

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210112002

确定性系数与地理探测器模型耦合的泥石流易发性评估方法研究*

——以安宁河流域为例

杜宇琛^{1,2,3}, 葛永刚^{1,2}, 梁馨月^{1,2,3}, 孙庆敏^{1,2,3}, 陈攀⁴

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 通过确定性系数与地理探测器模型耦合的方法研究耦合模型对泥石流灾害易发性评估的影响。基于遥感判识和野外考察确定安宁河流域内的198条泥石流沟作为评估样本, 选取坡度、地面峰值加速度、地形起伏度、地层岩性、植被覆盖度、植被类型、地形湿度指数以及地貌演化指数作为评价因子, 耦合确定性系数和地理探测器模型, 分别计算各评价因子分级取值和因子权重, 进行安宁河流域泥石流易发性等级分区。研究表明: (1) 地理探测器方法定量分析安宁河流域内泥石流发育的主要贡献因子为地面峰值加速度、地形起伏度和坡度。(2) 泥石流极高易发区和高易发区分别占流域总面积的9.67%和12.02%, 高易发区主要分布在安宁河流域两岸且呈条带状分布。(3) 利用ROC曲线对泥石流易发性评估精度进行验证, 耦合模型的AUC值达到0.824, 相比单种模型CF模型的评估精度0.786提升了4.8%, 具有更高的准确率, 评价效果更优。

关键词: 泥石流易发性; 耦合模型; 地理探测器; 确定性系数; 安宁河流域

中图分类号: P642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0664-10

Research of Debris Flow Susceptibility based on the Coupling of Certainty Factor Method and Geo Detector Model in Anning River Basin

DU Yuchen^{1,2,3}, GE Yonggang^{1,2}, LIANG Xinyue^{1,2,3}, SUN Qingmin^{1,2,3}, CHEN Pan⁴

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazard, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
3. University of Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Engineering, Tibet University, Lhasa, 850000)

Abstract: The influence of the coupling model of the certainty factor method and the geo-detector model on debris flow susceptibility was studied. The 198 debris flows in Anning River valley were selected as the research background based on the analysis of the remote sensing and field survey data. Eight influencing factors including slope grade, *PGA*, topographic relief, stratum lithology, vegetation coverage, vegetation type, topographic wetness index, and geomorphic evolution index were chosen as the evaluation factors. The coupling certainty factor and geo-detector model were used to calcu-

* 收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41792432)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090203)资助

作者简介: 杜宇琛(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事山地灾害防灾减灾技术研究。E-mail: 1367364678@qq.com

late the grading value and factor weight of each evaluation factor respectively to obtain the zoning map of the debris flow susceptibility in Anning River valley. The results showed that: (1) The *PGA*, *RA* and slope were the main factors affecting the development of the debris flow in the Anning River valley. (2) The extremely high-prone areas and the high-prone areas of debris flow accounted for 9.67% and 12.02% of the total basin area respectively. The high-prone areas were mainly distributed on both banks of the Anning River basin in strips. (3) The debris flow susceptibility assessment accuracy was verified by the ROC curve, the AUC value of the presented model reached 0.824, which was 4.8% higher than that of the single model of 0.786. The proposed coupling model has a higher accuracy rate and better evaluation effect.

Keywords: debris flow susceptibility; coupling model; geo detector; certainty factor method; Anning River valley

引言

泥石流是一种复杂的固液两相流流体,大多数泥石流具有高速运动、破坏性强等特点,往往在山区造成极大的人员伤亡和经济损失,泥石流广泛发育、高发、频发的横断山区尤为突出^[1]。开展泥石流易发性分析,有利于潜在灾害早期判识,可为其风险评估和监测预警提供科学依据,降低风险损失。现阶段泥石流易发性评估方法主要包括主观推断分析模型如地形分析法、因子叠加法^[2]等,和数学统计分析模型,如层次分析法^[3]、逻辑回归^[4]、机器学习^[5]、模糊数学^[6]以及支持向量机^[7],以及物理模型^[8]等。近年来,地理信息系统技术的快速发展为泥石流易发性评价工作提供了新的平台,与专家打分评价模型相比,基于GIS平台的评价方法体现了更大的优越性。

