



基于 GIS 技术和信息量法的地质灾害易发性研究 ——以海南省昌江县为例

李 信^{1,2}, 阮 明^{1,2}, 杨 峰^{1,2}, 柳长柱^{1,2}, 杨永鹏^{1,2}

1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206; 2. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206

摘 要: 海南省昌江县地质灾害的发育受地质环境条件控制和多种外在因素影响。依据昌江县地质灾害详细调查资料, 选择各类地质灾害发育的控制条件和诱发因素作为评价指标, 通过建立地质灾害影响因子体系, 构建信息量分析模型。通过对各项因子进行量化并使其归一化, 运用层次分析法确定评价因子权重系数, 利用 ArcGIS 的空间叠加分析功能, 实现对昌江县地质灾害易发程度的评价分析。本研究将为昌江县地质灾害预警监测和地质灾害避让搬迁提供依据。

关键词: 地质灾害; 易发性; 评价因子; GIS; 信息量法; 海南省

EVALUATION OF GEOLOGICAL HAZARD SUSCEPTIBILITY BASED ON GIS AND INFORMATION METHOD: A Case Study of Changjiang County, Hainan Province

LI Xin^{1,2}, RUAN Ming^{1,2}, YANG Feng^{1,2}, LIU Chang-zhu^{1,2}, YANG Yong-peng^{1,2}

1. Hainan Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment, Haikou 570206, China;

2. Hainan Institute of Geological Survey, Haikou 570206, China

Abstract: The geological hazards in Changjiang County of Hainan Province are controlled by geological environment conditions and influenced by various external factors. According to the detailed investigation data of geohazards in the area, the controlling conditions and inducing factors of various geohazards are selected as evaluation indexes, and the information analysis model is built by establishing the influencing factor system of geohazards. Through the quantification and normalization for each factor, the analytic hierarchy process (AHP) is used to determine the weight coefficients of evaluation factors, and the ArcGIS spatial overlay analysis to evaluate the geohazard susceptibility in Changjiang County. This study will hopefully provide basis for geohazard early warning-monitoring and avoidance-relocation in the area.

Key words: geological hazard; susceptibility; evaluation factor; GIS; information method; Hainan Province

0 引言

研究区地处海南岛西部, 地貌类型以低山丘陵为

主, 断裂发育, 地质构造复杂。地质灾害主要为崩塌、滑坡、泥石流和不稳定斜坡, 其中崩塌 112 处, 滑坡 10

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-06-08. 编辑: 张哲.

基金项目: 海南省科技厅自然科学基金高层次人才项目“人工填土型滑灾害成灾机制与数值模拟研究”(编号 421RC664、2019RC347); 海南省财政厅“海南地质灾害形成机理研究与监测预警示范”项目(编号 T102656.510).

作者简介: 李信(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害研究, 通信地址 海南省海口市南沙路 66 号, E-mail//491111214@qq.com

通信作者: 杨永鹏(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究, 通信地址 海南省海口市南沙路 66 号, E-mail//yyp_tc@163.com

处,泥石流 3 处,不稳定斜坡 2 处。地质灾害呈线状分布于公路沿线两侧,呈面状分布于居民点、矿山集中区。地质灾害呈现增多态势,严重威胁了当地人民生命财产安全,制约了当地经济发展。

随着地理信息系统(GIS)技术的在地质灾害应用方面的发展,GIS 在地质灾害易发性评价中的应用越来越广泛,为开展以滑坡、泥石流、崩塌、不稳定斜坡为主体的地质灾害易发性的深入研究提供了一个卓有成效的技术平台与研究途径^[1-4]。地质灾害发育和分布特征受地形地貌、工程地质岩组、地质构造、植被覆盖程度影响^[5],本文依靠 GIS 平台对该地区地质灾害发育的地质条件及诱发因素进行统计分析,在此基础上建立适当的评价模型对海南省昌江县的地质灾害易发性进行研究。

1 研究方法

首先建立地质灾害易发性评估指标体系,建立信息量分析模型;然后计算各层元素的组合权重,利用 ArcGIS 空间分析中的栅格计算对各评价因子加权叠加,构建研究区地质灾害易发性栅格图;最后综合考虑各种影响因素,概化出昌江县地质灾害易发性分区图^[6]。

2 地质灾害易发性评价

2.1 评价因子体系的建立

控制和诱发地质灾害易发程度的因素有多种,其中控制地质灾害发育的内在因素主要为坡度、坡高、海拔高度、河流及植被覆盖率^[7],诱发因素为汛期强台风降雨和人类工程活动两项指标^[8]。

本研究中地质灾害控制因素的选取是在借鉴国内外相关研究成果的基础上,结合研究区内地质灾害的实际情况筛选,通过地质灾害空间分布的地质环境特征分析,并以 GIS 分析工具的可图形化和经济可靠性要求为前提^[6,9-10],建立地质灾害易发性评估指标体系(A)(图 1)。

2.1.1 地质构造(B₁)

