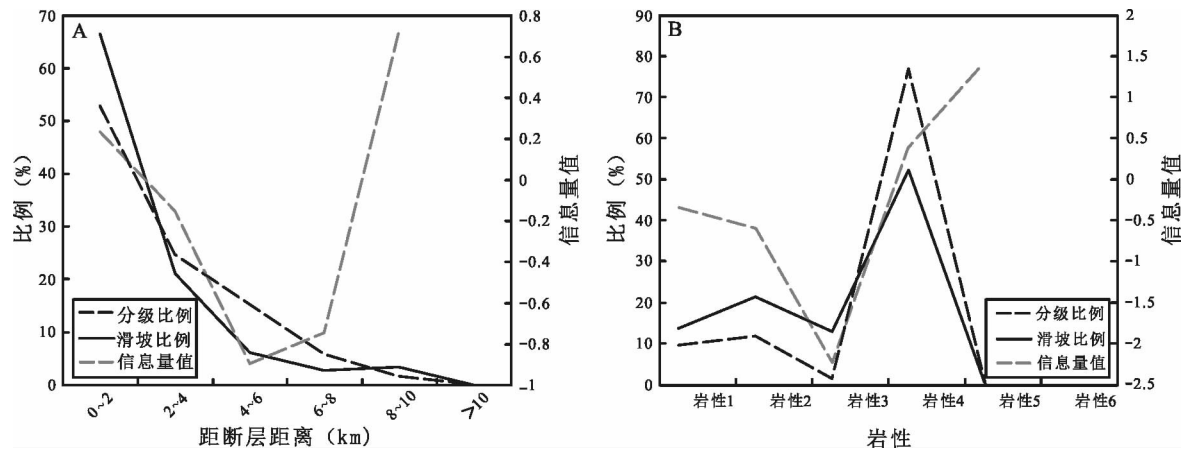
(7)距水系距离。距河流的远近,影响着斜坡的稳定性,从而影响滑坡灾害的发生。研究区水系较发达,分属伊落瓦底江水系,以河流作为缓冲中心,200 m 为间隔,做缓冲分析。统计结果表明,滑坡主要分布在距离河流 900 m 范围内(图 2G、图 3G)。

2.2.2 地质环境因子

(1)距断裂距离。距断裂距离的远近影响着滑坡灾害的发生,根据文献可知,距离断裂带越近,发生的滑坡灾害越多(杜悦悦等,2016)。研究区的大地构造位于青、藏、滇、缅、印尼“歹”字型构造西支中段、三江经向构造带中南段,以及南岭纬向构造带西延部分的复合部位。高黎贡山西坡向南延伸地带,龙陵-瑞丽大断裂西侧,区内地质构造较复杂,断裂、褶皱较发育,如曼岗断裂、殿厂-平山断裂、瓦德隆断裂、泸水-龙陵-瑞丽大断裂等(陇川县国土资源局

等,2016)。以研究区地质构造纲要图(1:5万)为基础,以主要断裂带为中心、2 km 为间隔做缓冲分析,统计结果表明,大部分滑坡分布在 0~2 km 内(图 4A、图 5A)。

(2)地层岩性。地层岩性是影响滑坡发育的重要内因,不同岩性的物理力学参数存在较大差异,会直接影响边坡稳定性(郭子正等,2019)。研究区内岩性比较单一,仅出露新生界第四系、新近系和下古生界寒武系等。根据地质资料,研究区岩性大致分为 6 类(图 5B)。以研究区 1:5 万地质图为依据,绘



岩性 1. 新近系砂岩、砂砾岩、砾岩、黏土;岩性 2. 加里东期混合花岗岩;岩性 3. 第四系残坡积、洪积、冲积砂砾质黏土;岩性 4. 寒武系微晶片岩、片麻岩、变质砂岩、板岩、变粒岩;岩性 5. 华力西期辉长岩;岩性 6. 第四系安山岩

图 4 地质环境因子各区间滑坡比例、分级比例、信息量分布曲线图

Fig. 4 Landslide proportion, grading proportion and information distribution curve in each interval of geological environment factors

