

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.23

基于信息量的长白山地区泥石流易发性评价

张以晨¹, 秦胜伍², 翟健健^{2,3}, 李广杰², 彭帅英², 刘 绪², 陈骏骏²

(1. 吉林省地质环境监测总站, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 成都市龙泉驿区城乡房产管理局, 四川 成都 610100)

摘要: 长白山地区泥石流较发育, 选取高程、坡度、坡向、年降水、年蒸发、泥石流点密度、人口密度、构造作用、河流作用、地层岩性、地下水类型、地貌类型、土地利用 13 个影响因素, 以研究区 110 个泥石流点为样本数据, 连续型指标依据各个因素分级状态下泥石流比例曲线和信息量曲线的突变点为等级划分临界值, 离散型变量根据已有分类分级, 建立了长白山地区泥石流易发性指标评价体系。基于信息量模型和 GIS 平台的栅格数据, 计算各个因素分级状态下的信息量, 采用自然断点法将易发性等级分为 5 级。结果表明: 泥石流高易发区主要为地层岩性较差、靠近河流和断层的区域, 土地利用类型为农业用地和居住使用地, 较高易发区和高易发区占总研究区面积的 19%, 大部分地区较安全。采用曲线下面积即 AUC 值作为易发性精度验证结果, AUC 值为 93%, 表明评价结果可靠。

关键词: 地质灾害; 泥石流; 易发性评价; 信息量; GIS; 长白山地区

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0150-09

Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area

ZHANG Yichen¹, QIN Shengwu², ZHAI Jianjian^{2,3}, LI Guangjie², PENG Shuaiying², LIU Xu², CHEN Junjun²

(1. Jilin Institute of Geo-Environment Monitoring, Changchun, Jilin 130021, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China; 3. Chengdu Urban and Rural Real Estate Management Bureau of Longquanyi, Chengdu, Sichuan 610100, China)

Abstract: Susceptibility evaluation is conducted at the Changbai Mountain area where debris flows frequently occur. Thirteen influence factors are chosen as the evaluation indices, including the slope height, slope, aspect, annual precipitation, annual evaporation, density of debris flow, population density, tectonism, fluviation, formation lithology, groundwater types, geomorphological types and land use types. The frequency curve of debris flow and the magnitude curve of information are drawn based on 110 debris flows points. Continuous indices classification is based on catastrophe points on the curve and discrete indices classification is based on the existing standards. The grid data model of GIS platform and weight information model are used to obtain the information values of each index. The susceptibility evaluation results show that the high susceptibility areas are characterized by poor tectonism, closing to rivers and tectonic lines, erosion and denudation landforms, and agricultural and residential lands. The AUC value is conducted as the accuracy of the susceptibility evaluation of debris flow. The accuracy is 93%. The total area of higher susceptibility areas and high susceptibility areas accounts for 19% of the study area, and most of the areas are safe.

收稿日期: 2017-04-01; 修订日期: 2017-07-12

基金项目: 国土资源部公益性科研专项(201211095-6); 吉林省科技厅科技发展计划项目(20170101001JC); 国家自然科学基金青年基金(41202197);

第一作者: 张以晨(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工环地质相关研究。E-mail: 82708694@qq.com

通讯作者: 秦胜伍(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害方面研究。E-mail: qinsw@jlu.edu.cn

Keywords: geological hazard; debris flow; susceptibility assessment; weight information value; GIS; Changbai Mountain area

泥石流作为一种突发性地质灾害,具有运动快、历时短等特点,严重威胁人类生命财产安全^[1]。长白山地区位于中朝边界,区内地质灾害种类较多且发生频繁,危害大,对长白山可持续发展和国家地缘政治安全有着重要的影响^[2]。长白山千年大喷发产生了大量火山灰^[3],这些碎屑物为泥石流提供了丰富的物源,加之长白山地区地势复杂,地形起伏较大,雨量充沛,致使长白山地区成为泥石流灾害的高发区^[2]。开展泥石流易发性评价工作能够有效减轻泥石流灾害带来的损失,促进经济发展^[4]。

近年来,国内外学者对泥石流易发性评价开展了大量研究,应用层次分析法^[5]、模糊数学法^[6]、聚类和最大似然法^[7],基于 Fisher 判别分析理论^[8]、粗糙集理论^[9]、数量化理论^[4]、区间数理论^[10]等对泥石流易发性进行了评价与分析,建立了指标熵模型^[11]、证据权模型^[12]、Logistic 模型^[13]等评价模型。这些方法和模型的应用很大程度上推动了泥石流灾害易发性评价的进展,但每种方法也都存在一定的限制和不足。信息量模型物理意义明确、操作简单,能够科学地对各评价因素进行分级^[14],所以本文采用信息量模型评价长白山地区泥石流灾害的易发性。

本文在对长白山泥石流灾害进行实地调查的基础上,选取高程、坡度、坡向、年降水、年蒸发、泥石流点密度、人口密度、构造作用、河流作用、地层岩性、地下水类型、地貌类型、土地利用 13 个评价指标,将基于 GIS 的信息量模型应用于长白山地区泥石流易发性进行分析评价中,以期为该地区泥石流的防治规划提供依据。