断裂(C₁):断裂带在外营力作用下使地层破碎而产生错动、位移,从而控制地质灾害的发育^[11]。昌江县构造断裂发育,地质灾害的发育受其影响较大(如图 2)。

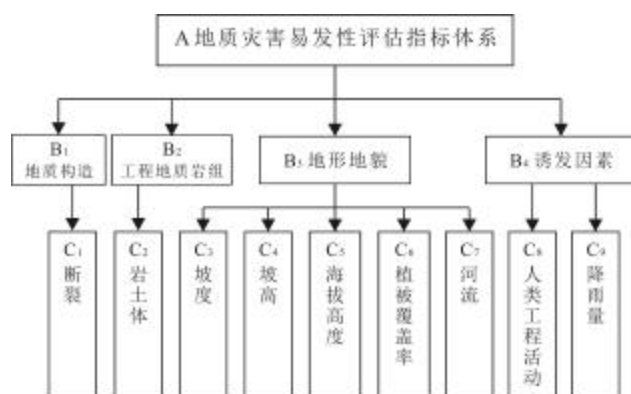


图 1 地质灾害易发评估指标体系图

Fig. 1 Evaluation index system of geohazard susceptibility

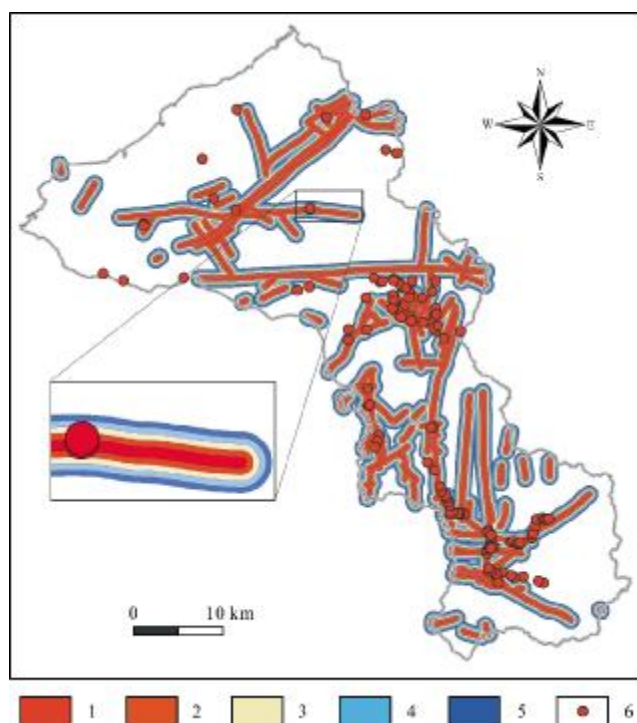


图 2 构造缓冲栅格图

Fig. 2 Buffer grid map of structure

1~5—构造距离(distance from structure): 0~200 m, 200~400 m, 400~600 m, 600~800 m, 800~1000 m; 6—地质灾害点(geohazard site)

2.1.2 工程地质岩组(B₂)

岩土体(C₂):岩土体类型及结构特征对斜坡的变形有显著的控制作用,其岩体结构、破碎和完整程度不相同,形成的地形地貌不同,导致地质灾害的易发程度和灾害种类亦不相同^[12-13](如图 3)。

2.1.3 地形地貌(B₃)

坡度(C₃):斜坡坡度较大的中低山区坡体形成了普遍较大的临空面,崩塌或滑坡体土体剪应力增强,坡

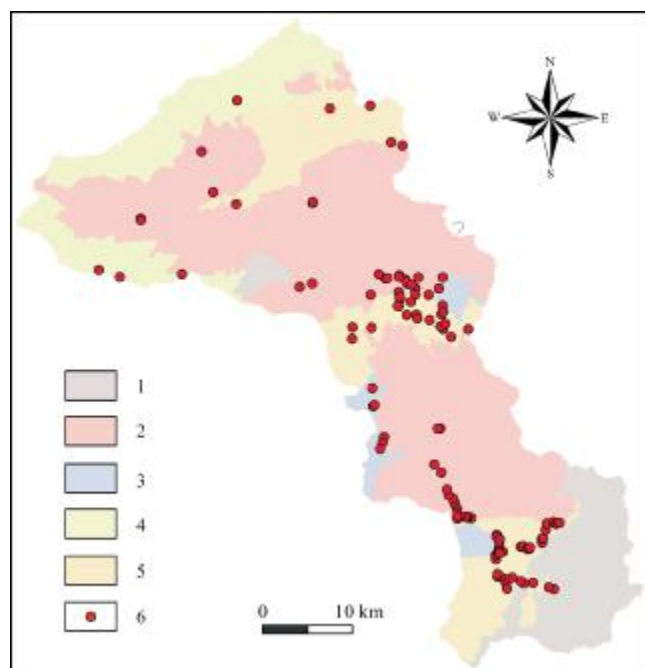


图3 工程岩组栅格图

Fig. 3 Grid map of engineering rock assemblage

1—砂岩夹泥岩组 (sandstone interbedded with mudstone); 2—变质石英砂岩和变质岩组 (metamorphic quartz sandstone and metamorphic rock); 3—花岗岩岩组 (granite series); 4—变质砂岩和结晶灰岩组 (metamorphic sandstone and crystalline limestone); 5—砾石、砂、黏性土等多层土体 (multi-layer soil body of gravel, sand and clay); 6—地质灾害点 (geohazard site)

