

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.01.008

引用格式:赵阳,倪化勇,伍剑波,等.基于AHP-CF模型的地质灾害易发性评价——以泰顺县仕阳镇为例[J].华东地质,2021,42(1):66-75.

## 基于AHP-CF模型的地质灾害易发性评价 ——以泰顺县仕阳镇为例

赵阳<sup>1,2,3</sup>,倪化勇<sup>2</sup>,伍剑波<sup>2</sup>,孙强<sup>2</sup>,张泰丽<sup>2</sup>,刘明军<sup>4,5</sup>

(1.中国地质科学院,北京 100037;2.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;  
3.中国地质大学(北京),北京 100083;4.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074;  
5.泰顺县自然资源和规划局,浙江 温州 325500)

**摘要:**东南沿海地区常年受台风暴雨袭扰,地质灾害频发。以泰顺县仕阳镇为研究区,综合考虑台风暴雨型地质灾害成灾机理,从地形条件、地质条件、人类工程活动3个方面,选取坡度、坡向、坡形、地形起伏度、断层、工程地质岩组、松散层厚度、土地开发强度和公路切坡9个影响因子,基于ArcGIS斜坡单元数据模型,耦合确定性系数(CF)与层次分析模型(AHP)对乡镇尺度的小面域进行地质灾害易发性评价。根据耦合模型的评价结果,将仕阳镇地质灾害易发性等级分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区4个级别,并利用地质灾害点在各易发等级下的分布和成功率曲线对耦合模型的评价精度进行检验。经检验,认为耦合模型的评价分区结果合理,评价精度为84.6%。

**关键词:**地质灾害;易发性评价;AHP-CF模型;台风暴雨;仕阳镇

**中图分类号:**P694

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2021)01-066-10

台风暴雨诱发滑坡是东南沿海地区地质灾害的主要类型,具有突发性强、分布广泛的特点,严重影响生命和社会安全,合理有效的地质灾害易发性评价对地质灾害风险评价和风险管控具有重要意义。

GIS技术的发展,使地质灾害易发评价模型得到广泛建立与应用,如确定性系数模型<sup>[1]</sup>、Logistic回归模型<sup>[2]</sup>、粗糙集理论<sup>[3]</sup>、信息量模型<sup>[4]</sup>、层次分析法<sup>[5-6]</sup>、熵值法<sup>[7]</sup>、证据权模型<sup>[8-9]</sup>、分形理论<sup>[10]</sup>等。随着评价精度要求的提高,较多研究关注模型耦合评价,如稳定性系数与层次分析耦合<sup>[11]</sup>、稳定性系数与逻辑回归模型耦合<sup>[12]</sup>、层次分析与逻辑回归模型耦合<sup>[13]</sup>、层次分析与模糊评

价耦合<sup>[14]</sup>、信息量模型与Logistic回归模型耦合<sup>[15-17]</sup>、聚类分析与支持向量机耦合<sup>[18]</sup>、确定性模型与Logistic回归模型耦合<sup>[19]</sup>等。研究表明,采用耦合模型的地质灾害易发性评价在评价合理性和精度上更有优势。

地质灾害易发性评价具有区域适用性,已有研究多以省域、流域为区划对象,随着地质灾害风险精细化管控要求的提高,选取适宜评价方法,对更小面域进行地质灾害易发性评价具有重要理论意义。本文以泰顺县仕阳镇为例,选取台风暴雨型地质灾害影响因子,将确定性系数模型与层次分析法相结合,进行地质灾害易发性评价,为东南沿海地区地质灾害防治和风险管控提供参考。

\* 收稿日期:2020-10-04 修订日期:2021-01-06 责任编辑:叶海敏

**基金项目:**国家自然科学基金“超渗产流-径流侵蚀对冲沟型泥石流形成的驱动效应及过程模拟(编号:41572294)”、中国地质调查局“浙江丽水地区灾害地质调查(编号:DD20190648)”和“浙江飞云江流域地质灾害调查(编号:DD20160282)”项目联合资助。

**第一作者简介:**赵阳,1996年生,男,硕士研究生,主要从事地质灾害形成机理和风险评价研究工作。Email:geogzhaoyang@126.com。

**通信作者简介:**倪化勇,1979年生,男,教授级高级工程师,主要从事地质灾害形成机理、评价及预测研究。Email:nihuayong@126.com。

## 1 研究区概况

仕阳镇位于浙东南褶皱带、温州临海拗陷及泰顺温州断坳南部、洞宫山脉东南翼,泰顺—黄岩大断裂穿越该区中部,境内最高峰海拔高度 981 m。山脉大体上呈 NE-SW 走向,组成中低山及丘陵地貌。山体坡度变化较大,以 25°~45° 为主。出露地层岩性较简单,以中生代白垩纪西山头组火山岩为主,岩性主要为流纹岩、凝灰岩、泥岩、粉砂质泥岩。仕阳镇位于亚热带海洋型季风气候区,四季分明,雨量充沛,气候温和,年平均降水量 2 047.5 mm。区内雨季降水量大,而且时空分布不均匀,5—7 月梅雨期云雨天气占多,8—9 月台风侵袭频繁,历时长、强度大、范围广。区内地下水主要有第四系孔隙水和基岩裂隙水,受大气降水补给。区内人类工程活动主要表现为城镇建设、采矿、修路和建房切坡。

