引文格式：谭彬,刘国栋,余安亮,等. 基于AHP-INF耦合模型的察雅县地质灾害易发性评价[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 15-19. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.004

基于AHP-INF耦合模型的察雅县地质灾害易发性评价

谭　彬[1]，刘国栋[1]，余安亮[2]，林　平[1]
（1. 重庆交通大学 智慧城市学院，重庆 400000；2. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400000）

摘　要：以西藏自治区察雅县为例选取高程、坡度、坡向等9个因子构建地质灾害易发性评价指标体系，采用层次分析法与信息量法（AHP-INF）耦合模型计算得到综合信息量，并结合ROC曲线对评价结果进行精度检验。结果表明，察雅县内极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区面积分别为415.74 km²、746.78 km²、2 318.33 km²、4 782.34 km²，其中极高、高易发区集中分布在国道G214、国道G317和水系两侧，中易发区主要围绕极高、高易发区呈带状分布且集中在吉塘镇、烟多镇、荣周乡和香堆镇。评价结果的ROC曲线下方的面积为0.909，说明AHP-INF耦合模型评价精度较高，分区结果合理可靠，适用于察雅县地质灾害易发性评价。

关键词：地质灾害；易发性；INF；AHP；GIS
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0015-05

Evaluation of Geological Disaster Susceptibility in Chaya County Based on AHP-INF Combined Model

TAN Bin[1], LIU Guodong[1], YU Anliang[2], LIN Ping[1]
(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China)

Abstract: Taking Chaya County of Tibet Autonomous Region for example, we selected nine factors such as elevation, slope and slope direction to construct the evaluation index system of geological disaster susceptibility, used analytic hierarchy process and information quantity(AHP-INF) combined model to calculate the comprehensive information quantity, and tested the accuracy of evaluation results in combination with the ROC curve. The results show that the areas of extremely high, high, medium and low risk areas in Chaya County are 415.74 km², 746.78 km², 2 318.33 km² and 4 782.34 km², respectively. Among them, the extremely high and high risk areas are mainly distributed on the national highway G214, G317 and both sides of the water system. The medium risk areas are mainly around the extremely high and high risk areas, are distributed in belts and are concentrated in Jitang Town, Yanduo Town, Rongzhou Township and Xiangdui Town. The area under the ROC curve of evaluation result is 0.909, which indicates that the AHP-INF combined model has high evaluation accuracy, and the zoning result is reasonable and reliable.

Key words: geological hazard, susceptibility, INF, AHP, GIS

地质灾害是指自然地质作用和人类活动造成的恶化地质环境[1]。为了最大限度地降低地质灾害对人民生命财产安全和生态环境的威胁和破坏，需要调查研究地质灾害的发生机制、诱发条件、发展规律、空间规模等情况[2]，为后续灾害的监测预警、防治管控提供参考方案。地质灾害易发性评价又称灾害敏感性评价，即在一定的地质环境与人员活动状态下，地质灾害发生的可能性，是危险性与风险性评价的基础[3]。

根据不同的地质条件，国内外学者采用不同方法开展地质灾害易发性评价，常用方法包括层次分析法（AHP）[4]、逻辑回归模型（LR）[5]、信息量（INF）模型[6]、支持向量（SVM）模型[7]、确定系数法（CF）[8]、神经网络模型[9]等。单一模型分析具有简便灵活、逻辑性和实用性强的优点，但也有各自的缺点，因此不少学者提出多模型组合的方法来综合各模型的优缺点，如何静[10]等基于K-means聚类分析，结合INF模型计算各评价单元的信息量并进行分级；李坤[11]等研究发现RF-SVM组合法适用于山区泥石流易发性评价研究；林荣福[12]等利用随机森林耦合INF模型对汉中市进行滑坡易发性评价分析。多模型耦合还包括

收稿日期：2022-05-24。
项目来源：重庆市研究生教育优质课程建设资助项目（JDY2019009）。
第一作者简介：谭彬（1997—），硕士研究生，研究方向为GIS应用与遥感图像处理，E-mail：tizzybin@163.com。

