

# GIS 支持下基于归一化信息量模型的 地质灾害易发性评价

张云<sup>1</sup>, 资锋<sup>1\*</sup>, 曹运江<sup>1</sup>, 成湘伟<sup>2</sup>, 韩用顺<sup>1</sup>, 唐龙<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南省自然资源事务中心, 湖南 长沙 410007)

**摘要:**以沅陵县为研究区,对地质灾害的发育和分布特征进行定量化分析,基于控制因素与诱发因素,选取高程、坡向、坡度、剖面曲率、岩组、距断层的距离、距道路的距离、距河流的距离、年平均降雨量等 9 个因素作为评价指标,并利用线性函数转换的 Min-Max 归一化算法,将信息量模型(Information quantity model, I 模型)得到的数据进行归一化处理;然后通过 ROC 曲线、灾积比对模型精度进行检验.结果表明:(1)信息量模型和归一化信息量模型的 AUC 值分别为 0.730 和 0.784,归一化处理后的 AUC 值提高了 5.4%;(2)极低易发区至极高易发区的面积分布差异显著,归一化处理后的模型在高易发和极高易发区面积上减少了 428.51 km<sup>2</sup>.归一化处理后的信息量模型具有更高的精准度,研究成果将为该地区地质灾害防治工作提供一种有效的方法.

**关键词:**怀化沅陵;信息量模型;GIS;Min-Max 归一化分析;地质灾害;易发性评价

中图分类号:P694

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)02-0020-09

## Geological Hazard Susceptibility Assessment Based on Normalized Information Model Supported By GIS

ZHANG Yun<sup>1</sup>, ZI Feng<sup>1</sup>, CAO Yunjiang<sup>1</sup>, CHENG Xiangwei<sup>2</sup>, HAN Yongshun<sup>1</sup>, TANG Long<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Taking Yuanling county as the study area, the development and distribution characteristics of geological hazards are quantitatively analyzed. Based on the controlling factors and triggering factors, nine factors such as elevation, aspect, slope, profile curvature, rock group, distance from faults, distance from roads, distance from rivers, and average annual rainfall are selected as evaluation indexes. Min-Max normalization algorithm based on linear function transformation is used to normalize the data obtained from the information quantity model. Finally, the model accuracy is examined by ROC curve and disaster product ratio. Results show first the AUC values of the information quantity model and the normalized information quantity model are 0.730 and 0.784, respectively, and the AUC value is increased by 5.4% after the normalization process. Second, the area distribution from very low susceptibility area to very high susceptibility area is significantly different, the normalized information model reduces the area of high and very high susceptibility zones by 428.51 km<sup>2</sup>. Last, the results show that the normalized information quantity model has a higher accuracy, and the research results provides a more effective method for the prevention and control of geologic hazards in this area.

**Keywords:** Yuanling county of Huaihua prefecture; information quantity model; GIS; Min-Max normalized analysis; geological hazard; susceptibility assessment

地质灾害是一种严重的地质作用或现象,它会对人类生命财产和生态造成巨大的损害<sup>[1]</sup>.沅陵县境内地质灾害频发,截至 2022 年底,因地质灾害死亡 19 人,毁坏房屋 959 间,直接经济损失 3 865.3 万元,潜在威胁人数 8 218 人,潜在经济损失 33 865 万元.沅陵县作为湖南省地质灾害的中高发区之一,有必要根据其地质灾害孕灾条件开展易发性评价<sup>[2]</sup>,这将为当地的地质灾害管理等工作提供有效理论支撑.

地质灾害的易发性评价主要有依赖专家意见的定性评价和基于统计学方法的定量评价 2 种.定性评价属于受主观因素影响较强的评价方法,常需要根据专家意见来进行判断<sup>[3]</sup>;定量评价则属于客观标准的评价方法,它主要有信息量模型<sup>[4-6]</sup>、层次分析法<sup>[7-8]</sup>、模糊综合评判模型<sup>[9]</sup>、随机森林模型<sup>[10]</sup>、加权信息量<sup>[11]</sup>、逻辑回归分析<sup>[12-13]</sup>、人工神经网络<sup>[14]</sup>等.在地质灾害评价中,信息量模型因其可较好地解决影响因素多、模型量化困难等问题<sup>[15]</sup>,现被广泛应用于易发性评价中.如吴常润等<sup>[16]</sup>选取高程、坡度、坡向等 10 个评价因子,运用信息量模型对云南省陇川县进行滑坡易发性评价;TAN 等<sup>[4]</sup>选取坡度、坡向、累计汇水面积、地层岩性等 8 个影响因子,使用信息量模型对重庆涪陵区进行地质灾害易发性评价;孙滨等<sup>[17]</sup>以云南东川的 144 条泥石流数据为样本数据,选取高程、坡度、坡向等 9 个评价因子,采用信息量模型对研究区进行泥石流易发性评价;周萍等<sup>[18]</sup>以四川理县为研究区,从地形地貌、水文条件、人类工程活动等方面选取 11 个评价因子,将信息量模型与机器学习模型相结合进行滑坡易发性评价;刘福臻等<sup>[19]</sup>将随机森林模型与信息量模型相耦合,以西藏自治区工布江达县为研究区,选取地形起伏、土壤类型等 11 项影响因子进行地质灾害易发性评价.虽然诸多学者采用信息量模型进行易发性评价取得了一定的成果,但都较少考虑不同评价因子之间在同一参考体系下的影响趋势.