台风暴雨是研究区地质灾害主要诱因。台风暴雨型地质灾害造成严重经济损失和人员伤亡,例如:2009 年 8 号台风“莫拉克”诱发地质灾害 10 处,造成 2 人死亡;2015 年 8 月,受台风“苏迪罗”影响,泰顺县全域受灾严重,仕阳镇为重灾区,作物减产绝收、基础设施严重受损、较多房屋倒塌、多处公路中断等。目前,全区共有地质灾害点 62 处(图 1),主要集中在仓楼村、翁地村、林垵村、下排村以及黄碧龙村一带斜坡中下部及坡麓区域。

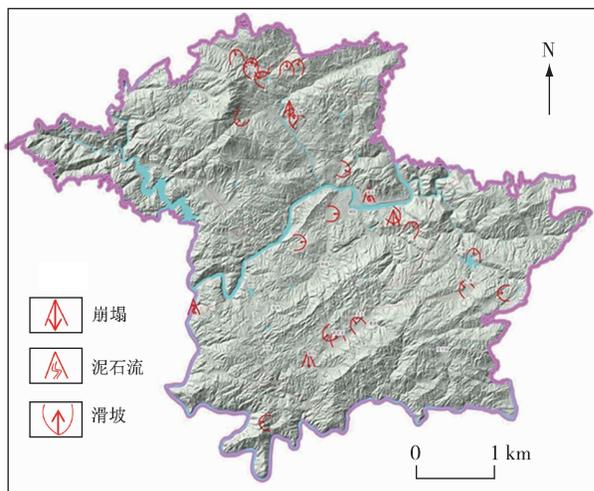


图 1 仕阳镇地质灾害分布概况

Fig. 1 Geological hazard distribution map of Shiyang Town

## 2 评价方法

### 2.1 确定性系数(CF)模型

确定性系数(CF)模型是一种二元统计方法,由 SHORTLIFFE E H 和 BUCHANAN B G<sup>[20]</sup> 提出,并由 HECKERMAN D 改进<sup>[21]</sup>,后被引入区域性地质灾害风险评价<sup>[22]</sup>。根据确定性系数模型得到的指标 CF 值能表示不同条件下地质灾害发生的可能性,对受多因素诱发的台风暴雨型地质灾害尤为适用,其函数表达式为

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)}, & PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)}, & PP_a < PP_s \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $PP_a$  为地质灾害在影响因子分类  $a$  中发生的条件概率,即因子分类  $a$  发育的地质灾害点个数与因子分类  $a$  面积的比值;  $PP_s$  为地质灾害事件发生先验概率,即研究区的地质灾害点总个数与研究区总面积的比值。确定性系数  $CF$  的值域为  $[-1, 1]$ , 正值表示地质灾害发生的确定性高; 负值表示地质灾害发生的确定性低。

### 2.2 层次分析(AHP)模型

层次分析法(AHP)是由 SATTY T L<sup>[23]</sup> 提出的多因素决策分析方法。评判系统的有关替代方案各种要素按照上一层次为准则,对该层次元素逐项比较。依据层次关系,目标层  $A$  受制约因素层  $B$  的制约,各制约子因素层  $B_i$  由若干次级因素层  $C_i$  制约。各层各因素两两比较,引入 1~9 的标度,按规定标度量,构造判断矩阵,计算各因素权重,综合权重按最大权重原则确定最优方案。

目标层  $A$  和制约因素层  $B$  的判断矩阵为

$A$	$B_1$	$B_2$	$\cdots$	$B_n$
$B_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$\cdots$	$a_{1n}$
$B_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$\cdots$	$a_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$B_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	$\cdots$	$a_{nn}$

制约因素层  $B$  和次级制约因素层  $C$  的判断矩阵为

$B$	$C_1$	$C_2$	$\cdots$	$C_m$
$C_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$\cdots$	$a_{1m}$
$C_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$\cdots$	$a_{2m}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$C_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$\cdots$	$a_{mm}$

影响因子两两比较,判断值指标如表 1 所示。

表1 判断矩阵标度与含义

Table 1 Scale of judgment matrix and its meaning

标度 $a_{ij}$	定义
1	i 因素与 j 因素同样重要
3	i 因素比 j 因素略微重要
5	i 因素比 j 因素较重要
7	i 因素比 j 因素非常重要
9	i 因素比 j 因素绝对重要
2, 4, 6, 8,	两种判断中间状态所对应标度值
倒数	与上述影响情况相反

### 2.3 AHP 与 CF 耦合模型

确定性系数模型可反映成灾要素中不同要素之间的贡献大小,解决评价因子内部不同特征值对易发性影响的敏感程度问题,但不能确定影响因子之间的相对权重。层次分析法在计算指标相对权重方面具有一定优势,尤其适用样本少的区域,但不能较好地解决评价因子不同特征值对易发性影响的敏感程度问题。将确定性模型得到的概率量化值取代层次分析法中人为的空间信息量化过程,可以弥补各自的不足<sup>[24]</sup>,解决影响因子的权重的确定和异类数据合并的难题,获得更加准确合理的易发评价结果。研究考虑影响因子间的权重,构建判断矩阵,求解各因子权重,将各因素有机地结合,形成 AHP 与 CF 耦合模型,评价仕阳镇台风暴雨型地质灾害易发性。