针对安宁河流域内的泥石流灾害,李秀珍等^[9]、刘希林等^[10]分别采用主成分分析法、专家打分法对安宁河流域内德昌县的群发泥石流以及典型沟谷泥石流如虎皮湾沟、凉峰沟、凹米罗沟以及纸房沟等进行了危险度评价分析。但以上分析均是基于单一的评价模型所展开的,且因子权重的厘定主观性较强,一定程度上难以客观准确的对泥石流灾害易发性进行评价。现阶段耦合评价模型越来越受到国内外学者的关注,杨光等^[11-13]先后开展了有关耦合评价模型的组合优化及对比研究,取得了良好的效果。

确定性系数模型可快速实现对分级评价因子的分析和隶属度值计算^[14-16],但容易忽略各因子对易发性影响的差异性。地理探测器可定量计算泥石流影响因子对泥石流活动的相对重要性,有效避

免人为主观性对评价因子选取及计算的影响。本论文通过耦合确定性系数模型和地理探测器模型,实现对评价因子分级赋值和因子权重确定,从而达到优化泥石流灾害易发性评价精度的目的。

1 研究区概况

安宁河流域位于横断山脉东缘,是雅砻江下游主要的支流之一,流域面积 $1.105 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔高度为1 011 ~ 5 144 m,流域地势上呈现出东低西高,南低北高的特点。该流域内出露有除志留系和石炭系之外从元古代—新生代的所有地层,岩性分布在东西岸之间存在明显差异,其中花岗岩、闪长岩以及斜长岩等侵入岩广泛分布在安宁河西岸,流域东侧以砂岩、泥岩等沉积岩为主;同时流域内地质构造复杂,新构造运动明显,断层、褶皱发育,主要有安宁河—则木河断裂、西昌断裂和黄联—小高断裂等以及大德里向斜等大型褶皱^[17],地面峰值加速度平均值在0.30g以上,1850年西昌曾发生过 $M_{7.5}$ 级地震,至今小型地震频发;研究区内为亚热带季风气候,降雨多集中在每年的6~8月,月平均降雨量达到220 mm;同时流域内发育有孙水河、茨达河、海河等十四条支流共同构成了复杂的地表径流网络。强烈的构造活动、广布的松散堆积及集中型强降雨为泥石流的发育提供了充足的动力、物源和水源条件,为泥石流活动提供了非常有利的环境条件。

2 研究方法

本文针对安宁河流域的198个泥石流样本点,随机选取80%的泥石流数据作为训练样本构建模

型, 遴选评价因子, 分别采用确定性系数(CF)以及确定性系数与地理探测器耦合模型(CF-GD), 开展安宁河流域内的泥石流灾害易发性评价与分区; 基于剩余 20% 的泥石流样本点, 采用 ROC 曲线方法结合实际灾害发育情况对比两种模型的评价精度, 具体研究流程如图 1 所示。

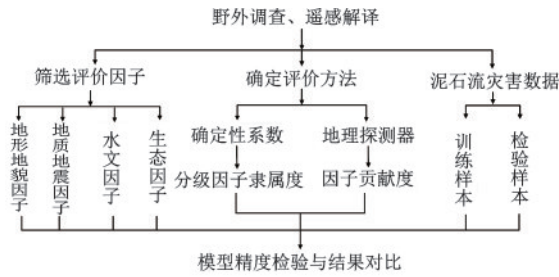


图 1 技术路线

Fig.1 Technical roadmap

2.1 确定性系数模型

确定性系数(Certainty Factor, CF)本质上是一个概率函数^[18], 基于已有的泥石流灾害发生事件, 假定未来泥石流灾害发生的条件与已发生的相同, 计算各影响因子内部不同区间或不同类别的贡献度, 计算公式为:

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

式中, CF 为泥石流灾害发生的确定性系数; PP_a 为泥石流灾害在评价因子分类 a 发生的概率, 具体表征为评价因子分类 a 中的泥石流灾害面积与评价因子分类 a 所占面积的比值; PP_s 表示泥石流灾害在整个研究区内发生的先验概率, 具体表征为整个研究区内泥石流灾害总面积与研究区总面积的比值。

基于上述公式所计算得到的 CF 值为 $-1 \sim 1$, 计算结果为正则代表此单元为泥石流灾害的易发区, 反之如果计算结果为负则说明此单元内不容易发生泥石流灾害。