1 信息量模型基本原理

信息量模型是利用信息熵的概念分析各种因素综合作用下地质灾害易发性的模型,其理论基础是信息论,是进行区域地质灾害预测评价的一种有效的方法。就泥石流灾害而言,采用泥石流灾害发生过程中熵的减少表示泥石流灾害发生的可能性。信息量越大,泥石流灾害发生的可能性越大:

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = \ln \frac{P(y | x_1 x_2 \cdots x_n)}{P(y)} \quad (1)$$

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = I(y, x_1) + I_{x_1}(y, x_2) + \cdots + I_{x_1 x_2 \cdots x_{n-1}}(y, x_n) \quad (2)$$

式中: $I(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ ——影响因素 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 对泥石流灾害提供的信息量;

$P(y | x_1 x_2 \cdots x_n)$ ——因素 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 组合条件下泥石流发生的概率;

$P(y)$ ——泥石流发生的概率;

$I_{x_1}(y, x_2)$ ——影响因素 x_1 条件下, x_2 对泥石流灾害发生提供的信息量。

单独计算各因素 x_i 对泥石流灾害发生事件提供的信息量 $I_i(y, x_i)$,在实际计算中可运用频率进行条件概率的估算:

$$I_i(y, x_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (3)$$

式中: S ——研究区评价单元总数;

N ——研究区内分布有泥石流灾害的单元总数;

S_i ——研究区内含有评价因素 x_i 的单元数;

N_i ——分布在因素 x_i 内的特定类别的泥石流灾害单元数。

在求得每个单元在所有影响因子条件下的信息量值后,通过求和即可得到单个评价单元内总的信息量值:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (4)$$

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。

将评价单元总的信息量值 I 作为判断该单元在影响泥石流时的综合作用指标: $I > 0$ 时,该单元处有利于泥石流的形成,且 I 值越大,易发性程度越高; $I < 0$ 时,该单元处不利于泥石流的形成,且 I 值越小,易发性程度越低。

2 研究区概况

研究区以长白山主峰为中心,包括其四周 70 ~ 110 km 的区域(图 1)。主要包括安图县、抚松县、长白朝鲜族自治县的大部分地区,以及临江县、和龙市、桦甸市、敦化市的少部分地区。地理坐标为 E127°16' ~ 128°54', N41°11' ~ 43°00', 面积 $1.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区位于中温带季风半湿润气候区,年均降水量 700 ~ 1 400 mm,由西向东递增。地势以白云峰为中心,向四周逐渐降低,地貌按成因可划分为火山地貌、构造剥

蚀地貌、侵蚀堆积地貌,研究区地层发育较全,出露有元古代、古生代、中生代和新生代岩浆岩。

根据野外实地调查数据,研究区内共分布泥石流灾害点 110 个(图 1),选取全区 110 个泥石流点作为样本数据,进行泥石流易发性评价。

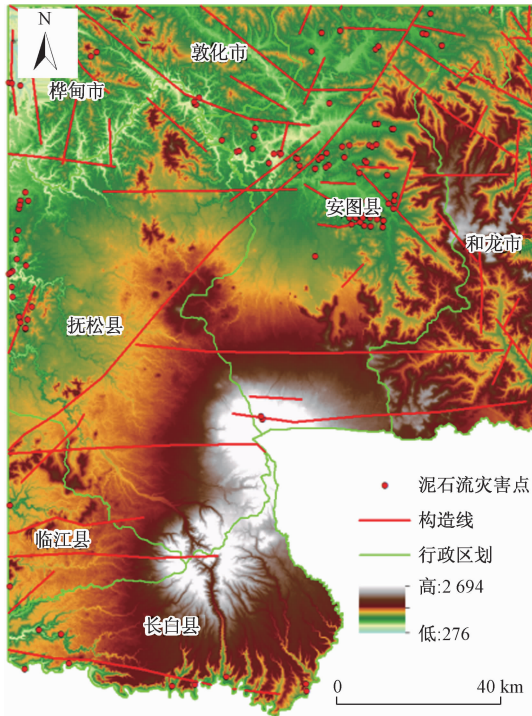


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

3 基于 GIS 的长白山地区泥石流易发性评价

3.1 评价单元划分

区域泥石流灾害易发性评价是在对研究区域划分评价单元的基础上进行的,并对分布在各个区域内的泥石流灾害分布信息进行统计分析。

对于不同比例尺度和精度的空间数据,评价单元的划分方法区别很大,对于研究区比较大而比例尺比较小的空间数据,一般采用规则的栅格单元。本研究区面积较大,故选用栅格单元作为泥石流易发性分析评价基本单元^[15]。在 ArcGIS 平台上,将各图层的矢量数据转化为 30 m × 30 m 的栅格数据。

3.2 评价指标体系建立

影响泥石流灾害的因素众多而复杂,因素之间相互联系、相互影响,要合理选取影响因子,分析主要的矛盾所在,选择与泥石流灾害相关性大、起控制作用的因子。依据上述原则,本文选取高程、坡度、坡向、年降水、年蒸发、泥石流点密度、人口密度、构造作用、河流