鉴于此,文章以沅陵县为研究区,运用皮尔逊相关性法对所选评价因子进行相关性检验,引入 Min-Max 归一化处理方法,通过 ArcGIS 软件与信息量模型相结合进行地质灾害易发性评价,最后采用灾积比和 ROC 曲线对模型进行精度检验,以期得到更精准的易发性评价结果,这将为地质灾害的风险防治等工作提供一定的技术参考.

## 1 研究区位置及概况

### 1.1 研究区概况

沅陵县位于湖南省西北部,隶属怀化市,地处武陵山脉东南麓与雪峰山脉北东尾端交会部位,全县总面积 5 852.5 km<sup>2</sup>(如图 1).沅陵县气候属亚热带季风湿润气候区,四季分明,雨水充沛.沅陵县境内水系十分发育,境内河流以沅江为主干,包括大、小溪河 910 条,合计总长 3 888.55 km.地层出露较齐全,除缺失侏罗系上统、三叠系、泥盆系外,自板溪群至第四系皆有出露,县域内土体均属第四系.境内断裂构造发育,地质构造活动强烈,NE 向构造是沅陵境内最主要的构造骨架.

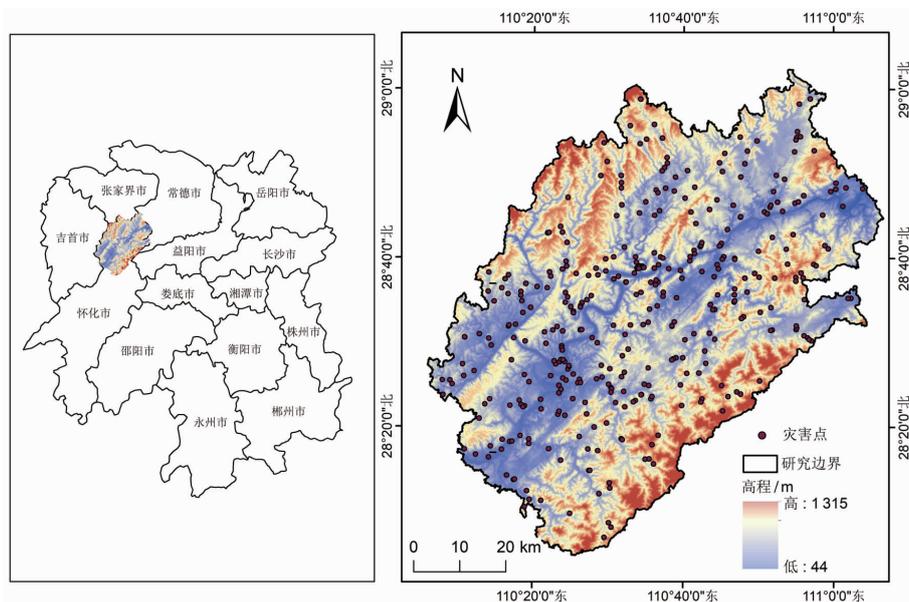


图 1 研究区位置

## 1.2 地质灾害发育情况

沅陵境内发育的地质灾害主要有滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流这4类,发育灾害点共383处,其中滑坡342处、崩塌29处、地面塌陷6处、泥石流6处,分别占灾害点总数的89.29%,7.57%,1.57%,1.57%。从时间分布看,研究区内地质灾害主要发生在5月—7月,与区内集中降雨时间基本一致;从地理空间分布看,沅陵县地质灾害主要沿河流分布,在公路、构造走向、岩层走向上呈带状分布;在每个集镇均有分布,但分布上有较大差异,例如在沅陵镇、凉水井镇、官庄镇分布较为集中,分别占总数的13.32%,10.44%,8.88%;在火场土家族乡、明溪口镇、麻溪铺镇分布较少,分别占总数的1.31%,1.57%,1.83%。通过综合分析可知,地质灾害在空间上的差异可能与河流、降雨和人类工程活动强度等因素有关,随着沅陵经济建设的迅速发展,沅陵大力开展房屋建设、公路建设等破坏了原始斜坡结构的力学状态,从而诱发地质灾害。