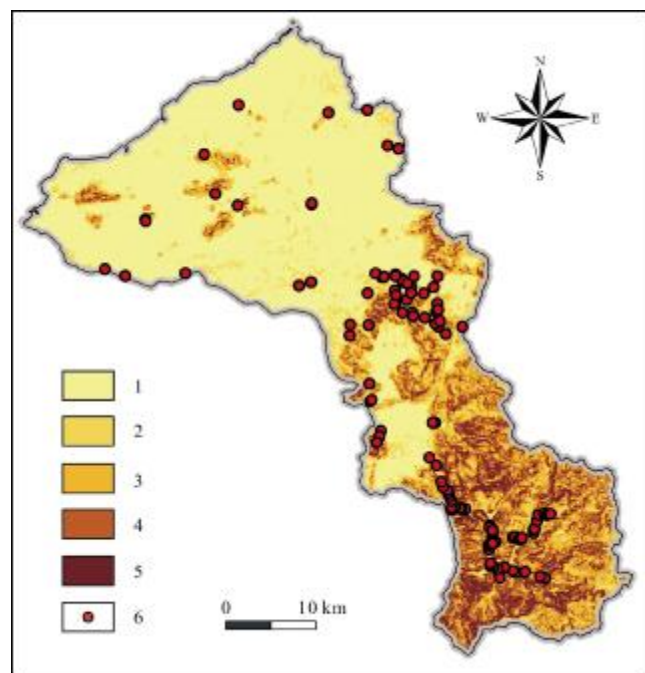


图4 坡度栅格图

Fig. 4 Grid map of slope gradient

1~5—坡度 (slope gradient): 0~15°, 15~35°, 35~55°, 55~75°, 75~90°;
6—地质灾害点 (geohazard site)

面附近岩土所受到重力拉扯作用加大,使得边坡稳定性大大降低^[14](图4)。

坡高(C_4):地质灾害斜坡坡高为坡肩到坡脚的高度,斜坡带对地质灾害具有控制作用,坡高越高,地质灾害发生的可能也越大^[15]。本研究通过GIS的空间分析模块提取地形起伏度图层,用来近似代表坡高指标(如图5)。

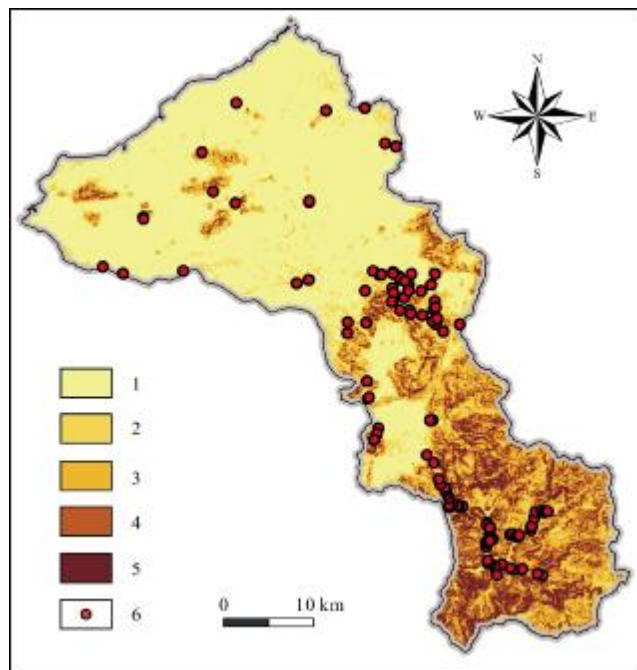


图5 坡高栅格图

Fig. 5 Grid map of slope height

1~5—坡高 (slope height): 0~10 m, 10~30 m, 30~50 m, 50~70 m, >70 m; 6—地质灾害点 (geohazard site)

海拔高度(C_5):一般来说,海拔高度可以从一定程度上反映地貌的变化,灾害的高程与地质灾害的发生有着直接的关系^[16]。通过GIS从数字高程模型(DEM)提取出海拔高度(如图6)。

植被覆盖率(C_6):植被有护坡及保持水土的作用,对斜坡稳定性有利^[17]。利用遥感软件ENVI对昌江县SPOT-5卫星影像校正、拼接后,提取红光波段及红外波段,计算得到归一化植被指数NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中: NIR 为近红外波段的反射值, R 为红光波段的反射值。NDVI 值越大,表示植被覆盖程度越高。根据NDVI灰度值,将研究区的植被覆盖情况划分为5个区域:岩石裸露区、植被较稀疏区、植被稀疏区、植被一