作用、地层岩性、地下水类型、地貌类型、土地利用 13 个指标作为评价指标。

3.3 评价指标状态分级

利用 ArcGIS 的空间分析功能对各影响因子和泥石流灾害点的分布关系进行叠加分析,进行信息量的计算,并分析泥石流的形成机理。

离散型评价指标的划分依据野外调查以及已有的分类标准,如本文选取的评价指标:岩性、地貌类型、地下水类型、土地利用、地震烈度等。连续型指标依据各个因素分级状态下泥石流比例曲线和信息量曲线的突变点为等级划分临界值。做出各个评价因子的状态分级图(图 11),并统计各个区域内的泥石流点个数和所占比例。

(1) 高程

以 ASTER GDEM V2 为数据源,获取研究区 30 m 精度的 DEM 栅格数据。研究区最高点为长白山主峰白云峰,海拔 2 691 m,最低点位于西北处的松花江河道中,海拔 350 m,高差 2 600 余米。从 350 m 起,以 50 m 为步长,利用 ArcGIS 中的自然间断点分级法进行分级,统计泥石流比例、分级比例、信息量值(图 2),泥石流主要分布在 600 ~ 750 m 范围内。

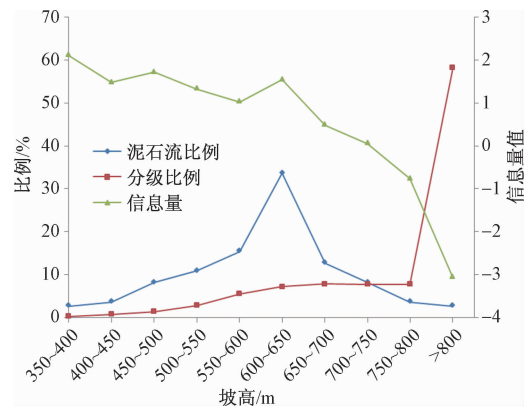


图 2 高程因素分布曲线

Fig. 2 Slope height factor distribution curve

(2) 坡度

以 30 m 精度的 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析的栅格表面工具,生成坡度栅格。从 0° 起,以 2° 为步长使用自然间断点分级法进行分级,统计泥石流比例、分级比例、信息量值(图 3),研究区泥石流点主要分布在坡度 4° ~ 14° 的范围内。

(3) 坡向

以 30 m 精度的 DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 的空间分析的栅格表面工具,生成坡向栅格。坡向分为

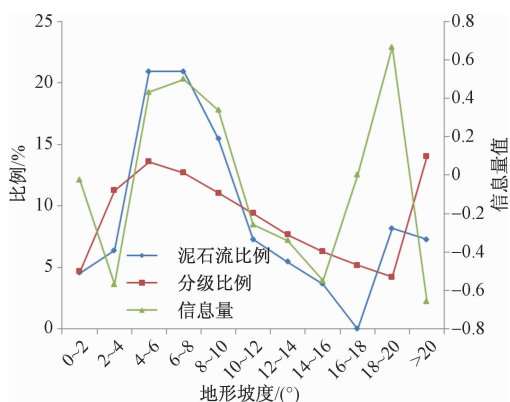


图3 坡度因素分布曲线

Fig. 3 Slope factor distribution curve

10个类别,各分级状态下的泥石流比例,见图4。可见泥石流点主要分布在西南、南、东南坡向方向,处于阳坡。

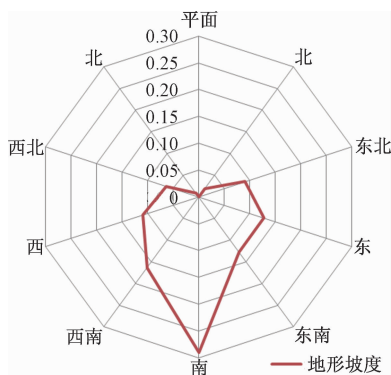


图4 坡向因素雷达图

Fig. 4 Aspect factor radar chart

(4) 年降水量

研究区泥石流为多年泥石流发生情况,因此选取年降水量作为指标因素。根据吉林省国土资源地图集,绘制研究区年降水量等值线图,研究区中心天池降水量最大,向外扩展降水量逐渐减小,将研究区降水量分为 < 700 mm、 $700 \sim 800$ mm、 $800 \sim 900$ mm 和 > 900 mm 4个区(图5)。

(5) 年蒸发量

年蒸发量作为水文条件对于泥石流的发生有着重要的影响。根据吉林省国土资源地图集,绘制研究区年蒸发量等值线图,研究区以天池蒸发量最小,向外扩展蒸发量逐渐增大,将研究与蒸发量划分为 < 1000 mm、 $1000 \sim 1200$ mm、 > 1200 mm 3个区(图6)。