## 2 评价模型

### 2.1 信息量模型原理

信息量模型是一种不断衍生发展的评价预测模型,它最初运用在矿藏的探查,后广泛运用在滑坡等地质灾害评价中<sup>[20]</sup>。它主要是通过统计分析不同地质环境下,影响稳定性因素的实际值来得到整个区域稳定性的信息量值<sup>[21]</sup>。信息量模型如式(1)所示。

$$I = \sum_{n=1}^m \ln \frac{N_{mn}/N}{S_{mn}/S} \quad (1)$$

式中: $I$ 为总的信息量值; $m$ 为指标因子数; $n$ 为某类因子; $N_{mn}$ 为 $m$ 个因子中第 $n$ 类发育地质灾害个数; $N$ 为区内地质灾害总数; $S_{mn}$ 为 $m$ 个因子中第 $n$ 类发育地质灾害的面积; $S$ 为研究区所占总面积。

用总 $I$ 值来确定易发性等级, $I$ 值越大说明地质灾害发生的可能性越大,其易发性等级越高; $I$ 值越小说明地质灾害发生的可能性越小,其易发性等级就越低。

### 2.2 Min-Max 归一化

Min-Max 归一化<sup>[22]</sup>是由线性函数演变而来,也称线性函数归一化。它能够使样本的大小关系和相对距离保持不变<sup>[23]</sup>,他在数据处理中是一种重要的预处理步骤,在机器学习领域具有较高的研究价值。设数据值域为 $[\min, \max]$ ,归一化表达如式(2)。

$$y = \varphi(x) = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (2)$$

式中: $y$ 为 $x$ 归一化后的数据; $x$ 为拟归一化数据; $\max$ 为当前数据最大值; $\min$ 为当前数据最小值。

### 2.3 评价因子选取及来源

评价因子的选取应遵循基本原则:所选评价因子尽量从工程地质理论和场地条件等方面考量<sup>[21,24]</sup>。

地质灾害的形成主要是由控制因素和诱发因素两方面决定<sup>[7]</sup>,控制因素主要考虑地形地貌、水文地质、地层岩性、地质构造等条件,诱发因素主要考虑人类工程活动、降雨量、河流、植被覆盖度等条件。通过对研究区地质灾害类型、规模等级、灾情、水文地质条件、地质地貌条件以及前人研究成果等进行综合分析,初步从地形地貌、地质构造、人类工程活动等方面选定9个评价因子,经过皮尔逊相关性验证后选择最终因子。其中灾害点数据来源于沅陵1:50 000地质灾害详查报告和 risk 普查报告;高程、坡度、坡向、剖面曲率在空间分辨率为90 m的DEM图上生成,来源于地理空间数据云;降雨量数据来源于湖南省水文网;岩组、断层、道路、水系数据来源于地理国情监测云平台。利用ArcGIS的空间分析功能对评价因子进行处理,统计各评价因子不同区间的灾害点信息,通过式(1)计算致灾因子不同区间的信息量值,通过式(2)对得到的信息量值进行归一化处理。然后采用ArcGIS中的字段计算器给各评价因子不同区间赋值,通过栅格处理和重分类工具生成单因子信息量图层(图2)。