般茂密区和植被茂密区^[18](如图 7)。

河流(C_7):河流对两岸斜坡冲刷、侧蚀、淘蚀,使斜坡体抗剪强度降低,形成裂缝,而使斜坡失去支撑,破坏平衡而引发崩塌、滑坡等地质灾害^[19](如图 8)。

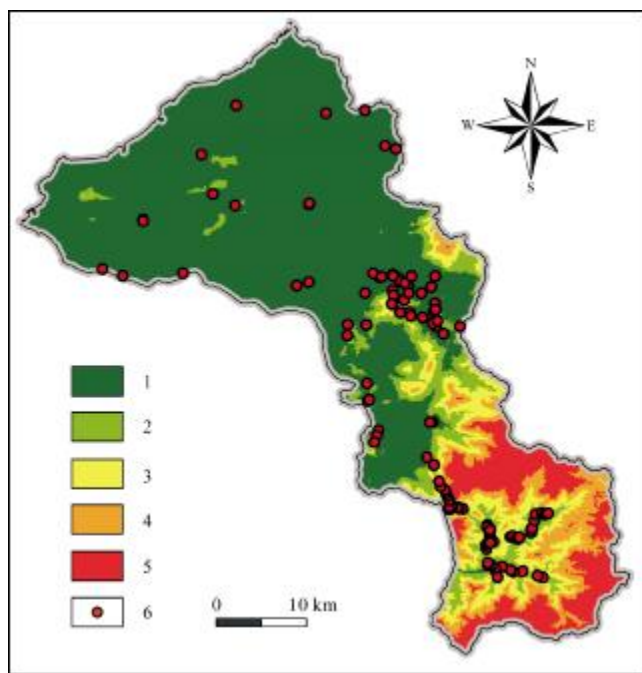


图 6 海拔高度栅格图

Fig. 6 Grid map of altitude

1~5—海拔高度(altitude): < 200 m, 200~400 m, 400~600 m, 600~800 m, > 800 m; 6—地质灾害点(geohazard site)

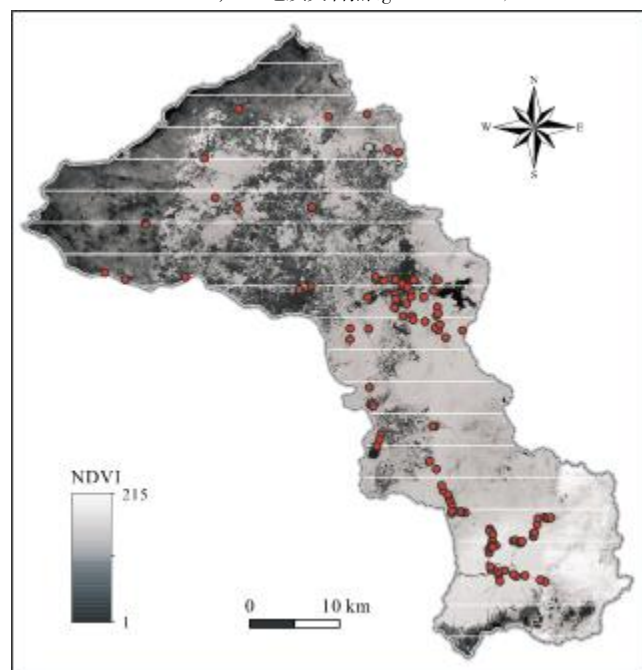


图 7 NDVI 栅格图

Fig. 7 NDVI grid map

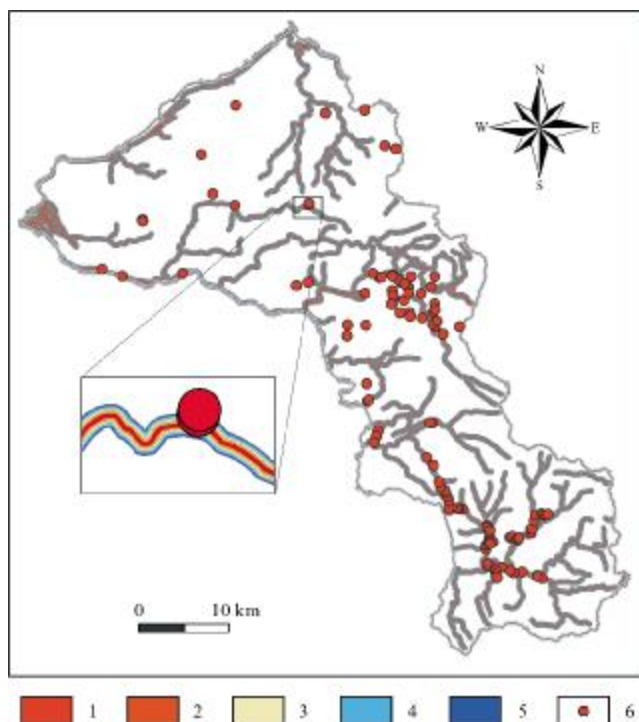


图 8 河流缓冲区栅格图

Fig. 8 Buffer grid map of stream

1~5—河流距离(distance from river): 0~60 m, 60~120 m, 120~180 m, 180~240 m, 240~300 m; 6—地质灾害点(geohazard site)