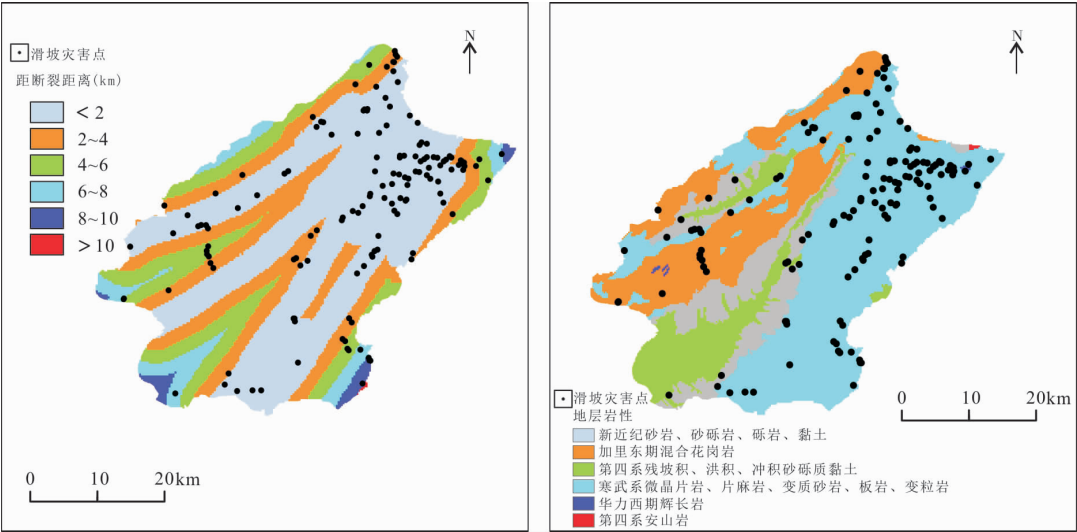


图 5 地质环境因子状态分级图

Fig. 5 Classification map of geological environment factors

制研究区地层岩性分级图,统计结果表明,滑坡主要分布在寒武系微晶片岩、片麻岩、变质砂岩、板岩和变粒岩,具体分级见图 4B、图 5B。

2.2.3 人类活动因子

人类活动也是影响滑坡灾害的一个因素,其中

交通是重要影响因素。笔者基于 ArcGIS 空间分析模块,选取研究区道路做缓冲区分析,以 200 m 为间隔,统计结果表明,大部分滑坡分布在距离道路 500 m 范围内(图 6、图 7)。

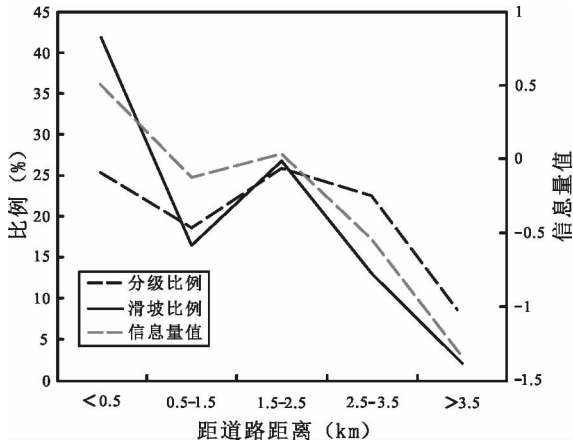


图 6 人类活动因子各区间滑坡比例、分级比例、信息量分布曲线图

Fig. 6 Landslide proportion, grading proportion and information distribution curve in each section of human activity factors