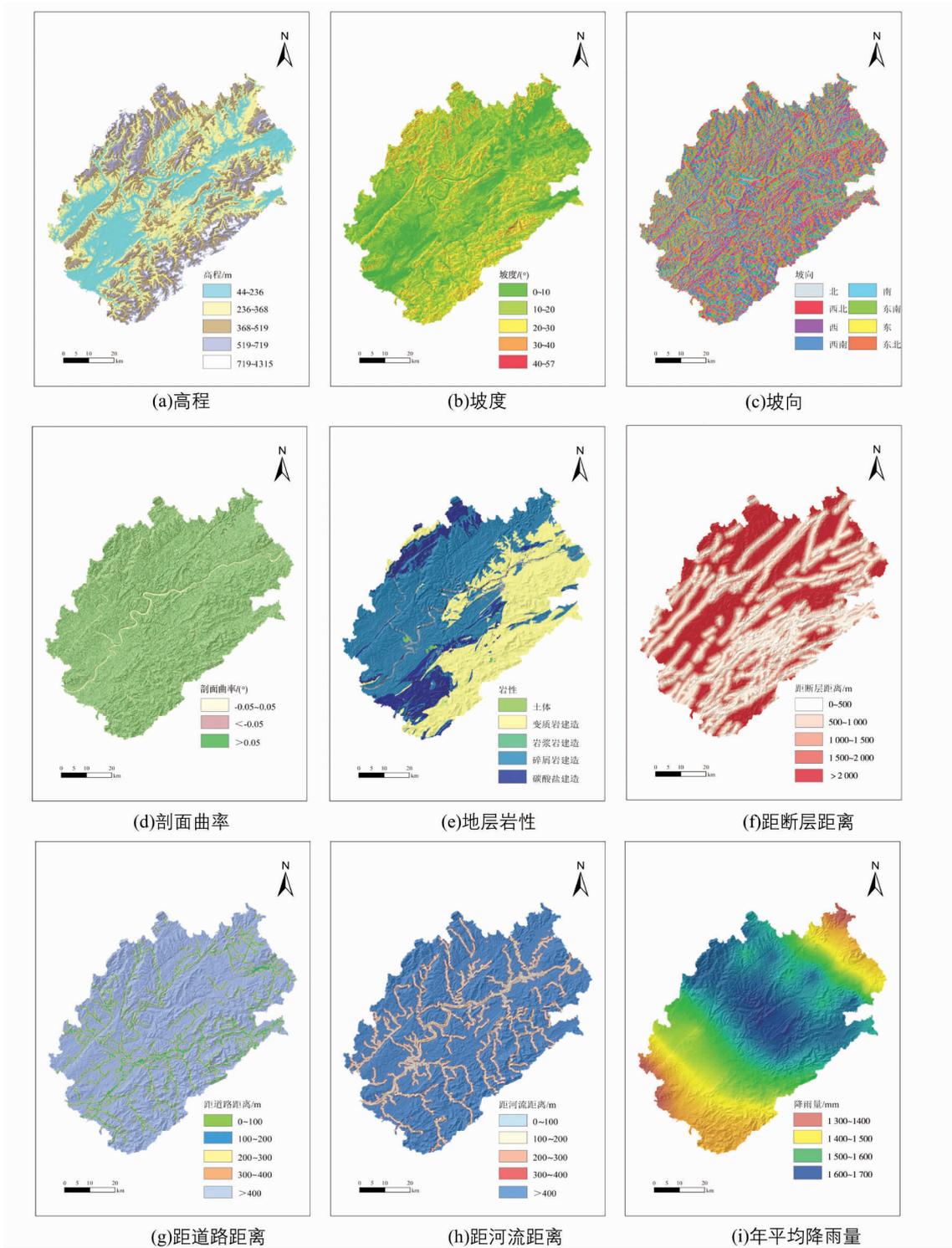


图 2 评价因子分级

### 3 评价指标的建立

#### 3.1 评价因子分级

所选评价因子的数据类型可分为度量型和计数型这 2 类,度量型数据因子可根据实际情况利用 ArcGIS 中的自然间断法及相同间隔法来分类,计数型数据因子主要以现有研究成果和专家经验为划分依据<sup>[25]</sup>.通过对现有文献的研究总结,将坡向、坡度、距断层、道路、水系的距离按照相同间隔法进行分级,高程、剖面曲率、降雨量按照自然间断点进行分级,岩组按照现有资料和听取有关专家建议进行分级,各评价因子划分如表 1.

表1 评价因子的信息量值

评价因子	灾害点个数	分级状态	<i>I</i> 值	归一化 <i>I</i> 值	评价因子	灾害点个数	分级状态	<i>I</i> 值	归一化 <i>I</i> 值
高程	175	45~236	0.467	1.000	断层	129	<500	0.195	1.000
	122	236~368	0.047	0.801		85	500~1 000	0.059	0.701
	52	368~519	-0.534	0.526		57	1 000~1 500	-0.030	0.505
	31	519~719	-0.529	0.528		32	1 500~2 000	-0.259	0.000
	3	719~1 315	-1.644	0.000		80	>2 000	-0.187	0.158
坡度	158	<10	0.283	0.719	河流	113	<100	1.506	1.000
	153	10~20	-0.020	0.510		71	100~200	1.648	0.875
	61	20~30	-0.361	0.276		52	200~300	1.284	0.789
	9	30~40	-0.762	0.000		32	300~400	1.085	0.636
	2	>40	0.693	1.000		115	>400	-2.233	0.000
坡向	34	北	-0.234	0.220	道路	69	<100	0.941	1.000
	45	东北	-0.034	0.513		55	100~200	0.842	0.926
	52	东	0.032	0.609		43	200~300	0.688	0.811
	69	东南	0.299	1.000		21	300~400	0.043	0.330
	50	南	0.094	0.700	195	>400	-0.399	0.000	
	48	西南	0.018	0.588	剖面曲率	121	<-0.05	0.019	1.000
	51	西	0.031	0.607		108	-0.05~0.05	-0.022	0.000
34	西北	-0.384	0.000	154		>0.05	0.001	0.564	
岩组	226	碎屑岩建造	0.196	1.000	降雨量	26	1 300~1 400	-0.198	0.293
	30	碳酸盐建造	-0.448	0.664		58	1 400~1 500	-0.377	0.000
	124	变质岩建造	-0.112	0.840		99	1 500~1 600	0.235	1.000
	1	岩浆岩建造	-1.721	0.000		200	1 600~1 700	0.059	0.712
	2	土体	-1.095	0.327					

## 3.2 评价因子分析

### 3.2.1 高程

高程对地质灾害的发生有一定约束作用,可通过影响其他因素来间接影响地质灾害的空间分布<sup>[26]</sup>.研究区高程为45~1 315 m,高程信息量为-1.644~0.467,从归一化 *I* 值可以看出45~368 m 更容易发生地质灾害,信息量值更大.