## 3 地质灾害易发性评价

依托“浙江省泰顺县仕阳镇地质灾害风险调查评价”项目,基于 1:2 000 精细化灾害地质调查成果,对仕阳镇进行地质灾害易发性评价,综合考虑地质灾害发育的地质条件与现状,以定量划分和信息空间分析为基础,采用确定性系数法(CF)和层次分析法(AHP)相结合的综合评价体系,开展易发区划。

### 3.1 评价单元划分

斜坡是滑坡发生的基本地形地貌单元,相比传统的栅格单元,斜坡单元可综合反映坡度、坡向、高差等地形条件的影响,可提高与实际地形地貌的吻合度;斜坡结构与水文地质条件基本相同,评价因素更能反映斜坡基本特点;斜坡单元可反映地势起伏与地质环境条件,能体现滑坡实际发育状况,以较小面积包含较多地质灾害点数量,评价结果比栅格单元更为合理准确<sup>[25]</sup>。沟谷型泥石流与坡面型

泥石流评价指标体系有所不同,研究区以坡面型泥石流为主,综合考虑研究区台风暴雨型地质灾害发育机理,选用斜坡评价单元对仕阳镇崩塌、滑坡和坡面型泥石流进行易发性评价。使用 ArcGIS 水文分析模块,基于数值高程模型(DEM)完成斜坡单元划分,利用正反地形提取山谷和山脊线<sup>[26]</sup>,结合数字正射影像数据(DOM)人工修改不合理单元,得到由汇水线与分水线组成的斜坡单元<sup>[27]</sup>。将研究区划分为 1 428 个斜坡单元,其中单元面积最小为 0.001 3 km<sup>2</sup>,最大为 0.50 km<sup>2</sup>,平均为 0.056 km<sup>2</sup>。

### 3.2 评价因子选取与分级

考虑东南沿海台风暴雨型地质灾害成灾机理,从地形条件、地质条件和人类工程活动 3 个方面选取坡度、坡向、坡形、地形起伏度、断层、工程地质岩组、松散层厚度、土地开发强度、公路切坡 9 个影响因子。根据各因素中不同情况对地质灾害易发程度贡献的大小,确定指标量化方法。基于 2 m 分辨率 DEM 数据提取分析,影响因子分级的 CF 值见表 2,地质灾害易发因子分级情况见图 2。

### 3.3 仕阳镇地质灾害影响因子分析

(1)坡形。坡形是地质灾害易发评价重要指标之一,对地表水汇流、下渗和地下水运移、岩土体重力分布有重要影响。利用 DEM 提取地表曲率,获取斜坡曲率值。 $-0.1 < \text{曲率} < 0.1$ ,为直线坡;曲率  $< -0.1$ ,为凹形坡;曲率  $> 0.1$ ,为凸形坡。研究区凹形坡与直线形坡分布面积相当,分别为凸形坡的 4.2 和 4.5 倍,灾点数量与分布面积成比例。凸形坡 CF 值最大,更易发生地质灾害。

(2)坡度。坡度影响斜坡破坏的形式和机制。由 DEM 生成 2 m × 2 m 栅格,将斜坡单元内坡度平均值作为斜坡坡度值。为减少主观影响,坡度划分为  $< 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 45^\circ$  和  $> 45^\circ$  共计 8 个级别。由统计分析和确定性系数法可知,坡度范围主要集中在  $20^\circ \sim 35^\circ$ ,陡坡为主,面积占比 83.98%,坡度  $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$  范围 CF 值较大。

(3)坡向。坡向导致风化差异,影响风化层厚度及分布,对斜坡稳定性有显著作用<sup>[28]</sup>。将坡向按 Flat( $0^\circ$ )、N( $337.5^\circ \sim 22.5^\circ$ )、NE( $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ )、E( $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$ )、SE( $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$ )、S( $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$ )、SW( $202.5^\circ \sim 247.5^\circ$ )、W( $247.5^\circ \sim 292.5^\circ$ )、NW( $292.5^\circ \sim 337.5^\circ$ ) 共计 9 个方位生成栅

表 2 仕阳镇地质灾害影响因子分类级别的 CF 值  
Table 2 CF value of geological hazard impact factor classification in Shiyang Town