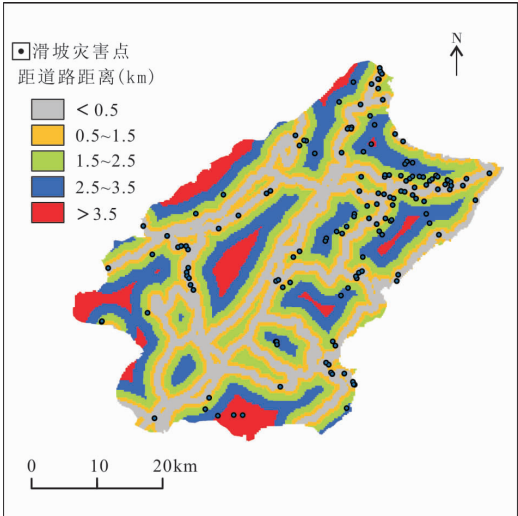


图 7 人类活动因子状态分级图

Fig. 7 Human activity factor status grading diagram

3 结果分析与精度评价

3.1 基于 GIS 的信息量计算和滑坡易发性分区

根据信息量模型方法,采用栅格计算器,计算得到各个评价指标图层在不同因子等级下的信息量值(表 2),然后利用 ArcGIS 叠加分析工具得到陇川县

滑坡总信息量。叠加结果显示总的信息量值为-7.449 32~4.419 06,信息量值越大,表明该区域发生滑坡的可能性越大,易发性也较高。因此,利用 ArcGIS 进行总信息量值的重分类,运用自然间断点法将总信息量值分为不易发、低易发、中易发、高易发 4 个易发性等级,各个易发性等级的信息量值范围见表 3,最终得到陇川县滑坡易发性分区图(图 8)。

表 2 各因子信息量指计算结果表
Tab. 2 the calculated results of Information of each factor

因子	类别	信息量值
高程(m)	700~900	0.673 473 54
	900~1 100	-0.539 925 954
	1 100~1 300	-1.270 052 902
	1 300~1 500	0.045 076 226
	1 500~1 700	0.476 242 096
	1 700~1 900	0.836 750 509
	>1 900	-0.624 977 133
坡度(°)	0~5	-1.085 875 029
	5~10	-0.559 791 708
	10~15	0.025 719 043

续表 2		
因子	类别	信息量值
坡度(°)	15~20	0.263 969 292
	20~25	0.338 649 545
	25~30	0.479 581 067
	30~35	0.400 142 567
	>35	-0.373 822 518
坡向	平面(-1)	0
	北(0~22.5)	0.678 992 078
	东北(22.5~67.5)	-0.205 298 553
	东(67.5~112.5)	0.219 682 405
	东南(112.5~157.5)	-0.453 385 527
坡向	南(157.5~202.5)	-0.207 559 757
	西南(202.5~247.5)	-0.462 634 164
	西(247.5~292.5.5)	-0.461 302 442
	西北(292.5~337.5)	0.462 929 196
	北(337.5~360)	0.447 548 962
剖面曲率(°)	0~5	-0.569 556 226
	5~10	0.082 860 192
	10~15	0.219 101 666
	15~20	0.741 702 806
	20~25	-0.057 941 229
	>25	1.440 557 471
平面曲率	0-22.5	0.055 199 479
	22.5-67.5	0.173 793 71
	67.5-112.5	-0.200 265 259
	112.5-157.5	0.054 559 067
	157.5-202.5	0.208 113 327
	202.5-247.5	0.014 425 722
	247.5-292.5.5	-0.486 102 108
	292.5-337.5	0.110 433 524
	337.5-360	-0.038 085 095
NDVI	0.1	0.044 024 274
	0.2	0.075 937 143
	0.3	-0.003 641 554
	0.4	-0.035 481 512
	>0.4	-0.304 259 16
距河流距离	<0.5	-0.069 649 219
	0.5~0.7	0.186 981 736
	0.7~0.9	0.260 486 997
	0.9~1.1	-0.496 366 184
	>1.1	-0.156 322 849
距断裂距离(km)	<2	0.230 535 727
	2~4	-0.151 326 27
	4~6	-0.892 991 208
	6~8	-0.744 999 514

续表 2

因子	类别	信息量值
距断裂距离(km)	8~10	0.716 866 472
	>10	0
地层岩性	1	-0.354 927 178
	2	-0.601 866 699
	3	-2.233 635 45
	4	0.387 594 833
	5	1.422 908 623
	6	0
人类活动(m)	<0.5	0.503 352 384
	0.5~1.5	-0.124 000 974
	1.5~2.5	0.034 142 546
	2.5~3.5	-0.546 880 419
	>3.5	-1.338 232 498

表 3 陇川县滑坡易发性等级信息量值范围表

Tab. 3 Range of grade information of landslide susceptibility in longchuan county

易发性等级	最值	不易发	低易发	中易发	高易发
信息量范围	最小值	-7.449 32	-3.216 613	-1.263 641	0.389 024
	最大值	-3.216 613	-1.263 641	0.389 024	4.419 063