2.2 地理探测器模型

地理探测器(Geo Detector, GD)是王劲峰等^[19]提出的一种探测空间分异性并揭示其背后驱动因子统计学模型, 可有效分析不同影响因子对研究目标的相对重要性, 避免人为主观性对评价因子选取

及计算的干扰。通过地理探测器下“因子探测器”模块定量计算不同评价因子在泥石流发育中的贡献度值, 分析泥石流各影响因子的相对重要性。

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N\sigma^2 \quad (2)$$

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中, $h=1, 2, 3, \dots, h$ 为变量或因子的分类, 即分类或分区; N_h 和 N 分别为分类 h 和研究区的单元数; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差; q 值表征为各个影响因子的贡献率。

3 研究数据来源与分析

3.1 泥石流灾害点数据

基于文献查阅和资料收集, 结合中国科学院资源环境数据中心提供的泥石流灾害数据开展了安宁河流域地质灾害调查, 并基于 Google Earth 高分辨率遥感影像、Sentinel 卫星影像(空间分辨率为 10 m)以及部分无人机航拍影像等多期遥感影像对泥石流灾害点进行解译, 于 2020 年 8 月前往安宁河流域对解译结果进行百分百实地调查和验证, 共获取泥石流 198 条, 构建安宁河流域泥石流灾害数据库, 制作安宁河流域泥石流灾害的分布情况如图 2 所示。

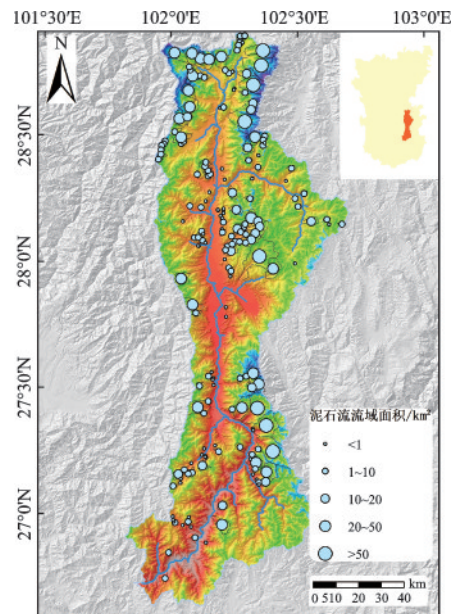


图 2 安宁河流域泥石流分布

Fig.2 Distribution of debris flow in Anning River valley

3.2 评价因子数据来源与评价单元划分

评价因子的数据源主要包括:(1)ASTER 12.5 m分辨率DEM数据;(2)安宁河流域1:25万区域地质图;(3)基于Landsat系列遥感影像提取1990~2019年多年平均NDVI。

现阶段针对灾害易发性评价单元的划分方法主要包括网格单元、地貌单元、行政单元和流域单元等,网格单元对于区域单元划分操作性更强,更有利于计算机的处理和叠加运算,所以本文采用网格单元进行划分。

安宁河流域泥石流在空间上呈现出“小分散、大集聚”的集聚模式,在喜德县和冕宁县呈现出高密度聚集特征,在德昌和米易县呈现出小范围的中密度聚集特征,沿安宁河流域泥石流线密度为0.76条/km,其中泥石流分布线密度最高在冕宁—喜德沿线,为1.2条/km。

3.3 评价因子选取与分析

3.3.1 评价因子选取

评价因子的选取是进行泥石流灾害易发性的基础,综合考虑泥石流形成的地形、物源和环境条件,结合安宁河流域泥石流灾害的分布规律从地形地貌、基础地质、水文以及生态四个类别下,利用地理探测器模型计算得到8个对安宁河流域内泥石流有关键影响作用的环境因子^[20-21]。其中包括:坡度、起伏度(RA)、面积—高程积分指数(HI)、地层岩性、地面峰值加速度(PGA)、地形湿度指数(TWI)、植被类型和植被覆盖度(FVC),各评价因子分级如图3所示。

地层岩性、地震峰值加速度、植被覆盖度、植被类型、面积—高程积分指数作为离散型指标因子,采用固有的自然分组进行分级,针对坡度、地形起伏度、地形湿度指数等连续型数据采用等步长进行分级^[22]。