CF-LR模型[13]、AHP-LR模型[14]、INF-GA-SVM模型[15]等。在地质灾害评价分析中，INF法和INF耦合法的应用最广泛，INF法能客观反映地质灾害易发性且易于实现，预测精度高，但未考虑致灾因子对灾害发生的贡献率。AHP法将定性和定量方法有机结合起来[16]，可分解复杂的系统，各因子对结果的贡献率都是量化的且不割断各因子对结果的影响，方法简洁实用，但存在主观因素的影响，可通过专家群体判断的方法弥补。基于此，本文以AHP-INF耦合模型为察雅县地质灾害易发性的评价模型，选取高程、坡度、坡向等9个致灾因子构建地质灾害易发性评价指标体系，对各指标量化分级并计算各分级的信息量值，再利用GIS平台对赋予信息量值的栅格图层进行加权叠加计算，得到地质灾害易发性综合信息量，最后按照自然间断点分级法划分研究区易发性等级。研究成果可为相关部门的地质灾害预警与防治工作提供参考。

1 研究区概况与数据来源

察雅县位于西藏自治区东部，昌都市中部，海拔约为2 860~5 640 m，面积约为8 263.194 km^2；地处横断山北部、地形切割强烈、山高谷深、沟壑纵横；全县气温低、日照丰富、雨水集中、雨热同季、气候干燥[17]；境内主要河流为澜沧江及其支流麦曲、色曲。

通过野外调查、资料收集获取各种基础数据，其中灾害点数据通过解译遥感影像获取，遥感影像来源于地理空间数据云平台提供的GF-2号卫星PMS相机全色和多光谱产品图像，全色、多光谱影像空间分辨率分别可达0.81 m和3.24 m，包括蓝、绿、红和红外4个波段。工程地质岩组、地质构造线来源于《西藏自治区察雅县1∶50 000地质灾害风险调查评价》研究项目成果数据库（表1），为便于数据处理将原始数据坐标转为CGCS2000_3_Degree_GK_CM_99E投影坐标。

表1 基础数据来源

数据名称	数据来源	时间	分辨率/m	数据类型
地质灾害点	GF-2号影像遥感解译	2021年3月23日	–	.xlsx
构造线	项目数据库	2021年3月	–	.shp
工程地质岩组	项目数据库	2021年3月	–	.shp
DEM	地形图	2021年3月	30	.tif
坡度	根据DEM计算	–	30	.tif
坡向	根据DEM计算	–	30	.tif
河流	OpenStreetMap	2021年1月1日	–	.shp
道路	OpenStreetMap	2021年1月1日	–	.shp
降雨量	中国科学院资源环境科学与数据中心	2021年年均数据	30	.tif
NDVI	MOD13Q1数据	2021年年均数据	500	栅格.tif

2 研究方法

1）AHP法是指将与决策有关的因素分解为目标层、准则层、指标层，再进行定性和定量分析的决策方法。通过决策者的经验判断各衡量目标能否实现的标准之间的相对重要程度[18]，并合理给出各决策方案的标准权数。其基本步骤为：建立层次结构模型、构建判断矩阵、计算各因子权重并检验各因子的随机一致性。

2）INF法是由信息论发展而来的一种预测评价方法。地质灾害的发生和演化受多种因素的控制和影响，通过定量分析历史地质灾害发育规律，查明影响地质灾害发育的主控因素及其影响方式，并对影响因素划分合理的区间，再通过一定的数学模型计算因子内部不同区间的信息量值。信息量值客观上代表了该区间对地质灾害发生的贡献率，各评价因子提供的信息量值叠加即为评价区域总信息量值[19]，计算公式为：

$$I(x_i, Y)=\ln\frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{1}$$

式中，x_i为评价因子x的第i个区间；N为研究区灾害点的总数；S为研究区总面积；N_i为分布在评价因子x_i内的灾害数量；S_i为x_i对应的面积。

评价单元内影响因子总的信息量值由各因子的信息量叠加而成，计算公式为：

$$I_{总}=\sum_{i=1}^{n}I(x_i, Y)=\sum_{i=1}^{n}\ln\frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{2}$$

$I_{总}$越大，地质灾害发生的可能性就越大。

3）AHP-INF耦合法。AHP-INF耦合法是先分别采用AHP法和INF法计算各因素的权重和信息量值，再加权叠加得到综合信息量值，即

$$I_{综}=\sum_{i=1}^{n}W_iI_i=\sum_{i=1}^{n}W_i\ln\frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{3}$$