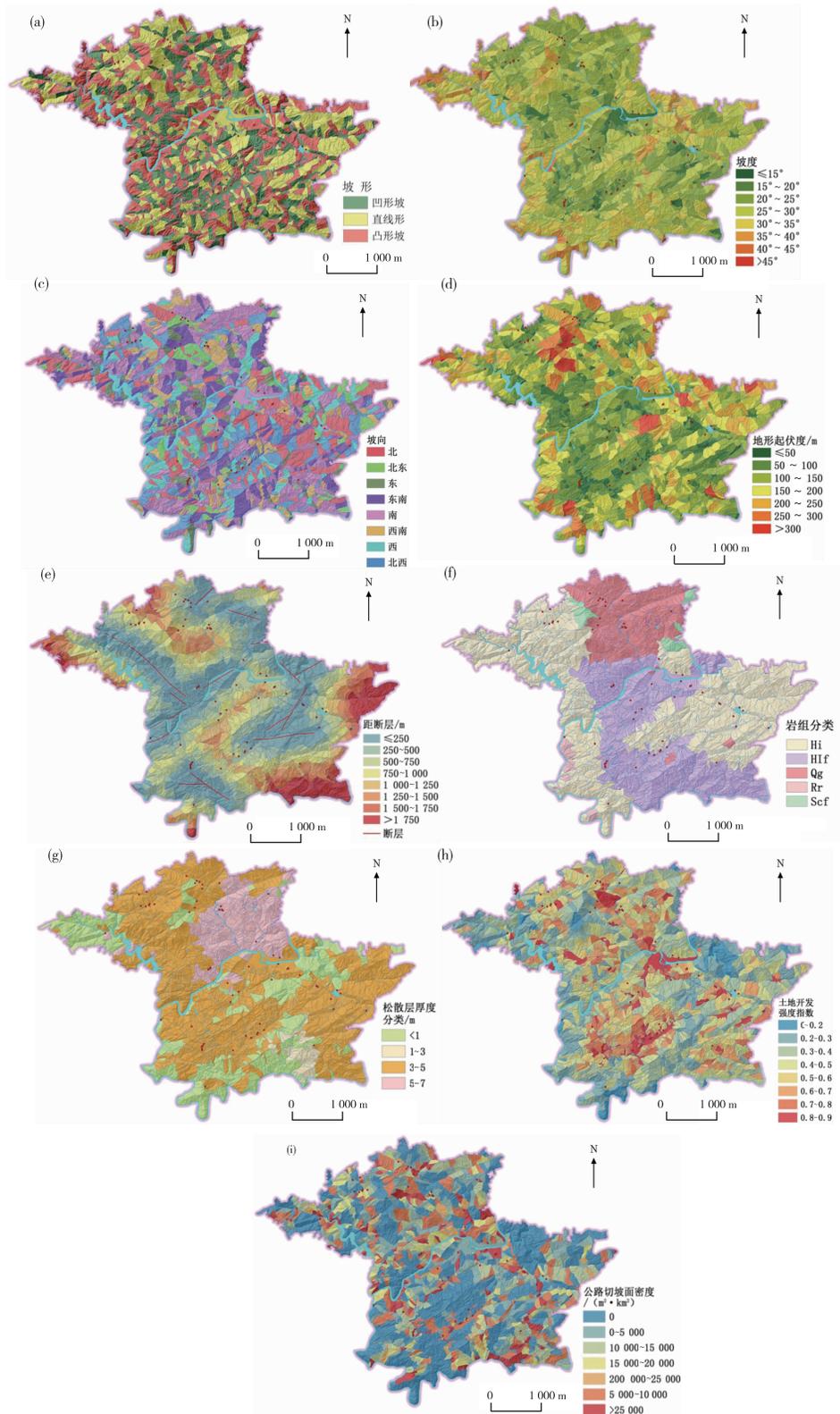
评价因子	分级	灾点/处	面积/km <sup>2</sup>	CF 值	评价因子	分级	灾点/处	面积/km <sup>2</sup>	CF 值	
坡形	凹型坡	25	36.13	0.154	公路切坡面积密度/(m <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0	7	30.85	-0.704	
	凸形坡	9	8.56	0.423		0~5 000	10	12.98	-1.000	
	直线坡	28	38.69	-0.298		5000~10 000	7	11.99	0.151	
坡度/°	<15	2	2.80	0.044		10 000~15 000	13	10.39	0.036	
	15~20	7	3.64	0.605		15 000~20 000	10	5.58	0.572	
	20~25	39	21.72	0.562		20 000~25 000	3	3.33	0.148	
	25~30	11	30.60	-0.528		>25 000	12	5.73	0.636	
	30~35	3	15.58	-0.748		断层距离/m	0~250	19	25.08	-0.020
	35~40	0	5.30	-1.000			250~500	8	12.15	-0.167
	40~45	0	1.16	-1.000			500~750	19	12.90	0.486
	>45	0	0.04	-1.000	750~1 000		11	9.27	0.403	
坡向/°	337.5~2	7	14.12	-0.348	1 000~1 250		2	8.22	-0.520	
	22.5~67	10	5.29	0.595	1 250~1 500		2	5.37	-0.760	
	67.5~11	5	4.90	0.200	1 500~1 750	1	2.79	-0.532		
	112.5~1	9	11.60	0.016	>1 750	0	5.05	-1.000		
	157.5~2	12	19.23	-0.183	工程地质岩组	Rr	0	0.94	-1.000	
	202.5~2	7	7.71	0.014		Qg	15	12.85	0.343	
	247.5~2	7	7.20	0.316		Hi	23	41.20	-0.275	
	292.5~3	5	10.80	-0.389		Scf	0	1.42	-1.000	
起伏度/m	0~50	14	4.05	0.762		Hif	24	24.43	0.230	
	50~100	21	18.44	0.333		土地开发强度	0~0.2	0	2.98	-1.000
	100~15	10	21.08	-0.378	0.2~0.3		0	14.24	-1.000	
	150~20	8	18.51	-0.435	0.3~0.4		6	18.12	-0.568	
	200~25	7	10.96	-0.159	0.4~0.5		9	15.67	-0.250	
	250~30	0	4.77	-1.000	0.5~0.6		14	11.36	0.377	
	>300	2	3.04	-0.143	0.6~0.7		12	8.87	0.433	
松散层/m	<1	8	17.79	-0.704	0.7~0.8		11	5.22	0.636	
	1~3	0	1.94	-1.000	0.8~0.9	10	4.39	0.663		
	3~5	45	49.81	0.151						
	5~7	9	11.31	0.036						

