

陈露军, 卢应发, 鲁培培. 基于信息量法-AHP组合模型的十堰经开区地质灾害危险性评价[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(4): 53-60. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.007

CHEN L J, LU Y F, LU P P. Risk Assessment of Geological Hazards in Shiyan Economic Development Zone Based on Information Quantity Method and AHP Combined Model[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 53-60. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.007

基于信息量法-AHP组合模型的十堰经开区 地质灾害危险性评价

陈露军¹, 卢应发^{1*}, 鲁培培²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北正源工程技术有限公司, 湖北 十堰 442000)

摘要: 以十堰经开区为研究区, 选择地质构造、工程地质岩组、距水系距离、坡度、坡型、坡高和植被覆盖率等作为评价研究区的敏感性指标, 在滑坡崩塌灾害易发性评价的基础上综合考虑地质灾害形成的诱发因素(降雨、人类工程活动), 采用信息量法-AHP组合模型求得各个评价因子权重乘以对应因子信息量的值, 基于ArcGIS软件的空间分析叠加功能得到经开区地质灾害危险性区划图。结果表明: 基于信息量法-AHP组合模型下的危险性评价的准确性明显高于单一赋权模型; 极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区的面积分别占研究区面积的8.45%, 26.23%, 30.57%, 34.75%, 极高危险区和高危险区主要分布在降雨量为880~920 mm、距水系距离近及人类工程活动强度大的区域。研究成果可为治理该区滑坡崩塌地质灾害提供一定的参考。

关键词: 地质灾害; 信息量法; AHP; ArcGIS; 危险性评价

中图分类号: TV122 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)04-0053-08

Risk Assessment of Geological Hazards in Shiyan Economic Development Zone Based on Information Quantity Method and AHP Combined Model

CHEN Lujun¹, LU Yingfa¹, LU Peipei²

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Zhengyuan Engineering Technology Co., Ltd., Shiyan 442000, China)

Abstract: The risk assessment of regional geological disasters is an important part of the prevention and control of geological disasters. Taking Shiyan Economic Development Zone as the research area, this paper selects geological structure, engineering geological rock group, distance from water system, slope, slope type, slope height, and vegetation coverage rate as the sensitivity indicators for evaluation of the research area. On the basis of landslide and collapse hazard susceptibility evaluation, the inducing factors (rainfall, human engineering activities) for formation of geological disasters are comprehensively considered, the combination model of information quantity method and AHP is used to obtain the weight of each evaluation factor multiplied by the information quantity of the corresponding factor. Based on the spatial analysis and superposition function of

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41641027; 42071264); 三峡后续工作地质灾害防治项目资助(0001212015CC60005)

* 通信作者, E-mail: lyf77@126.com

ArcGIS software, the geological disaster risk zoning map of ETDZ is obtained. Results show that the accuracy of risk assessment based on the combination of information method and AHP is significantly higher than that of the single weighting model. The subarea of extremely high risk area, high risk area, medium risk area and low risk area respectively accounts for 8.45%, 26.23%, 30.57% and 34.75% of the study area, respectively. The extremely high risk area and high risk area are mainly distributed in the area with 880~920 mm rainfall, close to the water system and high intensity of human engineering activities. The research results can provide some scientific basis for the effective control of landslide and collapse geological disasters in this area.

Keywords: geological disaster; information quantity method; AHP; ArcGIS; risk assessment

地质灾害风险评估^[1]的目的是了解在外部因素激励下发生灾害的可能性,在滑坡和崩塌灾害易发性评价的基础上,综合考虑地质灾害形成的诱发因素,采用专家打分法确定各评价指标的权重,通过加权叠加分别得到滑坡和崩塌的危险性指数,利用 ArcGIS 软件的空间分析功能和栅格计算器将易发性评价中的 7 个评价因子与降雨、人类工程活动等因子进行加权叠加,再采用自然断点法将结果划分为极高、高、中和低危险性 4 个危险等级。