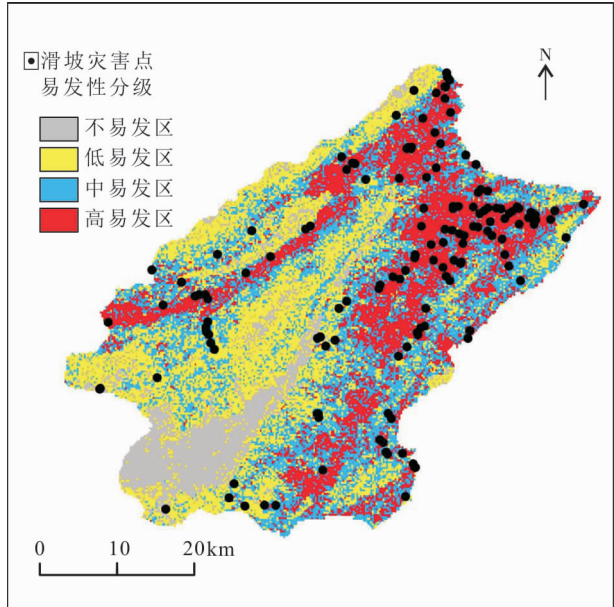


图 8 陇川县滑坡易发性区划图

Fig. 8 Landslide prone zoning map of Longchuan County

3.2 易发性评价结果分析与精度评价

滑坡易发性评价分区结果表明,陇川县滑坡高易发区主要分布在研究区北部、东南部和西南部,包

括王子树乡、护国乡大部分地区、清平乡东北部、城子镇东部、景罕镇中部地区、户撒阿昌族乡的东南部及陇把镇、陇川县和章凤镇的小部分地区。中易发区主要分布在研究区中部、东部和西部部分地区,包括景罕镇、勐约乡、城子镇东北部。低易发区主要分布在陇把镇、城子镇大部分地区和户撒阿昌族乡的西北部。不易发区主要分布在清平乡中部、城子镇中部部分地区、以及章凤镇大部分地区。

将最终得到的陇川县滑坡易发性分区图 and 实际发生的滑坡灾害进行叠加,统计各易发性分区内实际发生的滑坡面积、滑坡点数量和滑坡灾害点密度(表 4)。由统计结果可知,有 83.56%的滑坡灾害点分布在高易发区和中易发区,不易发和低易发区滑坡灾害点比例只有 16.44%。而且随着易发程度的提高,滑坡灾害点的密度逐渐增大,中易发区和高易发区的滑坡灾害点密度达到最大,不易发区密度大的原因在于其滑坡面积小。由此可见,滑坡灾害易发性评价结果与滑坡灾害的分布较为吻合,评价结果比较好。

表 4 易发性评价结果与实际滑坡分布对比表

Tab. 4 Comparison of vulnerability assessment results with actual landslide distribution

易发性等级	滑坡面积 (m ²)	占滑坡总 面积百分比 (%)	滑坡灾害 点个数(个)	占滑坡点 总数百分比 (%)	滑坡灾害 点密度 (个·100km ⁻²)
不易发	6 820	1.24	2	1.37	2.9
低易发	97 810	17.84	22	15.07	2.3
中易发	124 940	22.79	36	24.66	3.0
高易发	318 714	58.13	86	58.90	2.7

注:滑坡面积数据来源于云南省陇川县国土资源局,2016。

4 结论

(1)将 GIS 与信息量模型相结合解决了单利用 GIS 分析时其数据统计分析方面的缺点,同时解决了信息量法在数据采集与处理方面的缺陷,二者相结合,解决了单个模型的缺点,使评价结果客观合理。

(2)以陇川县为研究对象,基于滑坡影响因素和数据可获取性,选择高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、NDVI、距河流距离、距断裂距离、地层岩性和距道路距离等 10 个因子建立基于 GIS 的滑坡易发性评价指标体系,并基于 GIS 和信息量模型展开滑坡易发性评价,精度验证结果表明,易发性分区图与陇川县滑坡灾害实际发生情况一致,研究结果可以为陇川县滑坡灾害防治与预测提供参考意见。

(3)虽然笔者通过结合 GIS 和信息量模型对研究区滑坡灾害易发性展开了研究,但仍存在一定的不足。在因子分级方面多采用等级划分法,一方面虽然保证了评价结果的公正合理性,但单从单个因子来看,仍有一定的不确定性,由于滑坡灾害成灾过程较复杂,是在多因子共同作用下发生的,单个因子的不确定性经常被忽略。而因子之间具有相关性,因此,在今后的易发性评价过程中,有必要对滑坡易发性的分级标准进行改善,提高滑坡易发性评价的准确性。

参考文献(References):

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,(02):279-284.