格图层,分级为除平坡 Flat 外的 8 个方位。据统计数据分析,区内斜坡主要集中在 NE 向、NW 向、S 向、SE 向等 4 个坡向,面积占比 68.96%,地质灾害主要发育于 S、NE、SE 等 3 个坡向,占比 50%。由确定性系数法判断,研究区内 NE、W 两个方向较利于地质灾害发生,CF 值大于其他分级。

(4)地形起伏度。地形起伏度为斜坡单元高程极值的差,决定地质灾害的强度和影响范围。为减

小主观因素影响,高程差等间距分为 0~50 m、50~100 m、100~150 m、150~200 m、200~250 m、250~300 m 和 >300 m 7 个等级。0~50 m 的 CF 值最大,为 0.762;其次是 50~100 m,CF 值 0.333。

(5)距断层距离。断裂构造与地质灾害发育密切相关。斜坡单元与断层最短距离作为评价指标<sup>[6,8-9,25]</sup>,等间距分为 0~250 m、250~500 m、500~750 m、750~1 000 m、1 000~1 250 m、1 250~



(a).坡形分级; (b).坡度分级; (c).坡向分级; (d).地形起伏度分级; (e).距断层距离分级; (f).岩组分级; (g).松散层厚度分级; (h).土地开发强度指数分级; (i).公路切坡面积密度分级

图2 仕阳镇地质灾害易发影响因素分级

Fig. 2 Classification maps showing impact factors of geological hazard in Shiyang Town

1 500 m、1 500~1 750 m、>1 750 m 等 8 个级别。大部分斜坡与断层距离 <750 m,由 CF 值可知,距离断层 500~750 m、750~1 000 m 的斜坡更易发生地质灾害。

(6)工程地质岩组。区内发育 5 个工程地质岩组,分别为花岗岩为主的侵入岩岩组(Qg)、流纹岩为主的酸性岩岩组(Rr)、熔结凝灰岩为主的火山碎屑岩组(Hi)、晶屑玻屑凝灰岩为主的火山碎屑岩岩组(Hif)、砂岩和粉砂岩为主的沉积碎屑岩组(Scf)。斜坡单元岩组以 Hi、Hif 为主,面积占比分别为 50.96%、30.22%,灾点分别发育 23 处、24 处。CF 值显示,Qg 最易发生地质灾害,CF 值为 0.343;其次是 Hif,CF 值为 0.23。

(7)松散层厚度。东南沿海台风暴雨型地质灾害的孕灾物质以花岗岩风化壳组成的松散层

为主<sup>[29]</sup>,其厚度是影响地质灾害发育的关键因素。基于岩土剖面,辅以槽型钻、工程物探等手段获取松散层厚度。基于 ArcGIS 做 2 m×2 m 松散层厚度等值线栅格图,分为 <1 m、1~3 m、3~5 m、5~7 m 计 4 类。计算斜坡单元内分布面积最大的类别,作为该斜坡单元的松散层厚度。研究区松散层厚度 3~5 m 的斜坡最多、面积最大、地质灾害发育最多;松散层厚度 3~5 m,CF 值最大。

(8)土地开发强度。地质灾害与不合理的人类工程活动密切相关<sup>[30]</sup>。根据仕阳镇土地利用现状,将土地利用情况划分为建筑用地、水田、旱地、荒地、茅草地、竹林、灌木林地、乔木林地等 8 大类,依据人类工程活动强度,给每种土地利用类型赋予相应的开发强度指数(表 3)。

表 3 土地利用类型与开发强度赋值

Table 3 Utilization types and development intensity index of land

用地类型	建筑用地	水田	旱地	荒地	茅草地	竹林	灌木林地	乔木林地
开发强度指数	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2

统计不同土地利用类型的面积,与开发强度指数相乘得到归一化土地开发强度面积,相互叠加后除以斜坡单元面积得到斜坡的土地开发强度指数。确定性系数法计算结果显示,土地开发强度越大,CF 值越大,二者呈正比,说明土地开发强度越大,越易发生地质灾害。