目前,常用的危险性评价方法有层次分析法(AHP)、信息量法、确定系数法、逻辑回归、神经网络法、支持向量法和最大熵模型等^[2-9],评价模型从单一到定性、定性到定量以及定性定量组合变换.综合各种评估方法和相应模型的优缺点,可以有效提高风险评估的精确性,因此,采用不同评价方法组合以及结合 ArcGIS 技术对地质灾害进行危险性评价成为研究的重点.李栋等^[10]采用 AHP 确定相关因子权重,并基于 GIS 空间分析叠加功能得到吕梁地区山洪灾害风险分布图;孙冉等^[11]采用 AHP-信息量法模型对费县进行地质灾害风险性评价,确定各分级影响因子权重并采用 ArcGIS 平台进行风险性评价;唐亚明等^[12]采用具体的研究案例进行易发性评价、危险性评价以及风险评价,详细说明三者之间的联系与区划;秦红富等^[13]以云南省某自治县为研究区,选取与灾害点相对密度较高的评价因子,借助 GIS 技术,采用确定性系数法和 Logistic 回归模型组合,以滑坡和崩塌为研究对象对地质灾害的易发性进行评价;李永红等^[14]利用地质灾害影响因子综合指数法进行地质灾害易发程度分区评价,根据地质灾害发生区域的易发程度及灾情隐患点将其空间叠加,得到不同程度的危险区划;杨康等^[15]利用 AHP-LR 的熵组合模型求得各类评价因子权重,再将各类评价因子权重值乘以对应因子层中的信息量值,在 ArcGIS 平台中对各类评价因子栅格图层进行叠加分级处理并对评价结果进行精度检验.综合以上评价方法可知:多种方法组合模型比单一的评价手段更为精确可靠。

因此,本文以十堰经开区为研究区,基于信息量法-AHP 组合模型,利用 ArcGIS 软件的空间分析功能,以滑坡崩塌为主要地质灾害类型进行区域性的危险评价,为防灾减灾、地质灾害危险预测等工作提供参考。

1 研究区概况

十堰经开区地处湖北省十堰市城区东部,位于武当山的西北麓,属秦岭、大巴山的东延余脉,地理坐标东经 110°49'~110°56',北纬 32°26'~32°30',总面积为 45.33 km².研究区的地形地貌受地质构造及岩性的控制,地势呈现南高北低中间凹的特点.研究区位于新华夏系第三隆起带,以浅至中等变质为主,表现为片理发育.区内出露地层由新至老主要为第四系、元古界武当山群,伴有岩浆岩侵入.侵入岩为下古生代侵入的岩浆岩,分散分布于调查区,多为脉状及顺层贯入的小型侵入体.地质构造活动频繁,断裂发育形成纵横交错的构造网络.区内交通便利,地表水为大气降水形成的间歇性地表积水.地处中纬度地区,属亚热带季风气候,平均年降雨量为 769.6 mm,降雨多集中在每年的 6 月—9 月,降雨量达 200 mm,占全年降雨量的 59.2%,雨量充沛但分布不均.独特的地形和地质构造导致该区土质疏松,局部暴雨多,水土流失严重,进而频发崩塌滑坡等地质灾害。

2 数据来源与评价指标

2.1 数据来源

以湖北省地质环境综合信息平台数据(截至 2021 年底)为基础,详查十堰市 1:50 万地质图,1:5 万地形图和遥感地质图.利用地形图生成 DEM 数据高程模型(分辨率 25 m×25 m),结合 DEM 数据和 ArcGIS 软件生成坡度、坡向、坡高等评价指标,并从中国气象网获取近 5 年区内 20 个典型降雨站点数据.本次地质灾害风险普查共调查滑坡、崩塌等地灾隐患点 42 处,其中,崩塌隐患点 22 处,占地质灾害总数的 52.38%;滑坡隐患点 20 处,占地质灾害总数的 47.62%.地质灾害隐患点分布特征如图 1 所示.