### 3.2.2 坡度

坡度能够反映一个区域的起伏度,并影响该区域的应力分布.坡度在20°内发育的灾害点最多,共发育311处,占总灾害点数的81.20%;坡度超过40°以后发育灾害点2处,但归一化 *I* 值最大值分布在坡度超过40°的区域,通过分析可知坡度超过40°的面积仅占总面积的0.3%.

### 3.2.3 坡向

坡向是影响研究区地质灾害发育的重要因素,坡向信息量为-0.384~0.299,地质灾害主要发育在东南坡向,共发育69处,占总灾害点的18.02%,在西北、北坡向上发育较少,与归一化 *I* 值表现的基本一致.

### 3.2.4 岩组

岩性是产生地质灾害的内在关键因素,研究区内碎屑岩建造发育的地质灾害较多,占发育灾害点总数的59%,灾害点密度为0.08个/km<sup>2</sup>,其归一化 *I* 值为1,表明该岩性更容易发生地质灾害.分类中的土体也发育了2处灾害,其归一化 *I* 值达到0.327,通过分析得知,土体所占面积较小,该类型灾害点密度为0.02个/km<sup>2</sup>.

### 3.2.5 距断层的距离

沅陵位于我国东部新华夏系一级构造第三个隆起带南段的沅麻盆地沉降带内,境内构造形迹复杂.研究区距断层500 m内发育的地质灾害最多,共发育129处,占灾害点总数的33.68%,其 *I* 值和归一化 *I* 值也最大.距断层2 000 m以后的地方,因为面积较大,灾害点也发育80处,但信息量值为-0.187,归一化 *I* 值也显示较小.

### 3.2.6 剖面曲率

斜坡剖面曲率是重要的地形因素,剖面曲率定义为斜坡表面任意一点的曲率垂直于斜率<sup>[27]</sup>.研究区内曲率的信息量值为 $-0.022\sim 0.019$ ,归一化  $I$  值显示凹、凸形坡较平面更容易发生地质灾害.其本身的稳定性状态也证实凹、凸形坡更容易失稳破坏,发生地质灾害<sup>[28]</sup>.

### 3.2.7 距河流的距离

河流是诱发地质灾害的重要因素之一,沅陵境内水系十分发达,境内河流以沅江为主干,包括大、小溪河 910 条,合计总长 3 888.55 km.水系的存在会对坡脚产生冲刷作用,使斜坡抗剪强度降低.距河流 300 m 内发育的灾害点较多,占总数的 61.62%,所对应的  $I$  值和归一化  $I$  值也最大.

### 3.2.8 距道路的距离

道路因子主要反映人类工程活动的影响.道路工程等的开挖破坏斜坡的稳定性,由于没有对开挖形成的临空面及时采取工程治理措施,在降雨、风化等因素作用下,滑坡、崩塌等地质灾害极易发生,如七甲坪镇柴油沟滑坡、官庄镇清捷河村杨家冲滑坡.道路的信息量为 $-0.399\sim 0.941$ ,其归一化  $I$  值反映出距道路 0~300 m 内灾害点发育较多,容易发生地质灾害.

### 3.2.9 降雨量因子

沅陵历年地质灾害发生频次与全年降水量存在一定的相关性.据沅陵多年降雨资料,结合地质灾害发生的频次,将年平均降雨量分为 4 个等级.研究结果显示出地质灾害的数量与降雨量呈正相关,降雨量在 1 600~1 700 mm 时发育的灾害点最多,共发育 200 处,占研究区总数的 52.22%.

## 3.3 评价指标独立性检验

采用皮尔逊相关性分析法对各评价指标进行综合分析,剔除掉相关性较大的因子,通过 ArcGIS 的波段集统计工具得到相关系数矩阵(表 2).由表 2 可知所选评价因子都处于低度相关或不相关,表明评价因子之间相关性较小.