(9)公路切坡面积密度。地质灾害易发性评价常将与公路距离作为影响因子<sup>[8,15,25]</sup>,但距公路距离不能反映工程活动强度。采用切坡面积密度衡量工程活动强度,利用 GIS 工具统计斜坡单元内切坡面积,与斜坡面积相除得到切坡面密度,按照 5 000 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 等间距分为 7 级。存在公路切坡的区域,密度 5 000~15 000 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 范围内占比最大,约占 43.73%。确定性系数显示,切坡面积密度 >25 000 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 的斜坡,CF 值最大,最易发生地质灾害,其次是 15 000~20 000 m<sup>2</sup>/km<sup>2</sup> 的斜坡。

### 3.4 评价结果

根据层次分析原理和选出的地质灾害影响因子,构建层次结构(图 3)。

通过建立判断矩阵,求解各因子权重(表 4),将各因素有机地结合,评价其易发性。基于 AHP-CF

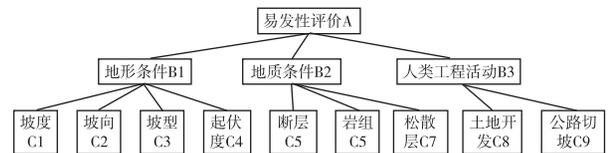


图 3 易发性评价因子层次结构

Fig. 3 Hierarchical structure of vulnerability evaluation factor

模型综合评价的数学模型为

$$CF_{易发} = CF_{坡度} \times 0.192 + CF_{坡向} \times 0.031 + CF_{坡型} \times 0.048 + CF_{起伏度} \times 0.046 + CF_{断层} \times 0.065 + CF_{岩组} \times 0.156 + CF_{松散层} \times 0.287 + CF_{土地开发} \times 0.074 + CF_{公路切坡} \times 0.102$$

依据综合评价模型将 9 个图层的 CF 值叠加,得到各斜坡单元的总 CF 值,即为地质灾害易发指数。ArcGIS 自然间断法将仕阳镇地质灾害易发性分为极高易发区、高易发区、中易发区、不易发区等 4 个等级(图 4)。极高易发区面积 5.74 km<sup>2</sup>,主要分布在上仓楼、翁地、荣西和镇中心卫生院等地,面积占比约 7.1%,地质灾害点 28 处,数量占比 45.2%。高易发区面积 18.8 km<sup>2</sup>,主要分布在在曲

岩、大岗、大山村和石竹后等村组,面积占比23.3%,地质灾害点21处,数量占比33.9%。中易发区面积20.9 km<sup>2</sup>,主要分布在上北斗、大宅、高畲

及平地等村组,面积占比25.9%,地质灾害点8处,数量占比12.9%。低易发区面积35.4 km<sup>2</sup>,面积占比43.8%,查明地质灾害点5处,数量占比8.1%。

表4 仕阳镇地质灾害影响因素权重计算结果

Table 4 Calculation results of geological hazards influencing factors weight in Shiyang Town

	坡度	坡向	坡形	地形起伏度	断层距离	工程地质岩组	松散层厚度	土地开发强度	公路切坡	权重
坡度	1	5	3	4	3	2	1/2	3	2	0.192
坡向	1/5	1	1/2	1/2	1/2	1/5	1/7	1/3	1/3	0.031
坡形	1/3	2	1	1	1/2	1/4	1/5	1/2	1/2	0.048
地形起伏度	1/4	2	1	1	1/2	1/4	1/5	1/2	1/2	0.046
断层距离	1/3	2	2	2	1	1/3	1/4	1/2	1/2	0.065
工程地质岩组	1/2	5	4	4	3	1	1/3	2	2	0.156
松散层厚度	2	7	5	5	4	3	1	3	3	0.287
土地开发强度	1/3	3	2	2	1/2	1/2	1/3	1	1/2	0.074
公路切坡	1/2	3	2	2	2	1/2	1/3	2	1	0.102

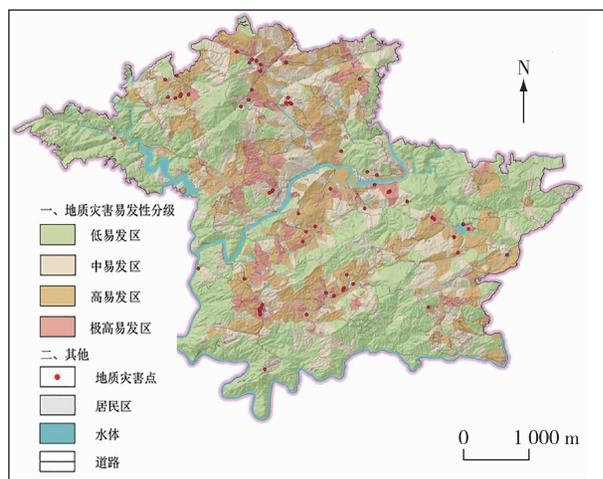


图4 仕阳镇地质灾害易发评价图

Fig. 4 Susceptibility assessment map of geological hazard in Shiyang Town

## 4 易发性评价结果检验

从合理性和精确性2个方面对评价结果进行检验,通过已发生地质灾害点在各易发区域的分布检验评价合理性,运用成功率曲线(ROC)下面积检验评价精度。

### 4.1 合理性检验

根据仕阳镇地质灾害易发分区检验结果(表5),极高易发区的灾害点占比最大;低易发区的面积和斜坡数量占比最多;灾害点在各等级易发区的百分比( $G_i$ )与各等级易发区的面积占研究区总面积的百分比( $S_i$ )的比值随易发等级的降低而减小,与各等级易发区的斜坡数量占研究区斜坡总数的百分比( $M_i$ )的比值随易发等级的降低而减小。应用耦合模型对仕阳镇的地质灾害易发分区结果是合理的。