(6) 泥石流点密度

根据野外调查资料,以研究区村为单位,统计各个村落的泥石流点个数,在 ArcGIS 平台上通过,计算各

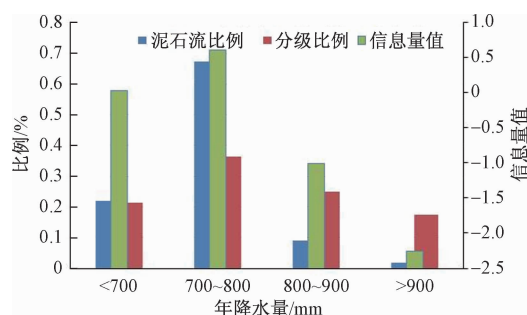


图5 年降雨量分级统计

Fig. 5 Hierarchical statistics of the annual precipitation

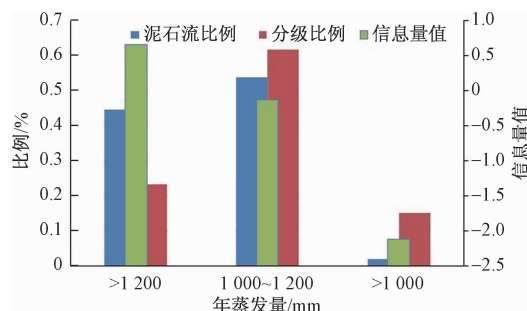


图6 年蒸发量分级统计

Fig. 6 Hierarchical statistics of the annual evaporation

个村落的泥石流点密度,得到研究区泥石流点密度栅格图,用自然断点法进行划分,分为5类,统计各个分区内的灾害点个数(图7)。

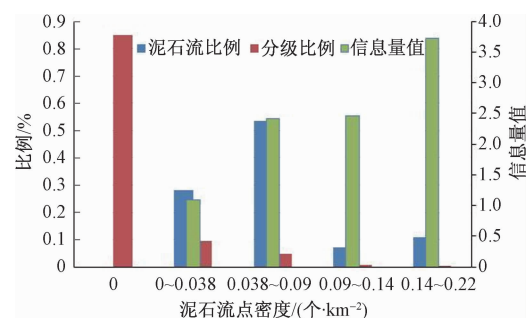


图7 泥石流点密度分级统计

Fig. 7 Hierarchical statistics of density of debris flow points

(7) 人口密度

以研究区村为单位,收集各个村落人口数量,在 ArcGIS 平台上计算各个村落的人口密度,得到研究区人口密度栅格图。分别以 < 20 人/ km^2 、 $20 \sim 40$ 人/ km^2 、 $40 \sim 70$ 人/ km^2 和 > 70 人/ km^2 分为4级(图8)。

(8) 构造作用

长白山地区的大地构造位于中朝准地台的辽东台隆的西部,褶皱、断裂较发育。以研究区构造纲要图

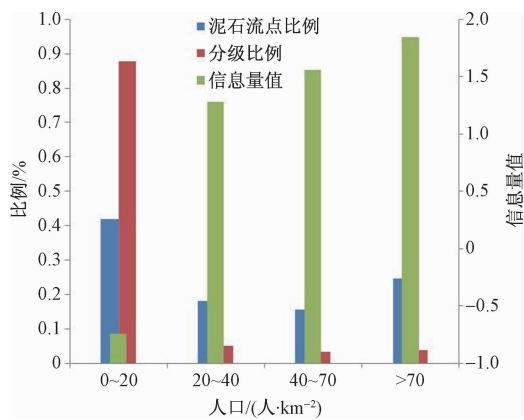


图8 人口密度分级统计

Fig. 8 Hierarchical statistics of population density

(1:20 万)为基础,以主要断裂带为中心做缓冲区。根据泥石流点的分布情况,缓冲距离分为5级,0~1 km, 1~2 km, 2~3 km, 3~4 km, >4 km。根据统计结果,大部分泥石流点位于0~2 km范围内。

(9) 河流作用

研究区水系较发育,分属松花江流域、鸭绿江流域、图们江流域。以研究区的河流作为缓冲中心,每400 m为一缓冲带,作缓冲区分析,统计结果表明,泥石流点主要分布在距河流1 200 m范围内,分布在河流的两侧。

(10) 地层岩性

以研究区1:20万地质图为基础,根据岩土体的工程地质性质,按软硬程度将研究区工程地质岩组划分为4大类:极软岩、软质岩、硬质岩和极硬岩(图9),并绘制研究区地层岩性分级图,状态分级见图10。

(11) 地下水类型

以研究区水文地质图(1:50万)为依据,绘制研究区地下水类型图,研究区地下水类型主要为构造裂隙水、碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙水、玄武岩空洞裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水、碳酸盐岩夹碎屑岩溶洞水。泥石流点主要分布在构造裂隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水区域内。

(12) 地貌类型

以研究区地貌类型图(1:50万)为依据,绘制研究区地貌类型图,研究区地貌类型可划分为河谷平原、河流、平坦熔岩高台地、起伏侵蚀剥蚀低台地、侵蚀剥蚀低山、侵蚀剥蚀小起伏中山、侵蚀剥蚀中起伏中山和熔岩丘陵8个类型。泥石流主要发生在平坦熔岩高台地、侵蚀剥蚀中起伏中山,泥石流堆积扇主要分布于山