表 2 评价因子之间的相关系数矩阵

评价因子	高程	坡度	坡向	剖面曲率	地层岩性	地质构造	河流	道路	降雨量
高程	1								
坡度	0.376	1							
坡向	0.012	0.021	1						
剖面曲率	0.020	0.489	0.012	1					
地层岩性	0.259	0.139	0.039	0.003	1				
地质构造	-0.055	-0.006	0.031	0.002	0.037	1			
河流	-0.171	-0.049	0.005	-0.002	0.001	0.016	1		
道路	-0.137	-0.081	0.006	-0.005	-0.015	-0.011	0.221	1	
降雨量	0.076	0.094	-0.002	0.004	0.056	-0.055	0.040	-0.003	1

## 4 地质灾害易发性评价

### 4.1 信息量模型

利用信息量模型将实际数据转换为信息量值,在 ArcGIS 中将信息量值赋值给每一个图层并利用栅格计算器将生成的单因子信息量图层进行叠加分析,得到总的信息量栅格图,其信息量值为 $[-6.196, 5.659]$ .利用自然断点法将其划分为极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区(图 3).由统计灾害点在各分区的情况可知(表 3):中易发区面积占比最多,为 28.04%,发育地质灾害 72 处,灾积比为 $0.67$ 个/ $\text{km}^2$ ;高易发区和极高易发区共发育灾害点 269 处,灾害点占比为 70.24%,面积占比为 29.68%,主要分布在沅陵

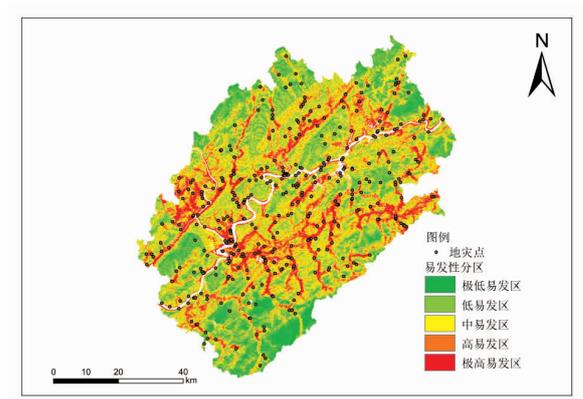


图 3 基于信息量模型易发性分区

镇、凉水井镇、中部的北溶乡、官庄镇等人类工程活动较强的地方;较低易发和低易发区共发育地质灾害42处,灾害点占比为11.06%,面积占比为43.14%,主要分布在人类工程活动较低、地势较平坦、远离水系与道路的地区。

表3 各易发性等级区域地质灾害分布

易发性分区	模型类别	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	灾害点个数/个	灾害点占比/%	灾积比/(个/km <sup>2</sup> )
极低易发区	I模型	996.06	17.02	6	1.67	0.10
	归一化I模型	2 190.17	37.42	3	0.78	0.02
低易发区	I模型	1 528.70	26.12	36	9.39	0.36
	归一化I模型	1 158.08	19.79	51	13.32	0.67
中易发区	I模型	1 641.13	28.04	72	18.79	0.67
	归一化I模型	1 246.14	21.29	55	14.36	0.67
高易发区	I模型	1 179.41	20.15	127	33.16	1.65
	归一化I模型	700.55	11.89	96	25.07	2.11
极高易发区	I模型	507.21	9.53	142	37.08	3.89
	归一化I模型	557.56	9.61	178	46.47	4.84

#### 4.2 归一化信息量模型

所选择的评价因子因其值域和物理意义不同,很难在同一水准上去评判某一评价因子对地质灾害的影响作用,因此将Min-Max归一化处理引入模型中,它可将所有数据都映射到 $[0,1]$ ,消除量纲的影响,便于数据的比较<sup>[29]</sup>。基于信息量模型将得到的信息量值通过式(2)进行处理,得到归一化信息量值,其归一化总信息量值范围为 $[0,9]$ ,得到地质灾害易发性分区(图4)。由表3可知:地质灾害主要分布在高、极高易发区,共发育地质灾害274处,灾害点占比为71.54%,面积占比为21.50%;低、极低易发区共发育地质灾害54处,灾害点占比为14.1%,面积占比为57.21%。

#### 4.3 易发性评价结果检验

评价结果检验主要通过灾害点在分区内的落点情况来检验易发性评价结果的合理性,它是验证机器学习模型的方法之一<sup>[30]</sup>。由2种模型的分區面积与灾害点统计分析可知(图5):2种模型在面积分布上差异显著,信息量模型呈现出驼峰分布,在两端的面积相对较小,归一化信息量模型呈现出面积下降的趋势。从评价结果可以看出(表3):信息量模型比归一化信息量模型在高易发和极高易发分区的面积分布上多428.51 km<sup>2</sup>;在灾害点数量上无显著差异,此外,归一化信息量模型在极高易发区和高易发区的灾积比分别为4.83和2.11,明显要高于I模型在极高易发区和高易发区的灾积比(3.89,1.65)。综合来看,归一化处理后的模型与实际情况更加接近,更多的灾害点落在高、极高易发区,又满足高、极高易发区的面积尽量小。因此,归一化处理后的模型比信息量模型分区更加准确、合理。