2.1.4 诱发因素 B_4

人类工程活动(人为因素)(C_8):昌江县主要的人类工程活动为矿山开采和公路建设,而公路、铁路和高速公路开挖形成的高陡边坡是地质灾害重要的诱发因素。在交通工程建设完成之后,其诱发作用便转化为对边坡岩土体条件的影响作用,成为影响边坡稳定性的静态要素之一(图 9)。

降雨量(自然因素)(C_9):降雨是导致地质灾害发生的重要诱发因素之一,一般 7、8、9 三月份连绵雨水以及暴雨往往就伴随着地质灾害的发生(图 10),尤其是海南热带风暴和强台风为引发地质灾害较为活跃的因子。

2.2 权重的确定

2.2.1 建立判断矩阵

本研究采用标度法,对各层中的要素对上一层次目标的相对重要性进行两两比较(表 1—3),建立判断矩阵。

2.2.2 计算被比较元素的相对权重

通过 MATLAB 软件计算 $A-B$ 、 B_3-C 及 B_4-C 判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 并比较元素相对权重。

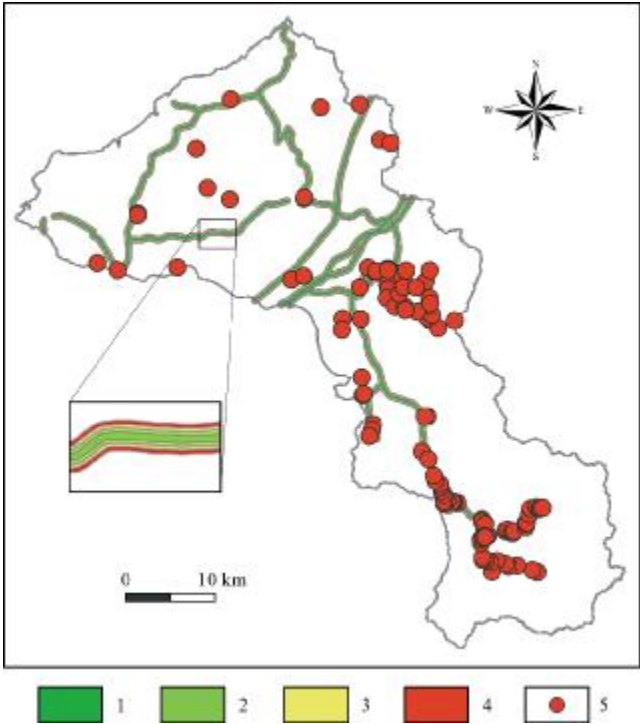


图 9 公路缓冲区栅格图

Fig. 9 Buffer grid map of road

1~5—公路距离(distance from road): 0~20 m, 20~40 m, 40~60 m, 60~80 m; 6—地质灾害点(geohazard site)

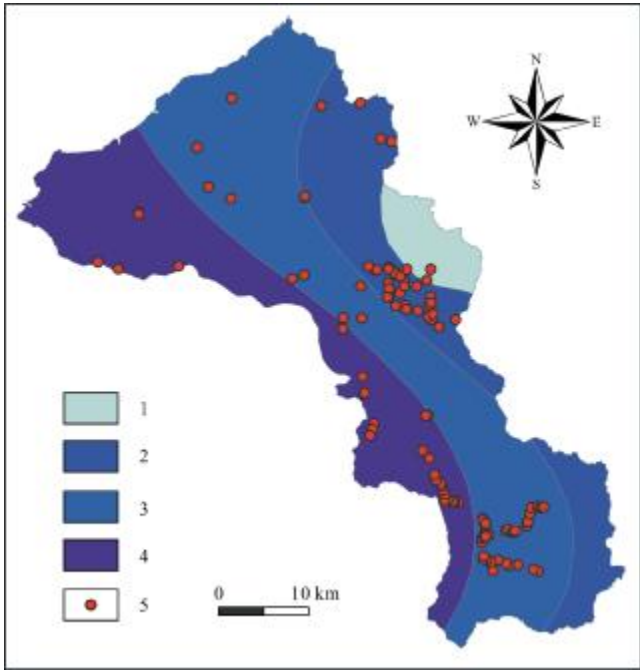


图 10 降雨量栅格图

Fig. 10 Grid map of rainfall

1~4—年均降雨量 (average annual rainfall): 1340~1540 mm, 1140~1340 mm, 940~1140 mm, 740~940 mm; 5—地质灾害点(geohazard site)

表 1 A-B 层判断矩阵

Table 1 Judgment matrix of A-B level

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重
B1	1	1/3	1/5	1/5	0.0687
B2	3	1	1/3	1/3	0.1535
B3	5	3	1	1	0.3889
B4	5	3	1	1	0.3889

表 2 B₃-C 层判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of B₃-C level

B ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	权重
C ₃	1	3	5	7	5	0.4747
C ₄	1/3	1	3	5	5	0.2581
C ₅	1/5	1/3	1	5	3	0.1459
C ₆	1/7	1/5	1/5	1	1/3	0.0420
C ₇	1/5	1/5	1/3	3	1	0.0793

表 3 B₄-C 层判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of B₄-C level

B ₁	C ₈	C ₉	权重
C ₈	1	3	0.75
C ₉	1/3	1	0.25

A-B 判断矩阵 $\lambda_{\max}=4.0439$, 则检验性指标 $CR=0.0163<0.1$. 满足一致性检验,可认为该矩阵具有较好的判断一致性. B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 权重分别为 0.0687、0.1535、0.3889 和 0.3889.