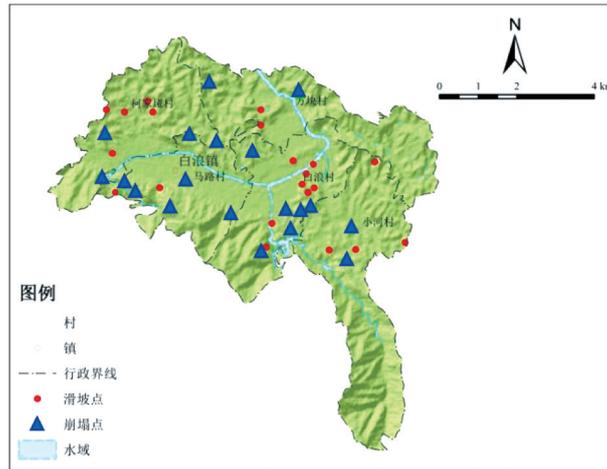


图 1 十堰经开区地质灾害隐患点分布特征

对地质灾害形成的条件、结构和状态进行分析,将自然条件和人类活动影响下的灾害防治作为地质灾害评估的主要任务.由于地质灾害的发生并不是受单一诱因的影响,因此,地质灾害的评价要考虑多种影响因素才能保障危险性评价结构的准确性.选择地质构造、工程地质岩组、距水系距离、坡度、坡向、坡高和植被覆盖率等作为评价研究区的敏感性指标,在滑坡崩塌灾害易发性评价的基础上,综合考虑地质灾害形成的诱发因素(降雨、人类工程活动)等 9 个具有代表性及影响较大的因子作为本次危险性评价的指标,地质灾害危险性评价指标体系如图 2 所示.

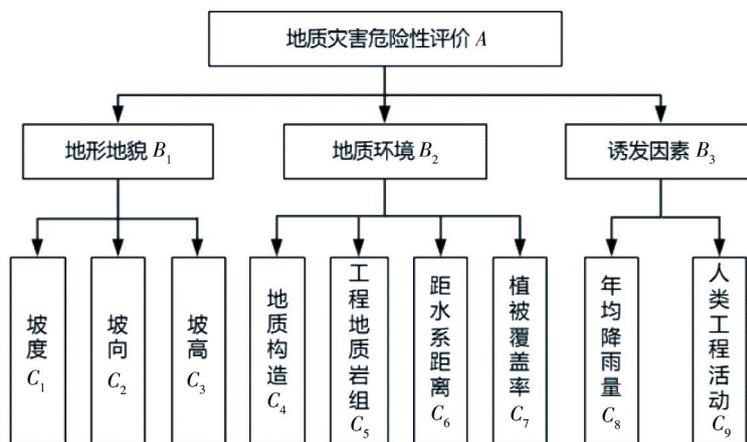


图 2 地质灾害危险性评价指标体系

2.2 评价指标

利用栅格计算器将 9 个危险性评价指标按照不同划分进行赋值,重分类之后生成单因素地质灾害危险性分区图如图 3 所示.

1) 坡度

坡度作为主要的地形指数,决定斜坡体应力的方向和大小,且沿斜坡面方向的自重应力与坡度成正比.坡度影响坡体地表径流及岩土体等物质的移动速度,进而影响斜坡土体的稳定性.因此,利用 ArcGIS 从 DEM 数据中提取坡度信息,根据研究区的地形坡度情况,将研究区的地形坡度划分为 $\leq 5^\circ$, $5^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 35^\circ$, $>35^\circ$ (图 3a).

2) 坡向

不同坡向对应的斜坡所接受的太阳光辐射强度和日照时长不同,因此,对地质灾害的影响程度也不同,可利用 ArcGIS 平台中 ArcToolbox 的坡向功能,将研究区坡向划分为平面、北、东、南和西(图 3b).

3) 坡高

坡高对斜坡的稳定性具有控制性的作用,决定坡体势能及滑动能量的大小.随着坡高的增加,斜坡很容易发育为滑坡,而崩塌在坡高较低时发生的概率较大.因此,坡高也是风险普查中的一个关键因素.本文利用 ArcGIS 平台从 DEM 数据中提取调查区的坡高信息.根据研究区的地形情况将研究区的坡高划分为 < 180 m, $180 \sim 230$ m, $230 \sim 330$ m, >330 m(图 3c).

4) 工程地质岩组

由于内部成分和结构的不同,各岩体及土体表现出不同的工程地质特征,其抗风化、抗腐蚀和抗滑力等特性也有很大差异.不同类型的斜坡体决定了边坡变形破坏的规模、模式和成因机制.根据研究区地层的岩性差别,将研究区划分为较坚硬-厚层状变粒岩岩组、较硬块状侵入岩岩组、较弱薄层状岩组和第四系松散松软土体类岩组(图 3d).