#### 4.4 精度检验

ROC曲线由于简单、直观等性质,被广泛运用在地质灾害分区评价中,也是地质灾害易发性评价精确度检验的常用方法,ROC曲线下面积AUC值可检验分区结果质量<sup>[31-33]</sup>。根据划分标准:AUC在0.9以上时具有高准确性,AUC在0.7~0.9时具有较高准确性,AUC在0.5~0.7时具有较低准确性,AUC低于0.5时无判断价值。此次研究中归一化信息量模型和信息量模型的AUC值分别为0.784(78.4%)和0.730(73.0%),表明模型表现良好,归一化处理后的模型相比信息量模型具有更高的精度(图6)。

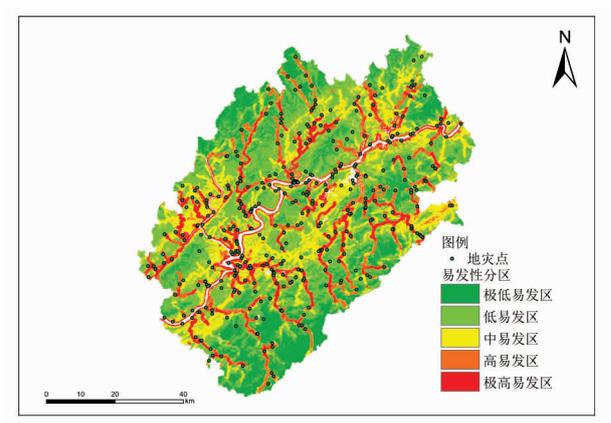


图4 基于归一化信息量模型易发性分区

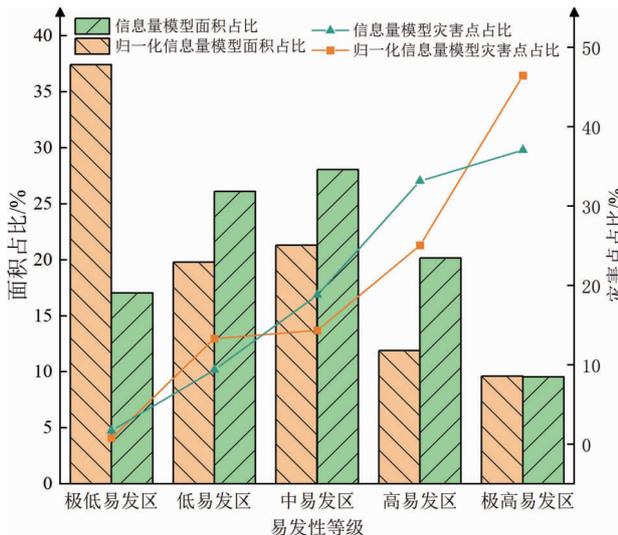


图 5 易发性面积和灾害点分布

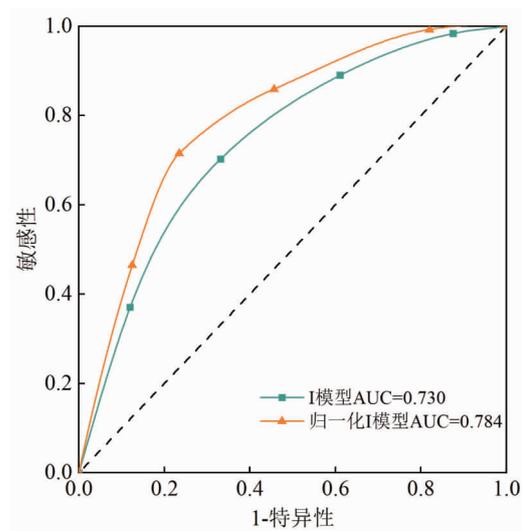


图 6 ROC 曲线与 AUC 值

## 5 结论

1) 沅陵县地质灾害主要发育在以下特征区:高程在 44~368 m,坡度在 20°内,坡向为东南,剖面曲率大于 0.05,地层岩性为碎屑岩建造,距离断层 500 m 和距离河流、道路 300 m 范围内;年平均降雨量在 1 600~1 700 mm.

2) 经 Min-Max 归一化处理后的信息量模型精度更高、分区更加合理,能够为该地区的地质灾害风险评价提供更有利的预测途径和方法.