表5 仕阳镇地质灾害易发分区合理性检验结果

Table 5 Rationality test results of geological hazard zoning in Shiyang Town

易发等级	面积占比 $S_i/\%$	灾害点占比 $G_i/\%$	斜坡数量占比 $M_i/\%$	$G_i/S_i/\%$	$G_i/M_i/\%$
极高易发区(I)	7.1	45.2	9.5	6.37	4.76
高易发区(II)	23.3	33.9	22.5	1.45	1.50
中易发区(III)	25.9	12.9	27.1	0.50	0.48
低易发区(IV)	43.8	8.1	40.8	0.18	0.20

### 4.2 精确性检验

地质灾害易发性评价精度检验中,主要采用成

功率曲线(ROC)验证方法。将评价结果按1%的面积间隔100等分,分别求各易发区滑坡发生的百分

比,构建滑坡易发性面积百分比累计与实际滑坡面积百分比累计曲线<sup>[8]</sup>。曲线下面积(AUC)值越大则模型判断力越强,评价结果的 ROC 曲线(图 5)下面积为 0.846,即耦合模型的准确率为 84.6%,约有 79.2%的滑坡发生在面积占比 30.4%高易发区和极高易发区。易发性评价结果有较高精度,采用确定性系数模型与层次分析法耦合可以客观准确地对仕阳镇地质灾害进行易发性评价。

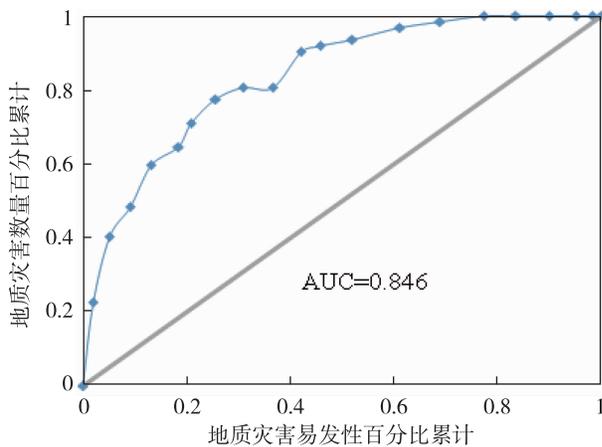


图 5 耦合模型地质灾害易发评价 ROC 曲线图

Fig. 5 ROC curve of geological hazard susceptibility evaluation with coupling model

## 5 结论

(1)以泰顺县仕阳镇为研究对象,综合考虑台风暴雨型地质灾害成灾机理,选取坡度、坡向、坡形、地形起伏度、断层、工程地质岩组、松散层厚度、土地开发强度、公路切坡 9 个影响因子,建立易发性评价指标体系。基于层次分析法与确定性系数耦合模型,开展台风暴雨型地质灾害易发性评价,评价结果表明易发分区与研究区实际情况较为一致。

(2)由选取的 9 个影响因子各级别 CF 值可看出,松散层厚度、坡度、工程地质岩组、土地开发强度、公路切坡面积密度 5 个影响因子对台风暴雨型地质灾害易发程度贡献较大。尤其是坡度  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、农田及建筑用地、公路切坡面积密度  $>25\ 000\ \text{m}^2/\text{km}^2$ 、厚度较大的花岗岩风化层最易发生地质灾害。

(3)仕阳镇地质灾害极高易发区和高易发区面积总占比 30.4%,其中极高易发区面积占比约 7.1%,分布在上仓楼、翁地、双路村和黄碧龙村等地;高易发区面积占比 23.3%,分布在泉亭村、大龙坑、垵望村、山谷垵村等村组,区域内地质灾害发育

密集,人类工程活动强烈。

(4)确定性系数模型可解决评价因子内部不同特征值对易发性影响的敏感程度,层次分析模型能结合专家经验确定影响因子之间的权重大小,将确定性系数模型与层次分析模型相结合,能较好地解决地质灾害影响因子权重的确定问题,获得更加准确合理的易发评价结果。研究结果表明,耦合模型的评价结果客观合理,精度达 84.6%。