3　地质灾害易发性评价

3.1　地质灾害信息提取

地质灾害信息主要包括灾害类型、坐标、面积等，本文利用ArcGIS和ENVI等软件对GF-2号影像进行目视解译（图1），解译得到地质灾害发育324处，其中崩塌136处、滑坡92处、泥石流96处。

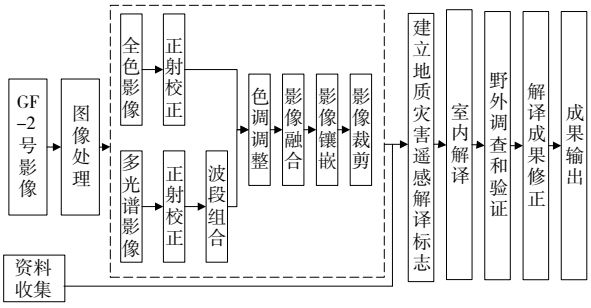


图1　地质灾害遥感解译流程图

3.2　评价单元选取

地质灾害发育的严重程度在局部区域表现出明显的差异性和复杂性，因此对研究区进行地质灾害易发性评价先应确定评价单元。常用的评价单元包括栅格单元、斜坡单元和行政单元，本文结合研究区实际情况采用栅格单元和斜坡单元进行地质灾害易发性评价。

1）栅格单元通常为正方形，不仅数据结构简明易懂、算法简单，而且便于数据采样、管理、组织和空间分析。本文结合研究区实际和前人经验[7]确定栅格单元大小为：

$$G_S = 7.5 + 6 \times 10^{-4} S - 2.0 \times 10^{-9} S^2 + 2.9 \times 10^{15} S^3 \quad (4)$$

式中，S 为等高线地形图数据的比例尺，本文基础数据比例尺为1∶50 000，则 $G_S = 30.70$。

因此，本文采用30 m×30 m的栅格单元将研究区划分为9 181 327个单元。

2）斜坡单元是利用天然斜坡、地形地貌、地质单元和流域情况完成区域划分，与真实情况更吻合，可防止像栅格单元那样破坏斜坡的整体性[6]。本文利用ArcGIS在DEM数据的基础上生成斜坡，将研究区划分为1 498个斜坡单元。

3.3　AHP-INF耦合模型

1）评价因子选取。本文选取高程、坡度、坡向、工程地质岩组、距构造距离、距水系距离、年均降雨量、距道路距离以及植被覆盖度9个因子作为地质灾害易发性的评价指标，并利用GIS空间分析功能初步了解各因子与灾害点的分布关系（图2）。为进一步分析各因子对地质灾害的诱发影响，对各因子进行了适当分级。

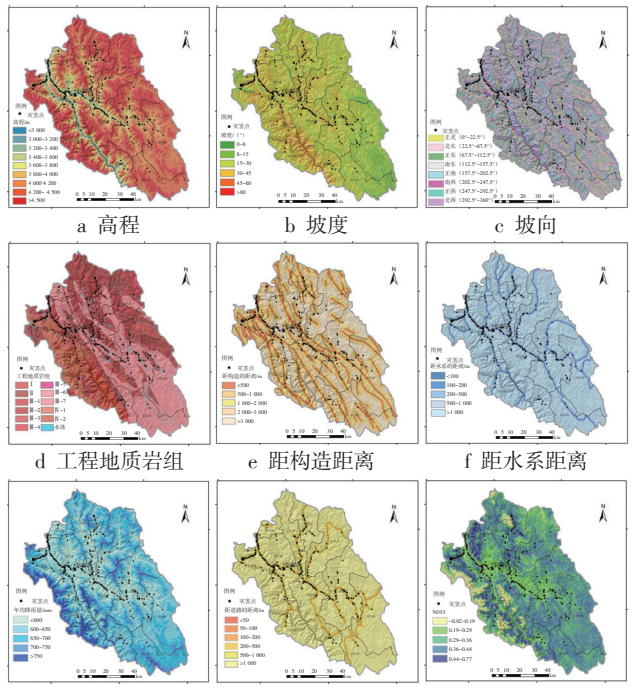


图2　各因子与灾害点分布的关系图

2）评价因子权重。本文将9个评价因子作为指标层，并将其归纳为地形地貌、地质条件、气象水文和人类活动4个准则层。根据相关专家按照标度法对各因子的打分，构造判断矩阵并计算矩阵的最大特征值和特征向量，再根据平均随机一致性指标进行检验[20]，检验通过后得到各因子的权重，见表2。