5) 地质构造

在地质灾害中,构造作用是促进地质灾害发生的重要因素,它直接控制区域的地质灾害.因此,地质构造发育的区域往往是地质灾害集中的区域.由于研究区是地质构造发育和地质灾害活动活跃的集中区,地震的频繁发生促进了地质灾害的发生.本文对其一定范围的缓冲进行分析,将研究区按照断层距离由近及远划分为 ≤ 150 m, $150 \sim 500$ m, >500 m(图 3e).

6) 距水系距离

河流一般位于坡体前缘坡脚处,主要对前缘起到侵蚀作用,前缘阻力明显减弱会增加坡体的临空面,进而导致坡体的稳定性破坏.利用 ArcGIS 工具箱中的多环缓冲区功能对水系建立相应的缓冲区分析,按照距河流远近划分为 <200 m, $200 \sim 400$ m, $400 \sim 600$ m, >600 m(图 3f).

7) 植被覆盖率

植被具有保持水土和稳定岩土结构的功能,当区域的植被被破坏时,土质就会疏松,岩石容易被风化,同时滑坡、泥石流等灾害会更容易发生.植被覆盖越好,地质结构越完整,越不易被破坏.本文的 Landsat 8 遥感数据来源于地理空间数据云,将下载的 Landsat 8 遥感影像进行拼接、裁剪、预处理后得到十堰经开区的遥感影像.根据遥感解译,按照裸地($<10\%$)、低植被覆盖区($10\% \sim 30\%$)、中植被覆盖区($30\% \sim 60\%$)、高植被覆盖区($\geq 60\%$)进行分级(图 3g).

8) 年均降雨量

统计得知灾情主要集中在 2012 年—2017 年,每年 4 月—9 月是滑坡地质灾害的频发高峰期,该时段内发生灾情的地质灾害点有 25 处.通过对地质灾害的诱发因素进行分析,可知灾情的发生与降雨量集中分布等因素有较大关系,十堰经开区的年均降雨量主要集中分布在北部方块村和东部小河村附近,将其进行归一化处理得到年均降雨量分布(图 3h).

9) 人类工程活动

研究区内的人类工程活动强烈,集镇建设过程中的山体开挖形成多处人工边坡,改变了区内斜坡的稳定性,特别是坡脚切坡(建房或修路)改变原始坡形,扰动坡体,使斜坡坡脚后缩,在前缘形成的高陡临空面为滑坡的滑移剪出提供了有利的地形与空间条件,也诱发和加剧地质灾害的发生.通过遥感解译资料将研究区分为人类工程活动弱、人类工程活动较强、人类工程活动强这 3 类(图 3i).