YIN Kunlong, ZHU Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of GIS [J]. Earth Science Frontiers, 2001, (02):279-284.

中国地质调查局环境监测院,地质灾害监测预警室. 2018 年全国地质灾害通报 [EB/OL]. http://www.cigem.cgs.gov.cn/gzdt_4839/dwdt_4861/201904/t20190417_479382.html, 2019-04-17.

沈志红. 泥石流堆积区对公路工程的影响[D]. 西安:长安大学,2010.

SHEN Zhihong. Debris flow deposition area on the impact of road works[D]. Xi'an:Chang An University,2010.

管新邦. 云南省滑坡地质灾害危险性评价研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.

GUAN Xinbang. Study on Risk Assessment of Landslide in Yunnan Province [D]. Beijing: China University of Mining& Technology(Beijing),2018.

陇川县国土资源局. 陇川县国土资源志(1998-2015)[M]. 陇川:陇川县国土资源局编纂,2016.

Department of Land and Resources in Longchuan County. Land and Resources Records in LongChuan County (1998-2015)[M]. Longchuan:Department of Land and Resources in LongChuan County, 2016.

范林峰,胡瑞林,曾逢春,等. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用——以湖北省恩施市为例[J]. 工程地质学报,2012,20(04):508-513.

FAN Linfeng, HU Ruilin, ZENG Fengchun, et al. Application of weighted information value model to landslide susceptibility assessment _ a case study of Enshi City, Hubei province[J]. Journal of Engineering Geology, 2012,20(04):508-513.

吴少元. 基于信息量模型的厦门市崩塌和滑坡地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程,2019,26(03):22-27.

WU Shaoyuan. Susceptibility Evaluation of Geological Hazards of Collapse and Landslides in Xiamen City Based on

- Information Model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019,26(03):22-27.
- 王志旺,李端有,王湘桂. 区域滑坡空间预测方法研究综述[J]. 长江科学院院报,2012,29(05):78-85.
- WANG Zhiwang, LI Duanyou, WANG Xianggui. Review of research of regional landslide susceptibility mapping model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(05):78-85.
- 杨根云,周伟,方教勇. 基于信息量模型和数据标准化的滑坡易发性评价[J]. 地球信息科学学报,2018,20(05):674-683.
- YANG Genyun, ZHOU Wei, FANG Jiaoyong. Assessment of landslide susceptibility based on information quantity model and data normalization[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(5):674-683.
- 张俊,殷坤龙,王佳佳,等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(02):284-296.
- ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou district of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(02):284-296.
- 杜军,杨青华,严嘉,等. 基于GIS与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2010,35(02):324-330.
- DU Jun, YANG Qinghua, YAN Jia, et al. Hazard Evaluation of Secondary Geological Disaster Based on GIS and Information Value Method[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35 (02): 324-330.
- 谭玉敏,郭栋,白冰心,等. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价[J]. 地球信息科学学报,2015,17(12):1554-1562.
- TAN Yumin, GUO Dong, BAI Bingxin, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in fuling district, Chongqing city, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2015,17(12):1554-1562.
- 许英姿,卢玉南,李东阳,等. 基于GIS和信息量模型的广西花岗岩分布区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报,2016,24(04):693-703.
- XU Yingzi, LU Yunan, LI Dongyang, et al. GIS and information model based landslide susceptibility assessment in granite area of Guang Xi province[J]. Journal of Engineering Geology, 2016,24(04):693-703.
- 谈树成,赵娟娟,杨林,等. 基于GIS和信息量-快速聚类模型的滑坡易发性研究——以云南省福贡县为例[J]. 云南大学学报(自然科学版),2018,40(06):1148-1158.
- TAN Shucheng, ZHAO Juanjuan, YANG Lin, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on GIS and the information value & the K-means cluster model-Take Fugong County as an Example[J]. Journal of Yunnan University, 2018,40(06):1148-1158.
- 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,(01):89-92.
- RUAN Shenyong, HUANG Runqiu. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk[J]. Journal of Chen Du University of Technology, 2001,(01):89-92.
- 张以晨,秦胜伍,翟健健,等. 基于信息量的长白山地区泥石流易发性评价[J]. 水文地质工程地质,2018,45(02):150-158.
- ZHANG Yichen, QIN Shengwu, ZHAI Jianjian, et al. Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018,45(02):150-158.
- 陈立华,叶江,魏传健,等. 基于ArcGIS与信息量法的滑坡易发性评价[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(01):141-148.
- CHEN Lihua, YE Jiang, WEI Chuanjian, et al. Application of Arc GIS and information method to landslide susceptibility evaluation[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2016,41(01):141-148.
- 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(04):797-808.
- WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value;a case study of Wanzhou district, Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(04):797-808.
- 杜谦,范文,李凯,等. 二元Logistic回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J]. 灾害学,2017,32(02):220-226.
- DU Qian, FAN Wen, LI Kai, et al. Geohazard Susceptibility Assessment by Using Binary Logical Regression and Information Value Model[J]. Journal of Catastrophology, 2017,32(2):220-226.
- 孟庆华,孙炜锋,王涛. 陕西凤县地质灾害易发性评价研究[J]. 工程地质学报,2011,19(03):388-396.