**致谢:**中国地质调查局南京地质调查中心朱延辉工程师参加了野外地质调查工作,韩帅助理工程师、泰顺县地质环境监测站相关工作人员在资料、数据收集和分析中提供了支持,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 许冲,戴福初,姚鑫,等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 15-26.
- [2] 冯策,刘瑞,苟长江. 基于 Logistic 回归模型的芦山震后滑坡易发性评价[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2013, 40(3): 282-287.
- [3] 程温鸣,彭令,牛瑞卿. 基于粗糙集理论的滑坡易发性评价——以三峡库区秭归县境内为例[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2013, 44(3): 1083-1090.
- [4] 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(4): 797-808.
- [5] 孙强,张泰丽,伍剑波,等. 基于 GIS 与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 227-233.
- [6] 贺鹏,童立强,郭兆成,等. GIS 支持下基于层次分析法的西藏札达地区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 193-200.
- [7] 杨姗妮. 东南沿海地区地质灾害易发性评价方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [8] 郭长宝,唐杰,吴瑞安,等. 基于证据权模型的川藏铁路加查——朗县段滑坡易发性评价[J]. 山地学报, 2019, 37(2): 240-251.
- [9] 王珂,郭长宝,马施民,等. 基于证据权模型的川西鲜水河断裂带滑坡易发性评价[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 705-715.
- [10] 王森,许强,罗博宇,等. 基于分形理论的南江县滑坡敏感性分析与易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 119-126.
- [11] 王赫生,伍剑波,张泰丽,等. 基于 SHALSTAB 模型的

- 地质灾害易发性动态评价[J]. 华东地质, 2020, 41(1): 88-95.
- [12] 兰恒星, 伍法权, 王思敬. 基于GIS的滑坡CF多元回归模型及其应用[J]. 山地学报, 2002(6): 732-737.
- [13] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于CF和Logistic回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 154-161.
- [14] 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.
- [15] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [16] 王昌明, 黄健, 李桥, 等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的山西吕梁市地质灾害易发性评价研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 132-138.
- [17] 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(2): 220-226.
- [18] 黄发明, 殷坤龙, 蒋水华, 等. 基于聚类分析和支持向量的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 156-167.
- [19] 覃乙根, 杨根兰, 江兴元, 等. 基于确定性系数模型与逻辑回归模型耦合的地质灾害易发性评价——以贵州省开阳县为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 96-103.
- [20] SHORTLIFFE E H, BUCHANAN B G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. *Mathematical Biosciences*, 1975, 23: 351-379.
- [21] HECKEMAN D. Probabilistic Interpretation for MYCNS Certainty Factors[C]. In *Proceedings, UAI*, 1995: 167-196.
- [22] LAN H, WU F, ZHOU C, et al. Analysis on susceptibility of GIS based Landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang Watershed [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2002, 21(10): 1500-1506.
- [23] SATTY T L. *The Analytic hierarchy Process* [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 1-160.
- [24] 刘邵晨, 胡春生, 胡晨琦, 等. 基于CF模型-AHP的地质灾害易发性评价[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2018, 41(6): 575-582.
- [25] 田述军, 张珊珊, 唐青松, 等. 基于不同评价单元的滑坡易发性评价对比研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 137-145.
- [26] 谷天峰, 王家鼎, 付新平. 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1400-1405.
- [27] XIE M, ESAKI T, CAI M. A GIS-based Method for Locating the Critical 3D Slip Surface in a Slope[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31: 267-277.
- [28] 王朝阳. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [29] 刘艳辉, 刘丽楠. 基于诱发机理的降雨型滑坡预警研究——以花岗岩风化壳二元结构斜坡为例[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 542-549.
- [30] 刘明军, 周明浪, 张育志, 等. 浙江泰顺县台风“苏迪罗”期间地质灾害发育特征[J]. 华东地质, 2018, 39(1): 66-72.

## Evaluation of geological hazard vulnerability based on AHP-CF model: Take Shiyang Town of Taishun County as an example

ZHAO Yang<sup>1,2,3</sup>, NI Huayong<sup>2</sup>, WU Jianbo<sup>2</sup>, SUN Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Taili<sup>2</sup>, LIU Mingjun<sup>4,5</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

5. Taishun Bureau of Natural Resources and Planning, Taishun 325500, Zhejiang, China)

**Abstract:** Southeast coastal areas are affected by typhoon rainstorms throughout the years, which resulting in frequent geological disasters. Take Shiyang Town, Taishun County as the research area, this paper considered the formation mechanism of typhoon rainstorm geological hazard comprehensively. Also, nine influencing factors, including slope, aspect, slope shape, topographic relief, fault, engineering geological rock formation, loose layer thickness, land development intensity and highway cut slopes were selected from the aspects of topographical conditions, geological conditions and human engineering activities to evaluate the susceptibility of geological hazard in a small area at the township scale based on the ArcGIS slope unit data model, coupling certainty coefficient (CF) and analytic hierarchy model (AHP). Moreover, Shiyang Town was divided into extremely susceptible area, susceptible area, mildly susceptible area and low susceptible area in line with the susceptibility of geological hazard according to the evaluation result of the coupling model. The evaluation accuracy of the coupling model was also tested using the distribution and success rate curves of various geographic disaster points under different susceptibilities. The result shows that the evaluate division of the coupling model is reasonable with the evaluation, and the evaluation accuracy is 84.6%.

**Key words:** geological hazard; susceptibility assessment; AHP and CF model; typhoon and rainstorm; Shiyang Town