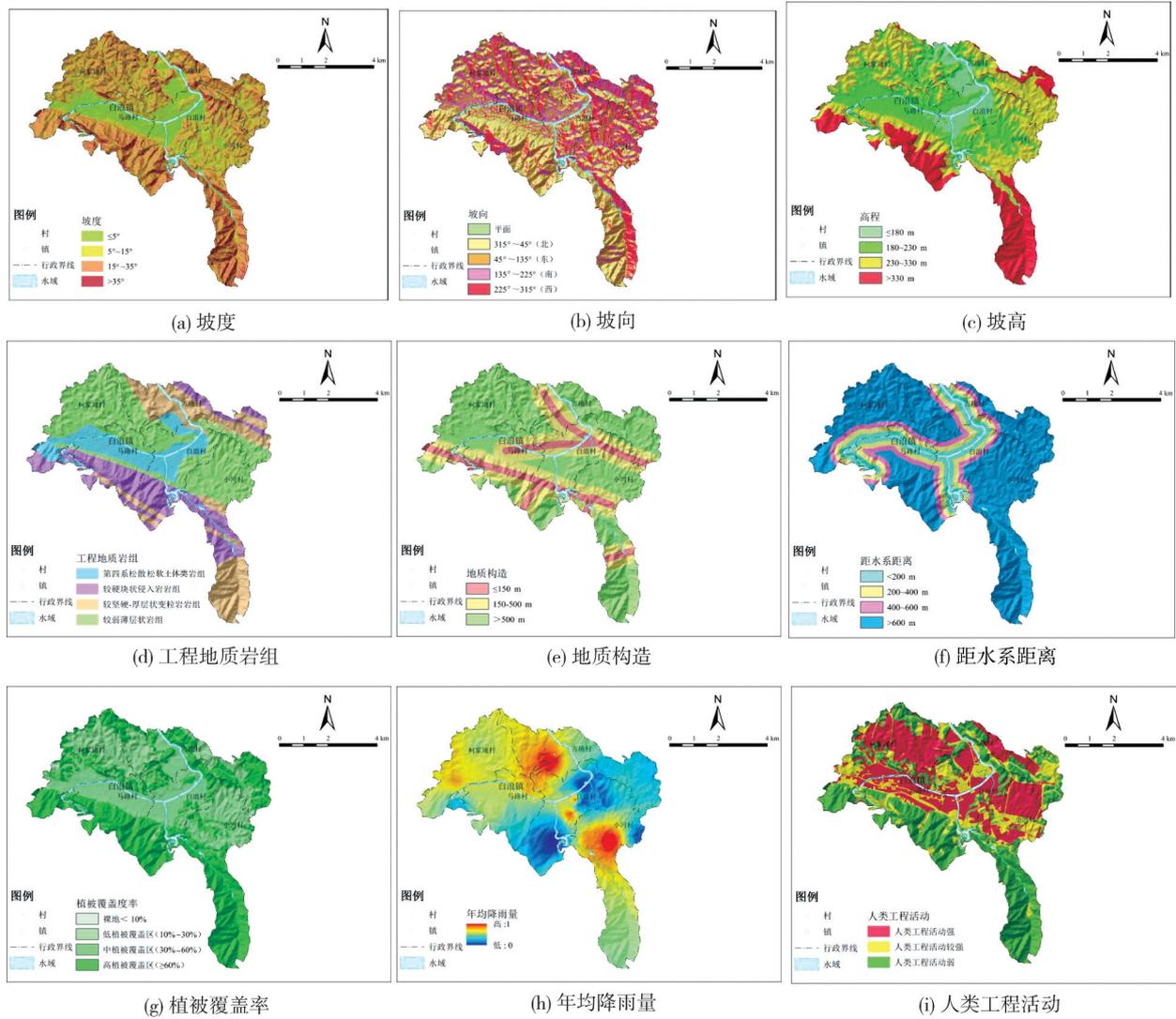


图 3 地质灾害危险性评价因子

3 研究方法

3.1 信息量法

对于某一具体的地质灾害点而言,综合信息量模型考虑的是特定区域内所有地质灾害信息的数量和质量.而每个评价单元受多个因素的影响,每个因素具有多重状态,当各个状态的因素组合时,地质灾害的总信息量可以通过式(1)进行计算.

$$I = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{M_i/M} \tag{1}$$

式中: I 为信息量,表示该评价单元产生地质灾害的可能性,信息量值的大小直接关系到该指标的权重大小; N_i 为某一指标因子在第*i*区间发生的地质灾害点数; M_i 为某一指标因子在第*i*区间的分布面积; N 为工作区发生的地质灾害总数; M 为工作区总面积.

3.2 层次分析法

1) 选取评价因子,建立层次结构模型

设 A 为地质灾害危险评价指标,其影响因素设为 $B_i(i=1, 2, 3)$,具体影响因子设为 $C_i(i=1, 2, \dots, 9)$,根据危险性评价目标及上下各层次与各因素之间的隶属关系,建立层次结构模型.