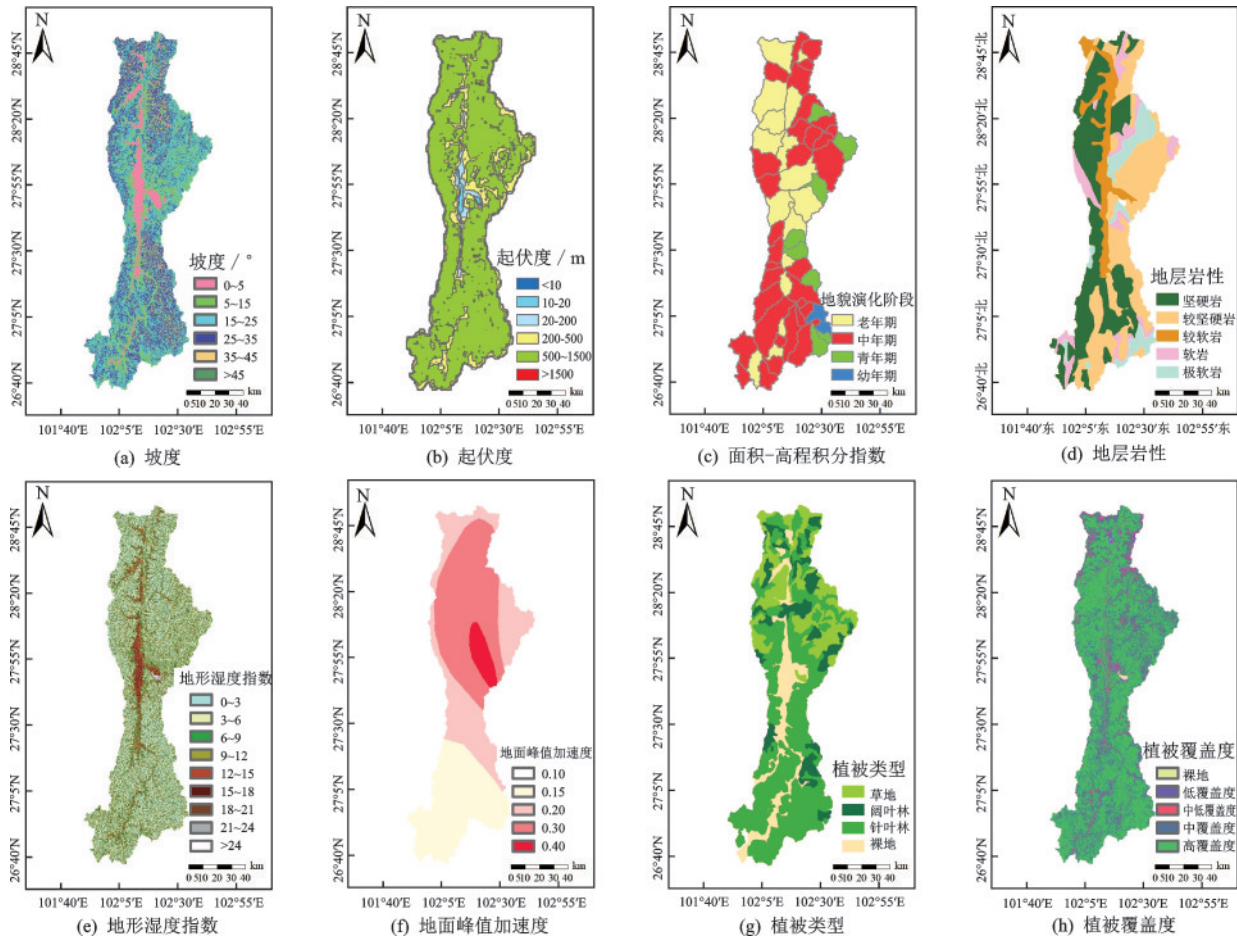


图3 研究区泥石流评价因子分级

Fig.3 Classification of evaluation factors for debris flow in the study area

3.3.2 评价因子分析

频率比值可以反映泥石流发育与各影响因子之间的非线性相关关系,表征为评价因子分级下泥石流流域面积与区域分级面积的比值。当频率比 >1 时,表明该因子对泥石流发育起正向作用,频率比值越大,表明影响程度越大。