B_3 -C 判断矩阵 $\lambda_{\max}=5.3620$, 则检验性指标 $CR=0.0808<0.1$. 满足一致性检验,可认为该矩阵具有较好的判断一致性. C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 和 C_7 权重分别为 0.4747、0.2581、0.1459、0.0420 和 0.0793.

B_4 -C 判断矩阵 $\lambda_{\max}=2$. 满足一致性检验, 可认为该矩阵具有较好的判断一致性. C_8 和 C_9 权重分别为 0.75 和 0.25.

2.2.3 计算各层元素的组合权重

为了对 A 层地质灾害易发性进行评估,需将 B 层中 B_1 层(地质构造)、 B_2 层(工程地质岩组)、 B_3 层(地形地貌)、 B_4 层(诱发因素)归一化之后的权重在 A 层下再次归一化,得到 C 层中 8 项要素的组合权重(表 4).

表 4 层次元素组合权重
Table 4 Combined weights of elements for each level

层次 C	层次 B-C				层次 C 总权重值
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	
	0.0687	0.1535	0.3889	0.3889	
C ₁	1				0.0687
C ₂		1			0.1535
C ₃			0.4747		0.1846
C ₄			0.2581		0.1004
C ₅			0.1459		0.0568
C ₆			0.0420		0.0163
C ₇			0.0793		0.0308
C ₈				0.75	0.2917
C ₉				0.25	0.0972

对各层中的要素对上一层次目标的相对重要性两两比较,建立判断矩阵,并计算被比较元素的相对权重,确定评价体系中各指标的权重^[6](表 5)。

2.3 信息量分析模型计算

信息量分析模型是通过收集已变形或破坏区域的现实情况和地质灾害影响因素,计算出各影响因素对破坏变形的影响值,作为区划的定量指标^[20]。信息量分析模型不仅可以定量地反映出地质灾害发育规律,而且使用起来简单易行,在地质灾害易发性评价中得到了广泛的应用和推广^[21]。本研究把反映影响区域稳定性因素的实测值转化成信息量值作为易发性区划的定量指标,对地质灾害易发区进行划分。

$$I=\sum_{i=1}^n I(x_i,H)=\sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}$$

式中: I 为评价单元总的信息量值,体现单元破坏的可能性; n 为参评因子数; H 为研究范围内地质灾害数; S 为已知总单元数; N 为变形及破坏的单元总数; S_i 为研究区内指标 x_i 的单元个数; N_i 为指标 x_i 的变形破坏单元个数。当 I 越大,越有利于发生变形破坏,表明地质灾害易发性越大,危险性越大。

$$S=\sum W_i \times I_{ij}=0.0687 \times I_{1j}+0.1535 \times I_{2j}+0.1846 \times I_{3j}+$$

表 5 地质灾害影响因子相对权重表
Table 5 Relative weights of geohazard impact factors

层次	构造 C ₁	岩土体 C ₂	坡度 C ₃	坡高 C ₄	海拔高度 C ₅	植被覆盖率 C ₆	河流 C ₇	工程活动 C ₈	降雨量 C ₉
权重值	0.0687	0.1535	0.1846	0.1004	0.0568	0.0163	0.0308	0.2917	0.0972

$$0.1004 \times I_{4j}+0.0568 \times I_{5j}+0.0163 \times I_{6j}+0.0308 \times I_{7j}+0.2917 \times I_{8j}+0.0972 \times I_{9j}$$

通过统计学中常用的自然断点法将栅格叠加图按信息量重新分类后,信息量值区间分别为 +1.324 983~+0.206 81、+0.20 681~ -0.050 068、-0.050 068~-0.276 724、-0.276 724~ -1.324 98。运用 ArcGIS 中栅格计算工具将各图层的的信息量值乘以层次分析法得到的权重指标后叠加,完成地质灾害易发因子的综合信息量计算,生成地质灾害综合信息量值叠加图(图 11)。