2) 构造判断矩阵,确定权重

根据各因子影响程度的不同,采用 1~9 标度法构造判断矩阵并计算权重.通过 MATLAB 软件计算最

大特征根 λ_{\max} 及相应的特征向量,然后根据式(2)和式(3)检验一致性.

$$V_{CR} = \frac{V_{CI}}{V_{RI}}; \quad (2)$$

$$V_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (3)$$

式中: V_{CR} 为一致性比例; V_{CI} 为一致性指标; V_{RI} 为平均随机一致性指标(根据 1~9 标度表得出). 当 $V_{CR} < 0.1$ 时,认为判断矩阵一致性可接受,评价因子的权重分配较合理.一致性检验通过后,将 λ_{\max} 对应的特征向量进行归一化,获得每个指标的权重值 ω_i ,最后得到 9 个评价因子构成的判断矩阵及权重值如表 1 所示.经计算, $V_{CI} = 0.050 2$, $V_{CR} = 0.033 7 < 0.1$,表明判断矩阵具有一致性.

表 1 评价因子层次排序及各因子权重

评价因子	C_5	C_8	C_9	C_1	C_3	C_4	C_2	C_7	C_6	ω_i
C_5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0.312 1
C_8	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	0.222 3
C_9	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	0.155 5
C_1	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	0.107 5
C_3	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	0.073 9
C_4	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	0.050 7
C_2	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	0.035 0
C_7	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0.024 7
C_6	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.018 3

3.3 加权信息量模型

将信息量法和层次分析法结合起来,用信息量法计算每个因子分类的信息量,然后用层次分析法计算每个因子各自的权重,再根据式(4)得到加权信息量.

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

式中: I_i 为对应各因子的信息量; S_i 为分级栅格数.

最终得到地质灾害危险性评价因子的加权信息量如表 2 所示.

表 2 地质灾害危险性评价因子加权信息量

评级因子	分级	S_i	S	N_i	N	信息量	权重	加权信息量
坡高/m	<180	40 819	0.090 1	2	0.047 6	-0.637 1	0.073 9	-0.047 1
	180~230	149 749	0.330 3	14	0.333 3	0.009 0	0.073 9	0.000 7
	230~330	164 324	0.362 5	24	0.571 4	0.454 8	0.073 9	0.033 6
	>330	98 414	0.217 1	2	0.047 7	-1.517 1	0.073 9	-0.112 1
坡度/(°)	<5	79 415	0.177 1	2	0.047 6	-1.313 4	0.107 5	-0.141 2
	5~15	146 479	0.326 6	17	0.404 8	0.214 5	0.107 5	0.023 1
	15~35	203 861	0.454 6	21	0.500 0	0.095 3	0.107 5	0.010 2
	>35	18 713	0.041 7	2	0.047 6	0.132 1	0.107 5	0.014 2
坡向/(°)	315~45(北)	126 816	0.284 7	17	0.404 8	0.351 9	0.035 0	0.012 3
	45~135(东)	115 306	0.258 8	11	0.261 9	0.011 7	0.035 0	0.000 4
	135~225(南)	95 347	0.214 1	8	0.190 4	-0.116 6	0.035 0	-0.004 1
	225~315(西)	107 994	0.242 4	6	0.142 9	-0.528 9	0.035 0	-0.018 5
地质构造/m	≤150	61 194	0.135 0	9	0.214 3	0.462 1	0.050 7	0.023 4
	150~500	127 352	0.280 9	12	0.285 7	0.016 9	0.050 7	0.000 8
	>500	264 775	0.584 1	21	0.500 0	-0.155 4	0.050 7	-0.007 9
工程地质岩组	较坚硬-厚层状变粒岩岩组	103 152	0.227 5	5	0.119 1	-0.647 9	0.312 1	-0.202 2
	较硬块状侵入岩岩组	96 736	0.213 4	10	0.238 1	0.109 4	0.312 1	0.034 2
	较弱薄层状岩组	187 607	0.413 9	22	0.523 7	0.235 5	0.312 1	0.073 5
	第四系松散松软土体类岩组	65 780	0.145 2	5	0.119 1	-0.198 1	0.312 1	-0.061 8