(1) 地形地貌因子

本文所选取的地形地貌因子包括坡度、起伏度、面积-高程积分值。如图4(a)所示,当坡度 $>25^\circ$ 时,

频率比值 >1 。数据说明坡度 $25^\circ\sim 45^\circ$ 泥石流发生的动力条件充足,泥石流发生的概率更大;如图4(b)所示,起伏度在 $500\sim 1500\text{ m}$ 内的频率比 >1 ,表明安宁河流域内中起伏山地有利于发生泥石流灾害;如图4(c)所示,地貌演化阶段处于中年期($0.35\sim 0.45$)的频率比 >1 ,泥石流灾害容易发生。

(2) 地质、地震因子

根据地层岩性特征结合工程地质岩组分类将安宁河流域的地层岩性划分为硬岩组、较硬岩组、

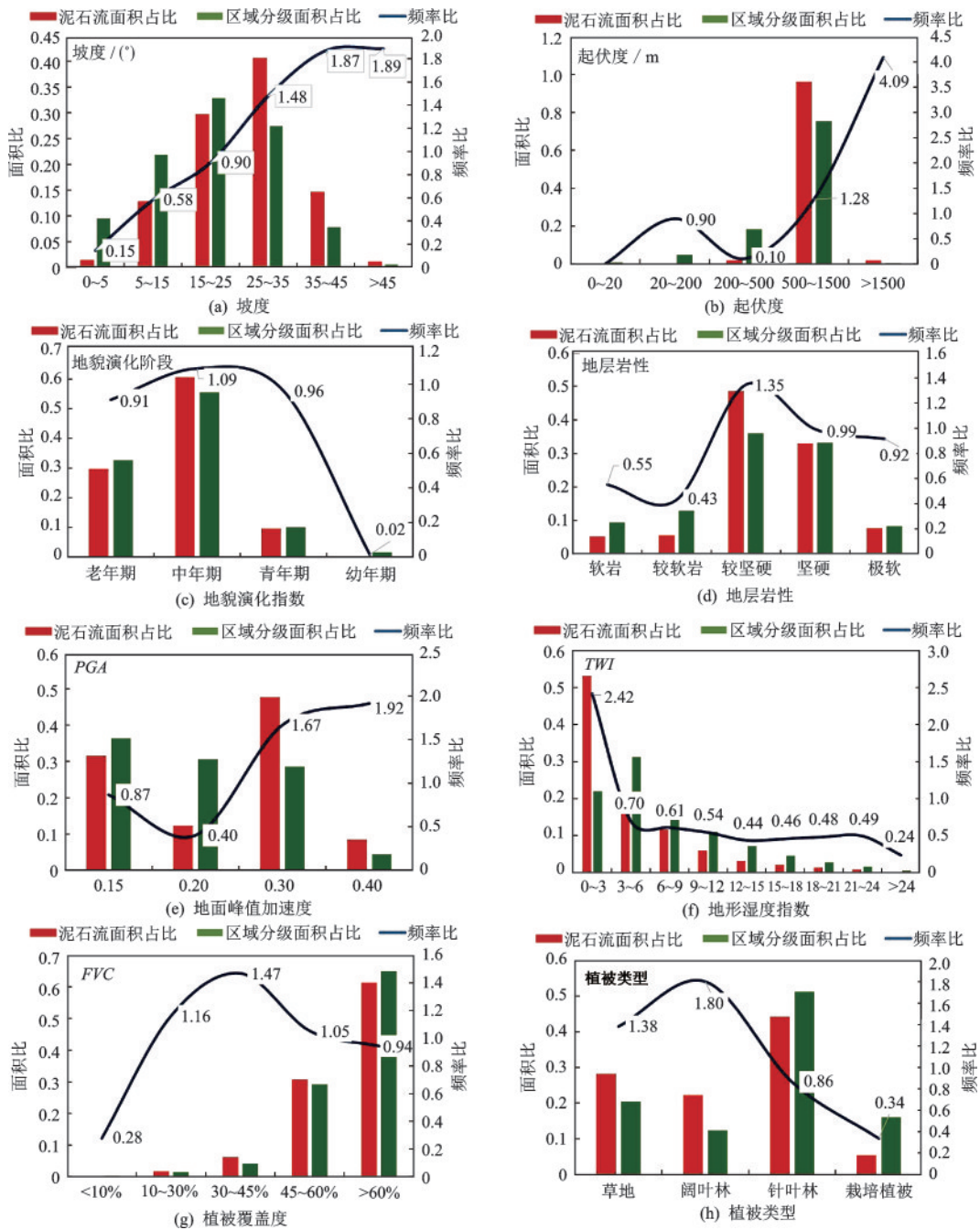


图4 评价因子频率比关系

Fig.4 The frequency ratio relation of the influencing factors

较软岩组、软岩组以及极软岩组5类,如图4(d)所示,较软岩、较坚硬岩频率比 >1 ,泥石流在安宁河流域较软岩、较坚硬岩区域内易发。较坚硬岩组在强断裂带活动与物理风化作用下出现大面积的松动与垮塌,在沟道内形成大面积的松散堆积物源,为泥石流的发生提供充足的物质条件。