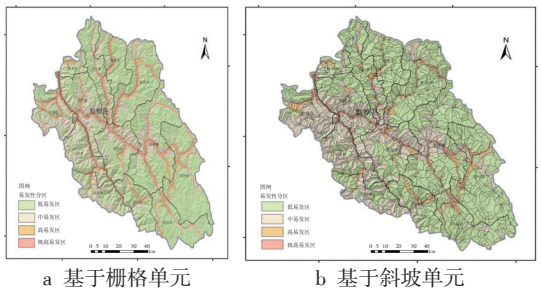
表2　地质灾害易发性评价因子权重

准则层	权重	指标层	权重	总权重
地形地貌	0.072 3	高程	0.163 8	0.011 8
		坡度	0.539 0	0.039 0
		坡向	0.297 3	0.021 5
地质条件	0.143 0	工程地质岩组	0.666 7	0.095 3
		距构造距离	0.333 3	0.047 7
气象水文	0.300 8	距水系距离	0.666 7	0.200 5
		年均降雨量	0.333 3	0.100 3
人类活动	0.483 9	距道路距离	0.750 0	0.362 9
		NDVI	0.250 0	0.121 0

3）评价因子信息量计算。将各因子的重分类分级图层与灾害点叠加，利用ArcGIS软件的空间分析功能，根据式（1）计算得到各因子分级图层的信息量值（表3），再按照各因子权重进行加权叠加，得到研究区综合信息量值（-1.416 5~2.444 6）。利用自然间断点分级法将研究区分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区4类，得到基于栅格单元的地质灾害易发性评价图（图3a）。此外，结合ArcGIS软件的分区统计功能将栅格单元的评价结果归结到斜坡单元上，得到基于斜坡单元的地质灾害易发性评价图（图3b）。

表3 评价因子信息量表

评价因子	分级	信息量	评价因子	分级	信息量
高程/m	2 860~3 000	#NUM!	距道路距离/m	<50	3.964 0
	3 000~3 200	3.059 9		50~100	2.981 7
	3 200~3 400	2.177 2		100~200	1.799 9
	3 400~3 600	1.654 8		200~500	1.133 4
	3 600~3 800	1.414 1		500~1 000	−0.577 3
	3 800~4 000	0.485 7		>1 000	−1.739 7
	4 000~4 200	−0.405 0	距构造距离/m	<500	0.472 2
	4 200~4 500	−1.940 2		500~1 000	0.447 1
	4 500~5 640	−4.768 8		1 000~2 000	−0.190 5
坡度/(°)	0~8	0.593 9		2 000~3 000	−0.155 7
	8~15	−0.088 1		>3 000	−0.554 7
	15~30	−0.295 8	工程地质岩组	Ⅰ	−0.140 5
	30~45	0.079 7		Ⅱ	1.035 0
	45~60	0.633 9		Ⅲ−1	−0.492 7
	>60	−0.107 0		Ⅲ−2	0.444 4
年平均降雨量/mm	<600	0.816 7		Ⅲ−3	#NUM!
	600~650	−0.072 0		Ⅲ−4	#NUM!
	650~700	−0.639 3		Ⅲ−5	−0.584 5
	700~750	−2.412 9		Ⅲ−6	−0.057 6
	>750	#NUM!		Ⅲ−7	−0.179 2
NDVI	−0.02~0.19	0.456 2		Ⅳ−1	#NUM!
	0.19~0.29	1.015 3		Ⅳ−2	1.486 0
	0.29~0.36	−0.325 1	坡向	正北	0.522 8
	0.36~0.44	−1.007 7		北东	0.498 1
	0.44~0.77	−0.473 1		正东	0.397 4
距水系距离/m	<100	2.849 6		南东	−0.352 1
	100~200	2.658 5		正南	−0.484 9
	200~500	1.231 0		南西	−0.982 0
	500~1 000	−0.116 1		正西	−0.321 9
	>1 000	−1.456 4		北西	−0.211 6