续表 2

评级因子	分级	S_i	S	N_i	N	信息量	权重	加权信息量
距水系距离/m	<200	53 549	0.118 1	8	0.190 5	0.477 8	0.018 3	0.008 7
	200~400	50 656	0.111 7	4	0.095 2	-0.159 8	0.018 3	-0.002 9
	400~600	48 243	0.106 5	9	0.214 3	0.699 9	0.018 3	0.012 8
	>600	300 873	0.663 7	21	0.500 0	-0.283 2	0.018 3	-0.005 2
植被覆盖率/%	<10	11 794	0.026 1	1	0.023 8	-0.088 6	0.024 7	-0.002 2
	10~30	200 514	0.442 3	15	0.357 1	-0.213 9	0.024 7	-0.005 3
	30~60	21 046	0.046 4	2	0.047 6	0.025 4	0.024 7	0.000 6
	>60	219 967	0.485 2	24	0.571 4	0.163 5	0.024 7	0.004 0
年均降雨量/mm	<880	27 849	0.061 4	4	0.095 2	0.438 4	0.222 3	0.097 5
	880~920	280 567	0.618 9	29	0.690 5	0.109 4	0.222 3	0.024 3
	>920	144 881	0.319 6	9	0.214 3	-0.399 8	0.222 3	-0.088 9
人类工程活动	强	150 816	0.346 5	12	0.285 7	-0.192 9	0.155 5	-0.029 9
	较强	102 840	0.236 3	17	0.428 6	0.595 5	0.155 5	0.092 6
	弱	181 608	0.417 2	13	0.309 6	-0.298 6	0.155 5	-0.046 4

4 评价结果

危险性评价结果如图 4 所示.基于 ArcGIS 软件的空间分析功能,利用栅格计算器将 9 个评价因子按照表 2 进行加权叠加.通过加权叠加分别得到滑坡和崩塌的危险性指数,按照 25 m×25 m 的分辨率采用要素转栅格功能转换成栅格图层,然后采用自然断点法对计算结果进行重分类,将结果按数值高低划分为极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区(图 4a,图 4b).根据滑坡和崩塌灾害的危险性分区结果,采用就高原则进行图层空间叠加,其中数值越大对地质灾害发生的贡献率就越大.在定量分析的基础上,综合考虑十堰经开区的实际情况进行人工修正,采用自然断点法对计算结果进行重分类,分为低危险区、中危险区、高危险区和极高危险区,最终确定十堰经开区的地质灾害危险分区图(图 4c).

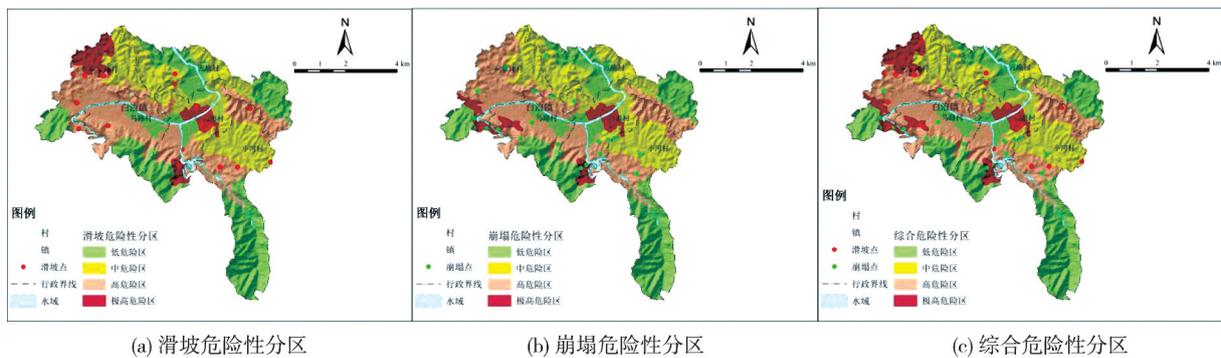


图 4 危险性评价结果

借助 ArcGIS 软件,统计计算得到各个危险性区的面积,其中极高危险区面积为 3.83 km²,占总面积的 8.45%,主要分布在柯家垭村北西部、马路村西部街道沿线、白浪村中部及南部;高危险区面积为 11.89 km²,占总面积的 26.23%,主要分布在柯家垭村-马路村-白浪村-小河村中部沿线,方块村-白浪村-小河村交界处;中危险区面积为 13.86 km²,占总面积的 30.57%,主要分布在柯家垭村、方块村、白浪村和小河村的工业园区建设地带;低危险区面积为 15.75 km²,占总面积的 34.75%,主要分布在除极高、高、中危险区的其他区域.研究区地质灾害危险性统计结果如表 3 所示.从评价结果可以发现:随着危险性等级的升高,所占区域的面积相应减小,而灾害点密度相应增大,用信息量法-AHP 组合模型得到的危险性区划与研究区的实际情况一致.