如图4(e)所示,地面峰值加速度 $>0.20g$ 时,随着地面峰值加速度的增大,频率比出现增大趋势,表明地表受地震扰动的程度增大,泥石流灾害发生的概率也随之增加。

(3) 水文因子

从图4(f)可以看出,地形湿度指数 <3 ,频率比 >1 ,地形湿度指数较小的地方,多为山区坡陡处,易于泥石流灾害的发生;随着湿度指数增大,频率比值逐渐降低,坡度变缓,径流量大,更容易形成山洪灾害^[23],泥石流灾害在 $TWI<3$ 的区域易发生。

(4) 生态因子

生态因素主要包括植被类型和植被覆盖度。安宁河流域的植被类型在不同海拔高度空间内表现出极大的差异,如图4(g)所示,草地类型和阔叶林类型的频率比值 >1 ,表明安宁河流域草地与阔叶林区发育的泥石流更多。如图4(h)所示,对植被覆盖度因子分析发现,在中低覆盖度到中高覆盖度范围内的频率值 >1 ,易发生泥石流;植被覆盖度增加到45%及以上,泥石流的频率比例值减少。

4 安宁河流域泥石流易发性评价

4.1 确定性系数模型易发性评价

4.1.1 评价因子相关性分析

为保证评价因子之间的相互独立,通过计算容忍度(TOL)和方差膨胀因子(VIF)分析各评价因子之间的多重共线性,结果见表1。若 $VIF>10$,表明

表1 评价因子多重共线性诊断检测

Table 1 Multicollinearity diagnostic indices for influence factors

评价因子	TOL	VIF	评价因子	TOL	VIF
坡度	0.279	3.580	植被覆盖度	0.274	3.636
地形起伏度	0.247	4.055	植被类型	0.595	1.680
地貌演化指数	0.589	1.696	峰值加速度	0.973	1.027
地层岩性	0.850	1.176	地形湿度指数	0.950	1.053

注: TOL 为容忍度, VIF 为方差膨胀因子

因子之间存在严重的多重共线性,表1结果表明,所选评价因子之间不存在严重的多重共线性,所有因子均可参与模型计算。

4.1.2 泥石流易发性分区

通过统计不同评价因子分级下的泥石流流域面积,分级区域面积等,利用确定性系数模型公式计算出各评价因子下不同分类级别的确定性系数值(CF),结果见表2。

基于ArcGIS自然间断法将安宁河流域易发性划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区以及极低易发区5个等级。分区结果如表3和图5所示,极高易发区主要分布在西昌市、冕宁县等安宁河流域沿线两岸以及断层密集的地区。

4.2 基于地理探测器-确定性系数的易发性评价

4.2.1 基于地理探测器的评价因子贡献度计算

基于ArcGIS统计各影响因子与泥石流流域面积分布占比的相关叠加数据,根据式(2)利用地理探测器计算得到安宁河流域泥石流影响因子相对重要性,依据分析结果发现各影响因子对泥石流发育的贡献值由大到小依次为:地面峰值加速度(21.7%)、地形起伏度(19.9%)、坡度(19.2%)、地层岩性(16.3%)、植被覆盖度(15.8%)、植被类型(3.6%)、地形湿度指数(2.3%)以及地貌演化指数(1.3%)。地面峰值加速度、地形起伏度以及坡度3个影响因子对泥石流的贡献率达到了60.8%,表明安宁河流域内泥石流的发育主要受地质和地形因子的影响。

4.2.2 泥石流易发性分区

根据式(1)、(2)分别对安宁河流域泥石流评价因子分级进行将隶属度值计算与地理探测器计算结果进行加权分析,计算 $CF-GD$ 耦合模型的泥石流易发性的概率分布图,将安宁河流域划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区以及极低易发区5个区间,结果如图6所示。极高易发区同样显示分布在西昌市、冕宁县等安宁河流域沿线两岸以及断层密集的地区。