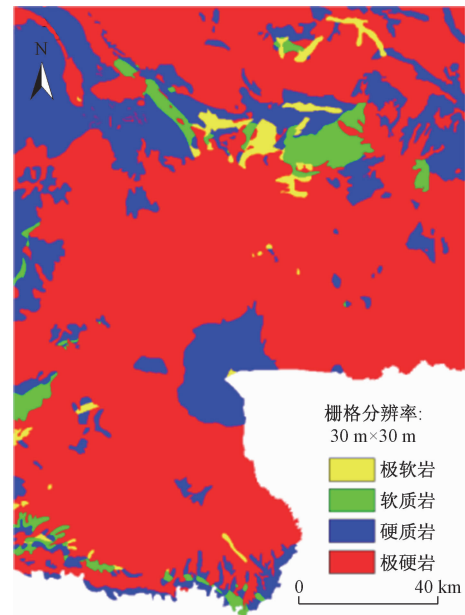


图9 地层岩性状态分级图

Fig. 9 State classification of the stratigraphic lithologic factor

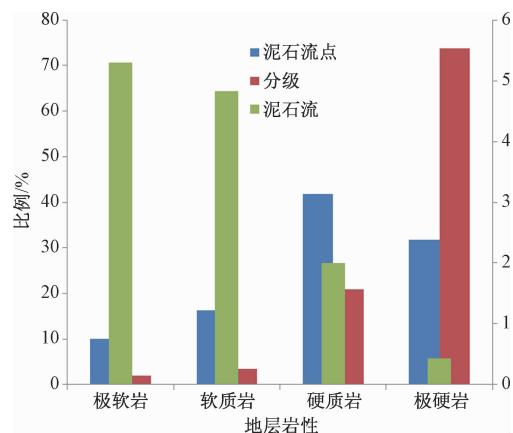


图10 地层岩性分布

Fig. 10 Stratigraphic lithologic distribution

地前缘与河谷平原交界位置。

(13) 土地利用

土地利用数据以研究区各个县国土资源局的土地利用现状图为基础,矢量化,转栅格,合并而成。研究区土地利用主要包括农业用地、灌木林地、草地、居住使用地、河流和有林地。人类农业生产、居住使用破坏了原有植被,水土保持能力变差,土体松散,为泥石流的发生提供了良好的物源。泥石流点大多分布在农业用地和居住使用用地区域内。