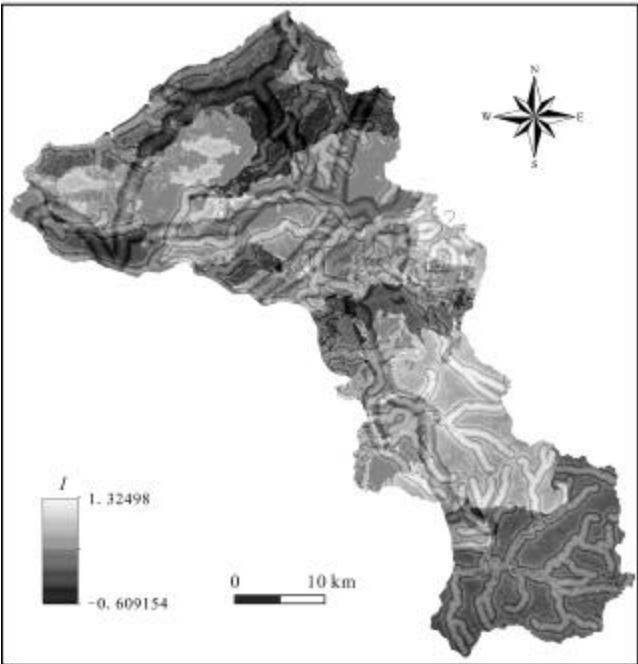


图 11 地质灾害易发性综合信息量图
Fig. 11 Integrated information of geohazard susceptibility

2.4 易发性分区结果

通过空间分析工具中的邻域分析功能,采用 15×15 的正方形进行平滑处理,达到平滑处理的效果。最后,在定量计算分级分区的基础上,综合考虑各种因素,人工勾画出地质灾害易发程度区划图。依据地质灾害易发程度分区结果,将研究区的地质灾害易发性程度划分为 4 级:地质灾害高易发区、地质灾害中易发区、地质灾害低易发区、地质灾害不易发区。其中地质灾害高易发区面积 522.82 km²,占全县面积的 32.23%,

分成 2 个亚区;地质灾害中易发区面积 375.36 km², 占全县面积的 23.14%, 分成 2 个亚区;地质灾害低易发区面积 658.53 km², 占全县面积的 40.6%;地质灾害不易发区面积 64.49 km², 占全县面积的 4.03%(如图 12)。

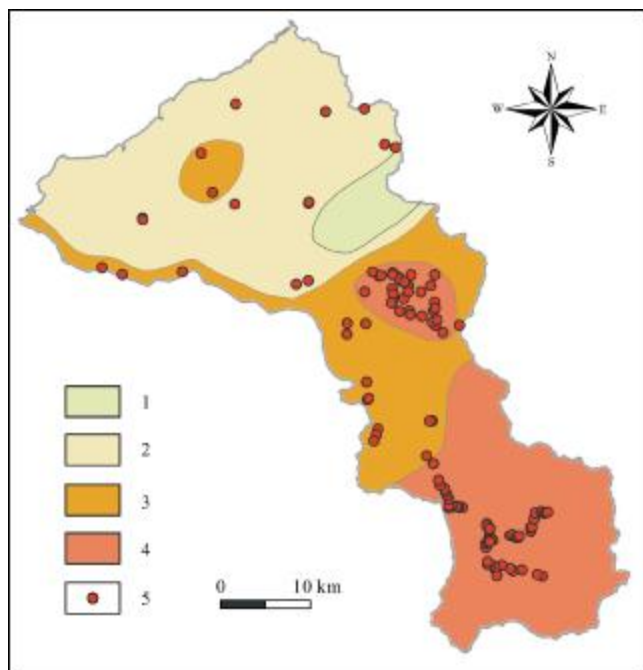


图 12 地质灾害易发性分区图

Fig. 12 Zoning map of geohazard susceptibility

1—不易发区(non-risk area); 2—低易发区(low-risk area); 3—中易发区(medium-risk area); 4—高易发区(high-risk area); 5—地质灾害点(geohazard site)

3 结果与讨论

(1)本研究运用层次分析法建立评价指标体系和信息量模型, 利用标度法确定各指标的权重, 在 ArcGIS 平台上通过叠加量化信息进行计算, 得出昌江县地质灾害易发性分区图。分区结果与地质灾害发育分布特征基本吻合, 因此证明基于 GIS 和信息量模型的地质灾害易发性评价方法是可行的。

(2)本次评价分区的层次分析法与理论推导法、地理相关分析法、主导因素法、专家评价法等定性分析方法相比, 运用了定量与定性相结合的方法。与众多的统计模型, 如多元统计分析模型、数理统计分析模型、概率理论模型等相比, 信息量模型具有更高的客观性和可操作性, 分析结果更加准确。该方法在我国县市地质灾害详细调查中已广泛推广使用, 具有一定的代表性和科学性。

(3)昌江县地质灾害易发性评价及区划结果表明: 地质灾害高易发区面积 522.82 km², 占全县面积的 32.23%; 地质灾害中易发区面积 375.36 km², 占全县面积的 23.14%; 地质灾害低易发区面积 658.53 km², 占全县面积的 40.6%; 地质灾害不易发区面积 64.49 km², 占全县面积的 4.03%。该结果可以作为城乡建设规划的基础依据, 也为昌江县地质灾害避让搬迁和防治提供依据。

参考文献(References):