4.3 评价模型结果分析与验证

两种评价模型易发性分区结果所显示的泥石流易发性的分布趋势是一致的,安宁河流域内泥石流灾害发生的高易发区主要沿安宁河流域呈条带状分布。 CF 模型和 $CF-GD$ 耦合模型的易发性分区

表2 各评价因子分类级别确定性系数计算结果

Table 2 Results for different classification of influence factors of CF model

因子	分级	泥石流 面积/km ²	区域 面积/km ²	CF	因子	分级	泥石流 面积/km ²	区域 面积/km ²	CF	
坡度/(°)	0~5	29.19	1 165.23	-0.93	岩性	软岩	110.67	1 127.80	-0.74	
	5~15	266.65	2 679.08	-0.28		较软岩	117.76	1 533.61	-0.72	
	15~25	620.16	4 021.16	0.51		较坚硬	1 024.78	4 281.83	0.77	
	25~35	846.91	3 361.23	0.69		坚硬岩	696.26	3 947.44	0.56	
	35~45	304.22	954.52	-0.17		极软岩	162.07	995.06	-0.61	
植被 覆盖 度/%	<10	1.02	19.55	-0.99	地形 起伏 度/m	0~20	0.00	109.32	0	
	10~30	36.28	165.57	-0.924		20~200	0.04	618.03	-0.99	
	30~45	128.41	463.46	-0.718		200~500	34.99	2 310.67	-0.91	
	45~60	641.96	3 230.95	0.476		500~1 500	1 760.62	9 479.74	0.99	
	>60	1 280.60	7 195.16	0.853		>1 500	35.99	60.40	-0.90	
地形 湿度 指数	0~3	1 584.71	2 700.41	0.718	地面 峰值 加速度	0.1	0	0	-1	
	3~6	647.52	3 835.67	0.30		0.15	656.36	4 173.11	0.35	
	6~9	347.06	2 340.32	-0.46		0.2	256.09	3 505.77	0.53	
	9~12	177.33	1 347.76	-0.67		0.3	992.18	3 279.71	0.76	
	12~15	93.66	885.27	-0.83		0.4	175.98	511.96	0.57	
	15~18	62.75	566.03	-0.88		地貌 演化 阶段	老年期	615.36	3 641.19	0.46
	18~21	40.22	343.41	-0.92			中年期	1 254.11	6 191.15	0.85
	21~24	24.13	201.02	-0.95			青年期	199.78	1 118.63	0.53
>24	3.41	59.67	-0.99	幼年期	0.55		189.72	0.32		
植被 类型	草地	586.92	2 305.82	0.42						
	阔叶林	462.61	1 393.61	0.21						
	针叶林	920.28	5 789.75	0.71						
	栽培	111.86	1 809.46	-0.97						

注: CF为确定性系数,下同

表3 不同模型预测结果对比

Table 3 Comparison between the prediction results of different models

易发区分类	CF模型		CF-GD耦合模型	
	分区面积/km ²	分区面积占比/%	分区面积/km ²	分区面积占比/%
极高易发区	979.80	8.87	1 069.16	9.67
高易发区	1 020.16	9.23	1 328.33	12.02
中易发区	2 264.58	20.47	3 106.21	28.11
低易发区	4 177.59	23.60	4 649.12	8.12
极低易发区	2 607.87	37.81	897.19	42.07

面积占比相近,耦合模型的极高、高、中以及极低易发区的面积占比均高于单独CF模型,低易发区面积占比明显低于CF模型。

通过安宁河流域内实际发生的灾害事件进行结果验证。如图7所示,2020年6月23日曹古乡发生的泥石流灾害区域位于易发性分区的高易发区范围内;泥石流灾害事件频发热水河流域也位于易发性分区的极高易发区范围内,表明结果与实际具有较高的吻合度。