a 基于栅格单元 b 基于斜坡单元

图3 基于两种评价单元的地质灾害易发性评价图

3.4 评价结果分析

1）结果分析。察雅县地质灾害易发性评价分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区。极高易发区面积为415.74 km^2，占比为5.04%，共发生177处地质灾害，占比为54.63%，灾害密度为2.14 处/km^2；斜坡单元有171个，占比为11.42%；该区域海拔较低、断层分布集中、植被覆盖率低、人类活动频繁、河流侵蚀强烈，集中于乡、镇周边，沿水系和国道G214、G317分布。高易发区面积为746.78 km^2，占比为9.06%，共发生92处地质灾害，占比为28.40%，灾害密度为1.11 处/km^2；斜坡单元有210个，占比为14.02%；该区域人类活动较频繁、河流侵蚀较强烈，因此呈带状环绕极高易发区分布。中易发区面积为2 318.33 km^2，占比为28.13%，共发生46处地质灾害，占比为14.20%，灾害密度为0.56 处/km^2；斜坡单元有411个，占比为27.44%；该区域呈带状环绕高易发区，集中分布于察雅县的吉塘镇、烟多镇、荣周乡和香堆镇。低易发区面积为4 782.34 km^2，占比为58.02%，共发生9处地质灾害，占比为2.78%，灾害密度为0.11 处/km^2；斜坡单元有4 706个，占比为47.13%；该区域海拔高、植被覆盖率高、人类活动强度低、远离河流，不适宜人类居住活动。

2）精度检验。接受者操作特性曲线（ROC）是衡量评价模型预测精度的指标，以假阳性率即1−特异性为横轴，以真阳性率即灵敏度为纵轴，ROC曲线下方的面积（AUC）的取值范围是[0.5,1]。当AUC=0.5时预测效果没有价值；当0.5<AUC<0.7时准确性较低；当0.7<AUC<0.8时准确性可接受；当0.8<AUC<0.9时准确性较高；当AUC>0.9时准确性很高；当AUC=1时，模型预测的效果特别好[1]。

以ArcGIS软件产生的324个随机非灾害点和研究区内的324个灾害点为统计样本，在SPSS软件中进行分析并绘制ROC曲线，得到显著性水平0.05的情况下的置信区间为[0.886,0.33]，标注误差为0.012，AUC=0.909。图4中蓝色曲线表示本文AHP−INF信息量，红色线表示AUC=0.5时的参考线，因此本文模型对研究区地质灾害易发性评价的准确性较高。

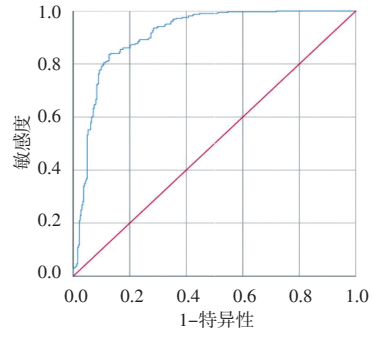


图4 地质灾害易发性评价结果ROC曲线

4 结 语

本文基于AHP−INF耦合模型，选取高程、坡度、坡向等9个评价因子，采用栅格和斜坡两种评价单元

对察雅县进行地质灾害易发性评价，结果表明：

1）在已发育的3类主要地质灾害中有崩塌136处、滑坡92处、泥石流96处。崩塌呈“三段”式分布，分别为新卡—吉塘段（G219）、肯通—王卡段（乡道）、烟多—香堆段（G329–S203），崩塌分布与道路的修建有直接关系；滑坡呈“两群三线”式分布，即G214朱龙新村滑坡群、察雅县县城滑坡群以及新卡乡—吉塘镇澜沧江沿线、肯通乡—王卡乡史曲沿线、烟多镇—香堆镇麦曲沿线，滑坡发育与道路修建和河流侵蚀有关；泥石流主要分布于吉塘片区、烟多—王卡片区和香堆—宗沙片区，3个片区的地形和物源条件为泥石流发育提供了条件。