- MENG Qinghua SUN Weifeng WANG Tao. GIS based four zones of geohazard susceptibility Degrees for Feng Xian COUNTY in Qinling Mountains of Shan Xi Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (03): 388-396.
- 郭子正, 殷坤龙, 黄发明, 等. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(02): 287-300.
- GUO Zizheng, YIN Kunlong, HUANG Faming, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide classification and weighted frequency ratio model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 19(03): 388-396.
- 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- LI Miaomiao. The Method of Vegetation Fraction Estimation by Remote Sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2003.
- 孙艳萍, 张苏平, 陈文凯, 等. 汶川地震滑坡危险性评价—以武都区 and 文县为例[J]. 地震工程学报, 2018, 40(05): 1084-1091.
- SUN Yangping, ZHANG Suping, CHEN Wenkai, et al. Risk assessment of landslides caused by Wenchuan Earthquakes; A case study in the Wudu District and Wenxian Country, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(05): 1084-1091.
- 杜悦悦, 彭建, 赵士权, 等. 西南山地滑坡灾害生态风险评价——以大理白族自治州为例[J]. 地理学报, 2016, 71(09): 1544-1561.
- DU Yueyue, PENG Jian, ZHAO Shiquan, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters in mountainous areas of Southwest China: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(09): 1544-1561.
- 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(02): 67-76.
- DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, et al. Application of information quantity model to hazard evaluation of geological disaster in mountainous region environment: a case study of Luding County, Sichuan Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(02): 67-76.
- 吴艾祺, 宋飞, 闵瑶臻, 等. 岐山县宋家尧村滑坡基本特征与演化机理分析[J]. 西北地质, 2019, 52(02): 190-197.
- WU Aiqi, SONG Fei, MIN Yaozhen, et al. Basic Characteristics and Evolution Mechanism of the Songjiayao Village Landslide in Qishan County [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(02): 190-197.
- 寇丽娜, 边疆, 张婷婷, 等. 基于 GIS 的信息量法在青海民和区域地质灾害易发性评价中的应用[J]. 西北地质, 2017, 50(02): 244-248.
- KOU Lina, BIAN Jiang, ZHANG Tingting, et al. The application of GIS-based information method in susceptibility evaluation of regional geological hazards in Mihe County, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2017, 50(02): 244-248.
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践[J]. 西北地质, 2019, 52(02): 125-135.
- ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and Practices for the Investigation and Risk Assessment of Geo-hazards in Mountainous Towns [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(02): 125-135.
- ADITIANA, KUBOTA T, SHINOHARA Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia [J]. Geomorphology, 2018, 318: 101-111.
- WANG Y, FANG Z, HONG H. Comparison of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in Yanshan County, China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 666: 975-993.
- HUANG Y, ZHAO L. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines [J]. Catena, 2018, 165: 520-529.
- 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.
- HONG H, XU C, BUI D T. Landslide Susceptibility Assessment at the Xiushui Area (China) Using Frequency Ratio Model [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 513-517.
- KHANH, SHAFIQUE M, KHAN M A et al. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2019, 22(1): 11-24.