3.4 基于GIS的信息量计算和易发性评价

建立评价指标体系后,根据式(3)计算各个评价指标信息量值。各评价因子状态分级图见图9和图11。

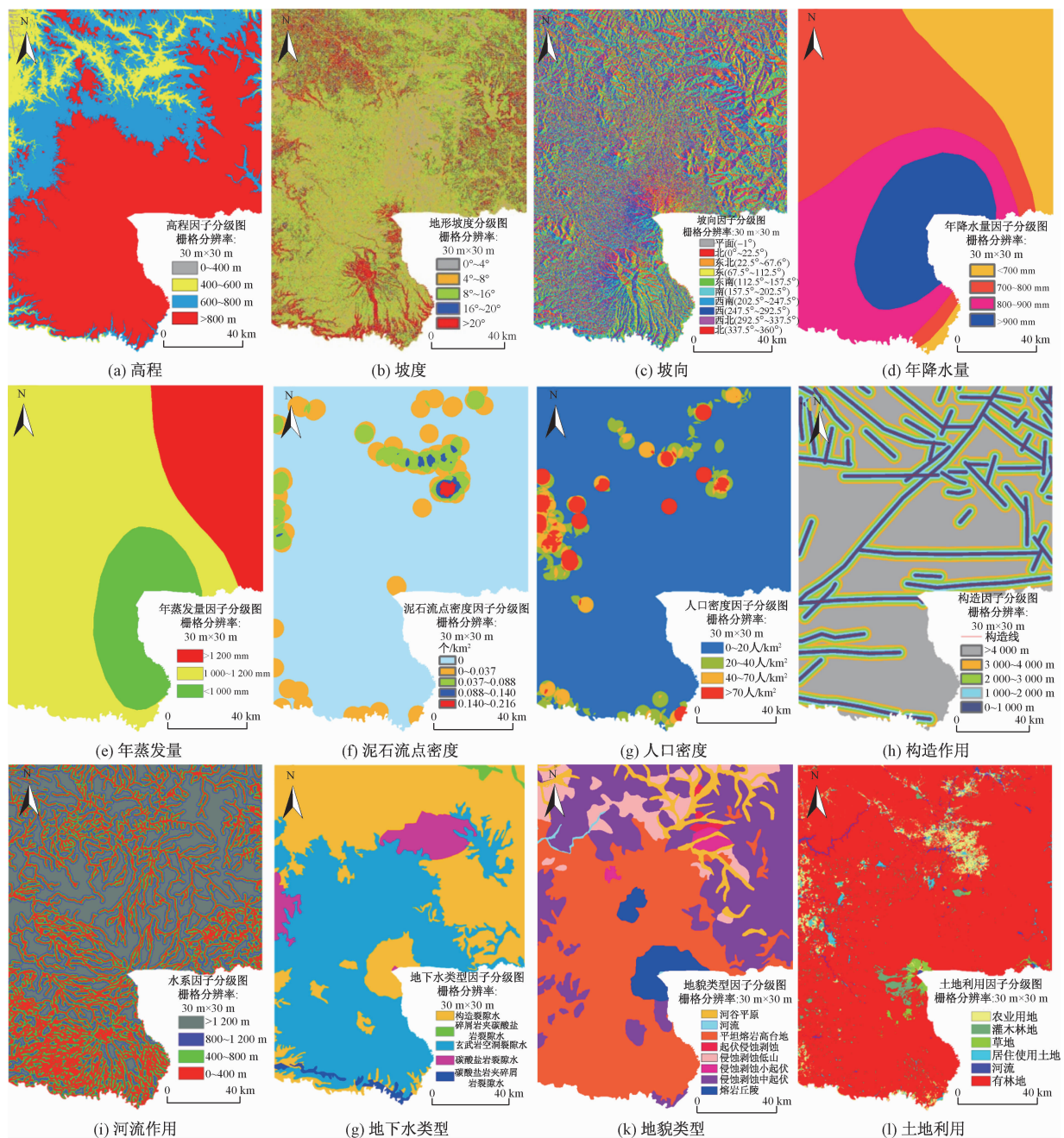


图 11 各评价因子状态分级图

Fig. 11 State classification of the factors

将各个评价因子图层和对应的泥石流分布图在 ArcGIS 中做空间分析运算,得到泥石流在每种因素的各个类别中的分布情况,得出每一因子图层中各类型中泥石流的分布密度,即 N_i/S_i 值。如表 1 所示,即为各评价因子内各类别的信息量。

在 ArcGIS 平台下,将各个分级状态下计算得到的信息量值分别赋值到各个分级栅格中,得到 13 个评价指标的信息量栅格图层 I_i 。根据式(4),利用 ArcGIS 栅格计算器(Raster Calculator)进行叠加

计算,将 13 个信息量栅格图层相加,可得到整个研究区域的所有评价单元的总信息量 I 。信息量值越高表明发生泥石流灾害的可能性越大,根据自然断点法(Natural Break)将易发性信息量分为 5 个等级,低易发区 $[-16.286, -8.811]$ 、较低易发区 $[-8.811, -4.301]$ 、中易发区 $[-4.301, -0.305]$ 、较高易发区 $[-0.305, 4.721]$ 、高易发区 $[4.721, 16.578]$,得到最后的易发性分区图(图 12)。

表 1 各因素状态信息量表
Table 1 Weighted information values of each factor state

指标因素	分级状态	泥石流点比例	信息量	指标因素	分级状态	泥石流点比例	信息量
高程/m	0 ~ 400	0.03	2.10	构造作用/km	0 ~ 1	0.13	-0.16
	400 ~ 600	0.36	1.21		1 ~ 2	0.31	0.74
	600 ~ 800	0.58	0.64		2 ~ 3	0.06	-0.75
	> 800	0.03	-3.06		3 ~ 4	0.10	-0.13
坡度/(°)	0 ~ 4	0.11	-0.38		> 4	0.38	-0.17
	4 ~ 8	0.42	0.46	河流作用/m	0 ~ 400	0.27	0.11
	8 ~ 16	0.32	-0.08		400 ~ 800	0.15	-0.05
	16 ~ 20	0.08	-0.14		800 ~ 1 200	0.24	-0.07
	> 20	0.07	-0.66		> 1 200	0.34	-0.01
坡向/(°)	平面(-1)	0.00	0.00	地层岩性	极软岩	0.10	1.67
	北(0 ~ 22.5)	0.02	-1.36		软质岩	0.16	1.57
	东北(22.5 ~ 67.5)	0.09	-0.32		硬质岩	0.42	0.69
	东(67.5 ~ 112.5)	0.13	0.00		极硬岩	0.32	-0.84
	东南(112.5 ~ 157.5)	0.13	0.16	地下水类型	构造裂隙水	0.50	0.14
	南(157.5 ~ 202.5)	0.29	0.88		碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙水	0.01	0.68
	西南(202.5 ~ 247.5)	0.16	0.30		玄武岩空洞裂隙水	0.09	-1.70
	西(247.5 ~ 292.5)	0.11	-0.23		碳酸盐岩裂隙水	0.38	1.97
	西北(292.5 ~ 337.5)	0.06	-0.68		碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙水	0.02	0.76
	北(337.5 ~ 360)	0.01	-1.94	地貌类型	河谷平原	0.29	1.59
年降水量/mm	< 700	0.22	0.03		河流	0.00	0.00
	700 ~ 800	0.67	0.61		平坦熔岩高台地	0.19	-0.92
	800 ~ 900	0.09	-1.01		起伏侵蚀剥蚀低台地	0.00	0.00
	> 900	0.02	-2.26		侵蚀剥蚀低山	0.14	0.74
年蒸发量/mm	> 1 200	0.45	0.65		侵蚀剥蚀小起伏中山	0.06	1.82
	1 000 ~ 1 200	0.54	-0.14		侵蚀剥蚀中起伏中山	0.30	-0.12
	< 1 000	0.02	-2.12		熔岩丘陵	0.02	-0.80
泥石流点密度/(个·km ⁻²)	0	0.00	0.00	土地利用类型	农业用地	0.51	2.46
	0 ~ 0.037 3	0.28	1.09		灌木林地	0.04	0.16
	0.037 3 ~ 0.088 2	0.54	2.41		草地	0.02	0.79
	0.088 2 ~ 0.140 1	0.07	2.47		居住使用土地	0.15	2.63
人口密度/(个·km ⁻²)	0.140 01 ~ 0.216 4	0.11	3.72		河流	0.02	0.70
	0 ~ 20	0.42	-0.74		有林地	0.26	-1.22
	20 ~ 40	0.18	1.28				
	40 ~ 70	0.15	1.56				
	> 70	0.25	1.84				