## 参考文献:

- [1] 解明礼,巨能攀,赵建军,等.区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7):1003-1014.
- [2] 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.
- [3] 陈立华,李立丰,吴福,等.基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J].地球与环境,2020,48(4):471-479.
- [4] TAN Y M, GUO D, XU B. A geospatial information quantity model for regional landslide risk assessment[J]. Natural Hazards, 2015, 79(2): 1385-1398.
- [5] LIN J H, CHEN W H, QI X H, et al. Risk assessment and its influencing factors analysis of geological hazards in typical mountain environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127077.
- [6] 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.
- [7] 李萍,叶辉,谈树成.基于层次分析法的永德县地质灾害易发性评价[J].水土保持研究,2021,28(5):394-399.
- [8] KUMAR R, ANBALAGAN R. Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri Reservoir rim region, Uttarakhand[J]. Journal of the Geological Society of India, 2016, 87(3): 271-286.
- [9] 武鑫,黄敬军,缪世贤.基于层次分析—模糊综合评价法的徐州市岩溶塌陷易发性评价[J].中国岩溶,2017,36(6):836-841.
- [10] WANG S B, ZHUANG J Q, ZHENG J, et al. Application of Bayesian hyperparameter optimized random forest and XGBoost model for landslide susceptibility mapping[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 712240.
- [11] 焦伟之,张明,谢鑫鹏,等.基于 GIS 与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价:以大新镇为例[J].安全与环境工程,2022,29(4):119-128.
- [12] RAI D K, XIONG D H, ZHAO W, et al. An investigation of landslide susceptibility using logistic regression and statistical

- index methods in dailekh district, Nepal[J]. Chinese Geographical Science, 2022, 32(5): 834–851.
- [13] FENG W, TANG Y M, HONG B. Landslide hazard assessment methods along fault zones based on multiple working conditions: a case study of the lixian-luojiabu fault zone in Gansu Province (china) [J]. Sustainability, 2022, 14(13): 8098.
- [14] CONFORTI M, PASCALE S, ROBUSTELLI G, et al. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River Catchment (northern Calabria, Italy) [J]. CATENA, 2014, 113: 236–250.
- [15] 陈亮,孟高头,张文杰,等.信息量模型在县市地质灾害调查与区划中的应用研究:以浙江省仙居县为例[J].水文地质工程地质,2003,30(5):49–52.
- [16] 吴常润,赵冬梅,刘澄静,等.基于GIS和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价[J].西北地质,2020,53(2):308–320.
- [17] 孙滨,祝传兵,康晓波,等.基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(5): 119–127.
- [18] 周萍,邓辉,张文江,等.基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究:以四川理县为例[J].地理科学, 2022,42(9):1665–1675.
- [19] 刘福臻,戴天宇,王军朝,等.耦合 Random Forest 算法与信息量模型的地质灾害易发性评价:以西藏自治区工布江达县为例[J].安全与环境学报,2023,23(7):2428–2438.
- [20] 张桂荣,殷坤龙,刘传正,等.基于GIS的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):39–43.
- [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.
- [22] RENUKADEVI P, RAJIV KANNAN A. Covid-19 forecasting with deep learning-based half-binomial distribution cat swarm optimization[J]. Computer Systems Science and Engineering, 2023, 44(1): 629–645.
- [23] 李树忱,冯现大,李术才,等.矿井顶板突水模型试验多场信息的归一化处理方法[J].煤炭学报,2011,36(3):447–451.
- [24] 陈前,晏鄂川,黄少平,等.基于样本与因子优化的黄冈南部地区地质灾害易发性评价[J].地质科技通报,2020,39(2): 175–185.
- [25] 廖芸婧.安徽省歙县地质灾害易发性区划与气象预警研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- [26] 于秀珍,牟瑞芳.雅康高速公路沿线地质灾害分布特征及影响因素分析[J].安全与环境学报,2022,22(2):876–884.
- [27] LI Y, CHEN W. Landslide susceptibility evaluation using hybrid integration of evidential belief function and machine learning techniques[J]. Water, 2019, 12(1): 113.
- [28] 孙萍萍,张茂省,江睿君,等.降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制[J].地质通报,2021,40(10):1617–1625.
- [29] 宋勇,蔡志平.大数据环境下基于信息论的入侵检测数据归一化方法[J].武汉大学学报(理学版),2018,64(2): 121–126.
- [30] 李信,薛桂澄,柳长柱,等.基于信息量模型和信息量-逻辑回归模型的海南岛中部山区地质灾害易发性研究[J].地质力学学报,2022,28(2):294–305.
- [31] 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(增刊2):3978–3985.
- [32] DJUKEM W D L, BRAUN A, WOUATONG A S L, et al. Effect of soil geomechanical properties and geo-environmental factors on landslide predisposition at mount oku, Cameroon[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(18): 6795.
- [33] FAN H D, LU Y F, HU Y L, et al. A landslide susceptibility evaluation of highway disasters based on the frequency ratio coupling model[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 7740.