- [1] 李信, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 海南昌江县红林农场 26 队泥石流发育特征及成因分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(1): 3-9.
Li X, Xue G C, Liu C Z, et al. Development characteristics and genesis analysis of debris flow in Team 26 of Honglin Farm, Changjiang County, Hainan Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2019, 30(1): 3-9.
- [2] 孟祥瑞, 裴向军, 刘清华, 等. GIS 支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 106-115.
Meng X R, Pei X J, Liu Q H, et al. GIS-based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 106-115.
- [3] 杨德宏, 范文. 基于 ArcGIS 的地质灾害易发性分区评价——以旬阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 82-86, 93.
Yang D H, Fan W. Zoning of probable occurrence level of geological disasters based on ArcGIS: A case of Xunyang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 82-86, 93.
- [4] 许晓霞, 张福平, 王有林, 等. 基于 GIS 和 RS 的舟曲县地质灾害易发性评价[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(6): 26-31.
Xu X X, Zhang F P, Wang Y L, et al. GIS and RS-based evaluation of the geological hazard susceptibility in Zhouqu County [J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(6): 26-31.
- [5] 朱小龙, 马百衡, 张万喜, 等. 河北张家口地区主要致灾因子及其对地质灾害分布的控制与影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 103-107.
Zhu X L, Ma B H, Zhang W X, et al. The factors controlling and influencing the distribution of geological hazards in Zhangjiakou, Hebei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 103-107.
- [6] 覃茂刚, 王康国, 王勇. 基于信息量层次分析法在海南琼海市地质灾害易发性分区中的应用[J]. 矿产勘查, 2018, 9(7): 1450-1454.
Qin M G, Wang K G, Wang Y. Incidental geological hazard zoning in Qionghai City based on information quantity analytical hierarchy process, Hainan [J]. Mineral Exploration, 2018, 9(7): 1450-1454.

- [7]赵帅, 赵洲. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价[J]. 水力发电, 2019, 45(3): 27-32.
- Zhao S, Zhao Z. Geological hazard risk assessment based on information quantity model[J]. Water Power, 2019, 45(3): 27-32.
- [8]沈开俊, 刘严松. 四川通江县地质灾害特征及影响因素分析[J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 465-467, 481.
- Shen K J, Liu Y S. Geological hazards and their influence factors in Tongjiang, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, 30(4): 465-467, 481.
- [9]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(2): 67-76.
- Deng H, He Z W, Chen Y, 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(2): 67-76.
- [10]杨峰, 陈毅, 李信, 等. 基于 GIS 技术的海南省白沙县地质灾害易发性区划研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(4): 87-89, 101.
- Yang F, Chen Y, Li X, et al. Study on the geological hazardous vulnerable zoning of Baisha County in Hainan Province based on GIS technology [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017, 28(4): 87-89, 101.
- [11]谢吉尊, 冯文凯, 杨少帅, 等. 则木河断裂带活动特征和地质灾害对地貌演化的影响——以鹅掌河流域为例[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 772-783.
- Xie J Z, Feng W K, Yang S S, et al. Active characteristics and geohazard of Zemuhe fault and their influence on morphological evolution in Ezhang River[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 772-783.
- [12]李宗发. 贵州构造-岩土体分区及其与地质灾害形成的关系[J]. 贵州科学, 2012, 30(3): 32-37.
- Li Z F. Zoning of structure and rock-soil mass in Guizhou and relations with the formation of geological disaster[J]. Guizhou Science, 2012, 30(3): 32-37.
- [13]陈毅, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 海南省保亭县地质灾害易发程度区划[J]. 地质与资源, 2017, 26(2): 165-170.
- Chen Y, Xue G C, Liu C Z, et al. Zoning of probable occurrence levels of geological hazards in Baoting County, Hainan Province[J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 165-170.
- [14]方琼, 段中满. 湖南省地形地貌与地质灾害分布关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 83-88.
- Fang Q, Duan Z M. Distribution analysis of topography and geological hazards in Hunan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 83-88.
- [15]金福喜, 罗滔, 李杰. 湘东南某市地形地貌对地质灾害发育规律的控制作用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 115-118.
- Jin F X, Luo T, Li J. The analysis of the control action of geography of the development rule of geological hazard in a city of the south-east of Hunan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 115-118.
- [16]刘仪. 基于 GIS 和目标层次分析法的地质灾害评价研究——以永嘉县为例[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- Liu Y. Study on geological hazard assessment based on GIS and target analytic hierarchy process: A case study of Yongjia County[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [17]何玉琼. 植被发育斜坡的稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- He Y Q. Research on the stability of well vegetated slopes[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [18]邓茂林, 许强, 韩蓓, 等. 降雨条件下河流冲刷型滑坡的基本特征及滑动机制分析——以四川宣汉樊哙大桥滑坡为例[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 62-67.
- Deng M L, Xu Q, Han B, et al. Analysis of the basic characteristics and formation mechanism of river erosion-type landslides under rainfall conditions as exemplified by Fankuai Daqiao landslide in Xuanhan, Sichuan Province[J]. Earth and Environment, 2014, 42(1): 62-67.
- [19]孙成永. 河南省罗山县主要河流岸坡稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Sun C Y. Investigation and evaluation of riverbank-stability in Luoshan County[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2018.
- [20]李程. 陕西省太白县地质灾害危险性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Li C. Hazard assessment of geological disasters in Taibai County, Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2011.
- [21]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.
- Ruan S Y, Huang R Q. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(1): 89-92.