4 结果分析及精度评价

4.1 易发性结果分析

泥石流易发性评价分区结果表明,长白山地区泥石流高易发区主要位于安图县中部地区,抚松县西部地区,桦甸大部分地区,以及长白县、和龙市和敦化市的小部分地区。高易发区内构造作用比较活跃,地层岩性质量较差,为泥石流提供了丰富的固体碎屑物。高易发区内以侵蚀剥蚀地貌为主,有利于泥石流灾害的形成。水系作用也对灾害的发育有着重要的影响,水系线距离越近灾害越易发。泥石流高易发区主要为人类活动强烈的地区,人类生产生活、农业开荒用地、工程建设改造都对自然环境产生了重大影响,造成水

土流失、植被覆盖率降低,为泥石流的形成发育提供了有利条件。研究区 19% 的地区处于较高易发区和高易发区,低易发区占 32.2%,说明大部分地区都处于泥石流低易发区。

4.2 易发性精度评价

统计各个易发区的泥石流点个数、栅格数、泥石流比例、栅格比例,易发性由高到低,进行百分比累加,做出评价结果检验曲线。由表 2 可知,有 94.6% 的泥石流灾害点位于较高易发区和高易发区,易发性由低到高变化的过程中,栅格数目由大到小,同时灾害点密度增大;易发性由低到高的过程中,泥石流比率越来越大,同时泥石流实际发生的比率随之增大,符合等级划分原则。评价结果检验曲线呈现明显的“凸型”,表明

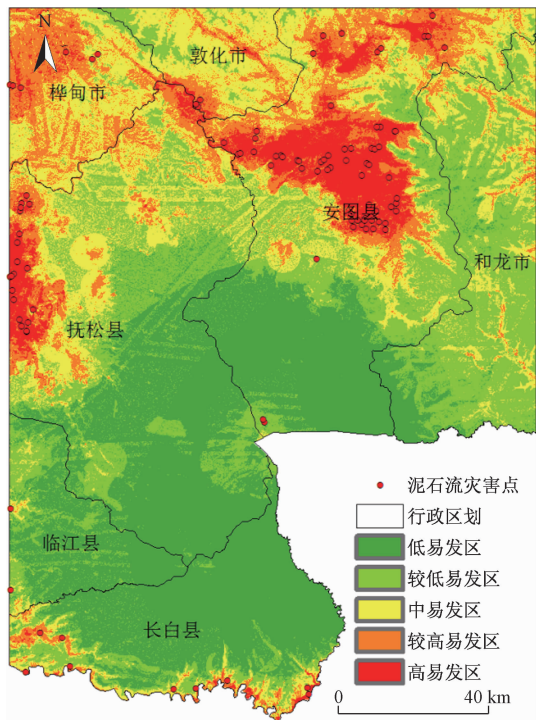


图 12 易发性分区图

Fig. 12 Debris-flows susceptibility map

泥石流评价结果是理想的,在同类评价成果^[17]中,也有类似的体现。曲线下面积(AUC 值)为 93%,用来定量表示泥石流易发性评价模型的成功率(图 13),结果令人满意。

表 2 栅格统计表

Table 2 Statistical table of grids

易发性等级	泥石流点数	栅格数	泥石流比例	栅格比例	泥石流比率
低	1	6 826 279	0.009	0.322	0.028
较低	2	5 684 272	0.018	0.268	0.068
中	3	4 670 554	0.027	0.220	0.124
较高	18	2 756 219	0.164	0.130	1.259
高	86	1 272 658	0.782	0.060	13.030

注:泥石流比率 = 泥石流比例/栅格比例

5 结论

(1)选择 13 个因子建立了长白山泥石流易发性评价指标体系,基于 GIS 和信息量模型,对长白山地区泥石流灾害易发性进行了分析与评价。根据评价结果检验曲线和实际情况分析,评价结果良好。

(2)泥石流高易发区主要为人类活动强烈的地区,土地利用类型为农业用地和居住使用地,同时地层岩性较为软弱地区泥石流灾害易发,构造作用、水系作用也对灾害的发育有着重要的影响,主要表现为离构

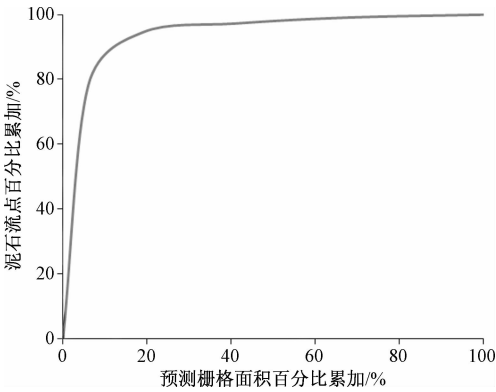


图 13 泥石流易发性评价结果评价曲线

Fig. 13 Map showing the success rate of debris-flows susceptibility

造线、水系线距离越近灾害越易发。

(3)长白山地区泥石流高易发区主要位于安图县中部地区,抚松县西部地区,桦甸大部分地区,以及长白县、和龙市和敦化市的小部分地区。长白山地区大部分地区处于泥石流低易发区。