2）9个因子中道路、水系、构造和工程地质岩组为关键因子。从致灾因子分级来看，距道路50 m以内，距水系100 m以内，距构造500 m以内，工程地质岩组为松散冲洪积砂砾石、砂、粘土岩组和较软弱薄层片岩、片麻岩岩组是地质灾害发生的主要地点。

3）本文综合了AHP法和INF法的优点，提高了评价结果的可靠性，采用栅格评价单元提高了数据处理效率，而斜坡单元则提高了与实际地形地貌的吻合度，在后续的防治工作中可对斜坡单元编号进行针对性的单元防治。

4）评价结果将研究区分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区，其中受人类修建道路和河流冲刷作用影响的极高、高易发区集中于吉塘镇、烟多镇、荣周乡和香堆镇，且沿国道G214、国道G317和水系分布；中易发区主要围绕极高、高易发区呈带状分布，因此防治工作中要注意道路、河流两旁的边坡。

5）ROC曲线的AUC值为0.909，说明研究区采用AHP–INF耦合模型预测地质灾害的易发性具有较高的准确性，可为危险性和风险性评价提供参考，为察雅县提供灾害防治工作的理论指导。

参考文献

[1] 李怡飞,刘延国,梁丽萍,等. 青藏高原高山峡谷地貌区地质灾害危险性评价:以雅江县为例[J]. 水土保持研究,2021,28(3):364-370

[2] 鲁霞,兰安军,母浩江,等. 基于信息量模型的盘州市地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程,2020,20(14):5 544-5 551

[3] 李光辉,铁永波,白永建,等. 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):123-133

[4] 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

[5] 陶星宇,柳锦宝,黄志刚,等. 林芝市公路地质灾害易发性区划及气象预报模型[J]. 水土保持通报,2022,42(2):195-202

[6] 薛强,张茂省,李林. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报,2015,34(11):2 108-2 115

[7] Aditian A, Kubota T, Shinohara Y. Comparison of GIS-based Landslide Susceptibility Models Using Frequency Ratio, Logistic Regression, and Artificial Neural Network in a Tertiary Region of Ambon, Indonesia[J]. Geomorphology, 2018,318(OCT. 1):101-111

[8] 刘艳辉,刘传正,唐灿,等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):92-97

[9] Chen W, Pourghasemi H R, Zhao Z. A GIS-based Comparative Study of Dempster-Shafer, Logistic Regression and Artificial Neural Network Models for Landslide Susceptibility Mapping[J]. Geocarto International, 2017, 32: 367-385

[10] 何静,刘强,许丁友,等. 基于聚类—信息量耦合模型下的广元市滑坡灾害易发性评价[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(12):25-31

[11] 李坤,赵俊三,林伊琳,等. 基于RF和SVM模型的东川泥石流易发性评价研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2022,44(1):107-115

[12] 林荣福,刘纪平,徐胜华,等. 随机森林赋权信息量的滑坡易发性评价方法[J]. 测绘科学,2020,45(12):131-138

[13] 秦红富,谈树成,施祷奇,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] 陈朝亮,彭树宏,钱静,等. 基于AHP-Logistic熵权模型的西南浅丘区地质灾害分布特征研究:以内江市为例[J]. 长江科学院院报,2020,37(2):55-61

[15] 杨康,薛喜成,李识博. 信息量融入GA优化SVM模型下的地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程,2022,29(3):109-118

[16] 祁于娜,王磊. 层次分析—熵值定权法应用于山区城镇地质灾害易发性评价[J]. 测绘通报,2021(6):112-116

[17] 董晴雪,罗斯琼,文小航,等. 近60年来藏东南降水变化及其对土壤温度与冻融过程的影响[J]. 高原气象,2022,41(2):404-419

[18] 樊晓一,乔建平,陈永波. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报,2004,13(1):72-76

[19] 欧鹏辉. 基于信息量法和逻辑回归的江西省滑坡灾害易发性评价[D]. 南昌:东华理工大学,2021

[20] 陈慧敏,杨尽,向明顺,等. 基于地理信息系统和加权信息量的茂县地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程,2021,21(29):12 490-12 499