表3 研究区地质灾害危险性统计结果

危险性区划	面积/km ²	占比/%	灾害点个数	灾害点密度/(个/km ²)
极高危险区	3.83	8.45	17	4.43
高危险区	11.89	26.23	14	1.18
中危险区	13.86	30.57	9	0.65
低危险区	15.75	34.75	2	0.13

5 结论

1) 采用9个具有代表性且影响较大的敏感性评价因子作为评价指标,依次为工程地质岩组、年均降雨量、人类工程活动、坡度、坡高、地质构造、坡向、植被覆盖率和距水系距离。采用信息量法-AHP组合模型求得各个评价因子权重乘以对应因子信息量的值,基于ArcGIS软件的空间分析叠加功能得到经开区地质灾害危险性区划图。

2) 极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区的面积分别占研究区总面积的8.45%、26.23%、30.57%、34.75%;极高危险区主要分布在柯家垭村北西部、马路村西部街道沿线、白浪村中部及南部,主要原因是该区域的人类活动强度大,降雨量在880~920 mm,岩性以较弱薄层状岩组为主。

3) 采用信息量法-AHP组合模型的评价结果与实际情况一致,灾害点密度越大,危险程度就越大,符合地质灾害发育的基本特征。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部.地质灾害危险性评估规范: DZ/T 0286—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 孟庆华,孙炜锋,张春山,等.陕西凤县泥石流灾害危险性评估[J].自然灾害学报,2014,23(1):121-131.
- [3] WU Y H, HAN J T, LIU Y H, et al. Metallogenic model of the Shuangjianzishan Ag-Pb-Zn district, Northeast China: revealed from integrated geophysical investigation[J]. Geoscience Frontiers, 2022, 13: 101321.
- [4] WANG S Y, LIN X K, QI X, et al. Landslide susceptibility analysis based on a PSO-DBN prediction model in an earthquake-stricken area[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 912523.
- [5] LIU Y, ZHAO B B, KONG X A. Conventional monitoring methods and improvements in public geohazard monitoring and prevention[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(4): 042034.
- [6] 付树林,梁丽萍,刘延国.基于CF-Logistic模型的雅砻江新龙段地质灾害易发性评价[J].水土保持研究,2021,28(4):404-410.
- [7] 吴季寰,张春山,杨为民,等.基于熵权变异系数融合算法和FLO-2D的朱家沟流域泥石流危险性评价[J].自然灾害学报,2022,31(1):81-91.
- [8] 梁丽萍,刘延国,唐自豪,等.基于加权信息量的地质灾害易发性评价:以四川省泸定县为例[J].水土保持通报,2019,39(6):176-182,321.
- [9] 田丰,张军,冉有华.河西走廊泥石流灾害危险性评价及影响因子分析[J].自然灾害学报,2017,26(3):139-146.
- [10] 李栋,吴博,郑秀清,等.基于AHP和GIS的吕梁地区小流域山洪灾害风险区划[J].水电能源科学,2017,35(7):85-88,96.
- [11] 孙冉,王成都,夏哲兵,等.基于AHP-信息量法的费县地质灾害风险评价[J].环境科学与技术,2015,38(增刊1):430-435.
- [12] 唐亚明,张茂省,李林,等.滑坡易发性危险性风险评价例析[J].水文地质工程地质,2011,38(2):125-129.
- [13] 秦红富,谈树成,施旖奇,等.基于CF-LR组合模型的地质灾害易发性评价:以云南省宁洱哈尼族彝族自治县为例[J].人民长江,2022,53(7):119-127.
- [14] 李永红,向茂西,贺卫中,等.陕西汉中汉台区地质灾害易发性和危险性分区评价[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(3):107-113.
- [15] 杨康,薛喜成,段钊,等.基于AHP-LR熵组合模型的子长市地质灾害危险性评价[J].科学技术与工程,2021,21(27):11551-11560.