参考文献:

- [1] 王晓朋,潘懋,任群智. 基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007(2): 211 - 215. [WANG X P, PAN M, REN Q Z. Hazard assessment of debris flow based on geomorphic information entropy in cathment [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2007(2): 211 - 215. (in Chinese)]
- [2] 倪晓娇,南颖. 基于 GIS 的长白山地区地质灾害风险综合评估[J]. 自然灾害学报, 2014(1): 112 - 120. [NI X J, NAN Y. Comprehensive assessment of geological disasters risk in Changbai Mountain region based on GIS[J]. Journal of Natural Disasters, 2014(1): 112 - 120. (in Chinese)]
- [3] 刘国超. 物质成份对长白山火山次生泥石流影响范围的分析[D]. 长春:吉林大学, 2013. [LIU G C. Analysis of the influence of material composition on the scope of Changbai mountains volcano secondary debris flow[D]. Changchun: Jilin University, 2013 (in Chinese)]
- [4] 程英建,石豫川,石胜伟,等. 数量化理论在泥石流易发性预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2015(1): 140 - 145. [CHENG Y J, SHI Y C, SHI S W, et al. Prediction of debris flow occurrence based on the quantification theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015 (1): 140 - 145 (in

- Chinese)]
- [5] 郭瑞,马富存,郭一兵,等. 基于层次分析法的泥石流易发性评价[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016(4):347-351. [GUO R, MA F C, GUO Y B, *et al.* Debris flow evaluation of occurrence easiness based on AHP [J]. Journal of East China University of Technology, 2016(4):347-351. (in Chinese)]
- [6] 鲍春,宋丹青. 模糊数学在库区泥石流易发性评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015(6):132-136. [BAO C, SONG D Q. Application of fuzzy mathematics in prone evaluation of debris flow of reservoir area [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015(6):132-136. (in Chinese)]
- [7] 胡凯衡,崔鹏,韩用顺,等. 基于聚类和最大似然法的汶川灾区泥石流滑坡易发性评价[J]. 中国水土保持科学, 2012(1):12-18. [HU K H, CUI P, HAN Y S, *et al.* Susceptibility mapping of landslides and debris flows in 2008 Wenchuan earthquake by using cluster analysis and maximum likelihood classification methods [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012(1):12-18. (in Chinese)]
- [8] 张紫昭,刘军,管伟明. 山区公路泥石流易发性评价的 Fisher 判别分析法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014(8):1108-1113. [ZHANG Z Z, LIU J, GUAN W M. Fisher discriminant analysis method for susceptibility evaluation of mountainous highway debris flow [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014(8):1108-1113. (in Chinese)]
- [9] 王念秦,薛瑶琼,李少兵,等. 基于粗糙集理论的泥石流易发性综合评判模型[J]. 水土保持研究, 2014(3):246-250. [WANG N Q, XUE Y Q, LI S B, *et al.* Debris flow liability comprehensive evaluation model on rough set theory [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014(3):246-250. (in Chinese)]
- [10] 方成杰,钱德玲,徐士彬,等. 基于联系期望的泥石流易发性评价模型[J]. 水利水运工程学报, 2017(2):1-7. [FANG C J, QIAN D L, XU S B, *et al.* An assessment model for debris flow liability to occurrence based on connectional expectation [J]. Hydropower & Engineering, 2017(2):1-7. (in Chinese)]
- [11] 陈剑,黎艳,许冲. 金沙江干热河谷区泥石流易发性评价模型及应用[J]. 山地学报, 2016(4):460-467. [CHEN J, LI Y, XU C. Susceptibility assessment model of debris flows in the dry-hot valley of the Jinsha river and its application [J]. Mountain Research, 2016(4):460-467. (in Chinese)]
- [12] 焦方谦,赵新生,陈川. 证据权模型在泥石流灾害易发性评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2013(6):1111-1124. [JIAO F Q, ZHAO X S, CHEN C. Debris flow hazard susceptibility evaluation application with weighted evidences model [J]. Arid Land Geography, 2013(6):1111-1124. (in Chinese)]
- [13] 邹强,王青,刘延国. 基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性分析[J]. 水土保持通报, 2014(3):185-189. [ZOU Q, WANG Q, LIU Y G. Evaluation method of debris flow susceptibility using GIS and Logistic model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014(3):185-189. (in Chinese)]
- [14] 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(4):797-808. [WANG J J, YIN K L, XIAO L L. 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(4):797-808. (in Chinese)]
- [15] 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]. 武汉:中国地质大学, 2009. [LIU B. Study on landslide hazard spatial prediction and system development based on WEBGIS——a case study of the Three Gorges dam area to the eastern part of the Yangtze River [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese)]
- [16] 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(增刊2):3978-3985. [XU C, DAI F C, YAO X, *et al.* GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in wenchuan earthquake region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(Sup 2):3978-3985. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