ROC曲线被广泛用于泥石流易发性及风险评

价的精度验证^[24-26]。通过计算ROC曲线下的面积(AUC)表示准确率。AUC数值越大,准确率越高。泥石流灾害易发性评价中各等级内实际发生泥石流灾害面积的累加百分比表示真阳性率,泥石流灾害易发性评价中各等级面积的累加百分比表示假阳性率^[22]。结果如图8所示,确定性系数模型和确定性系数-地理探测器耦合模型的AUC值分别为0.786、0.824,两种模型计算的AUC值均大于0.7,说明模型结果都具有较高的可信度,CF-GD耦合模型较单一CF模型精度提高约4.8%。

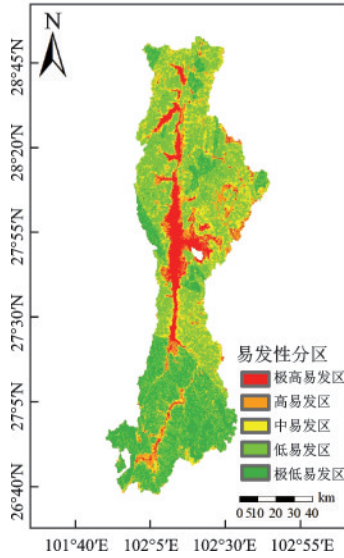


图5 基于CF模型的泥石流易发性分区
Fig.5 Debris flow susceptibility map based on CF model

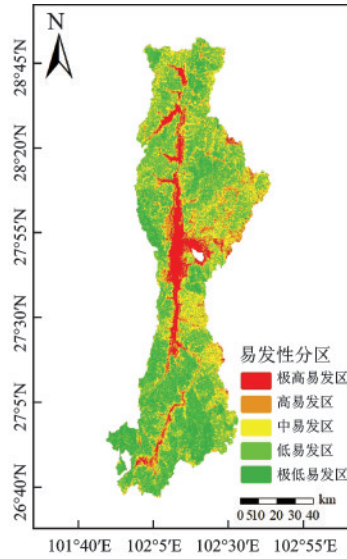


图6 基于CF-GD耦合模型的泥石流易发性分区
Fig.6 Debris flow susceptibility map based on CF-GD model

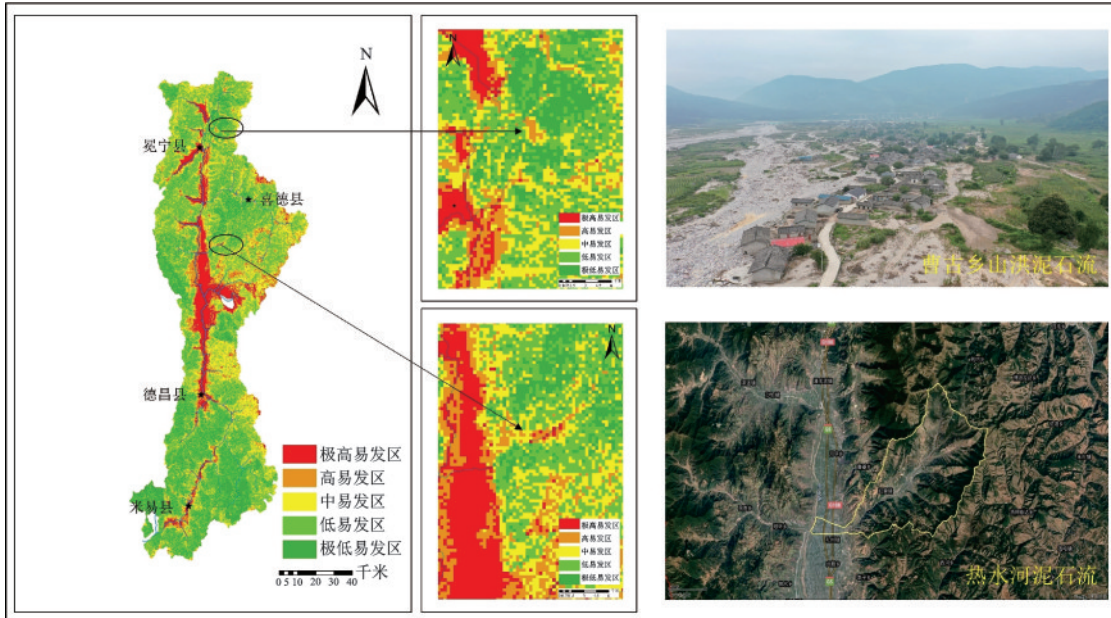


图7 典型泥石流灾害验证
Fig.7 The validation of typical debris flow

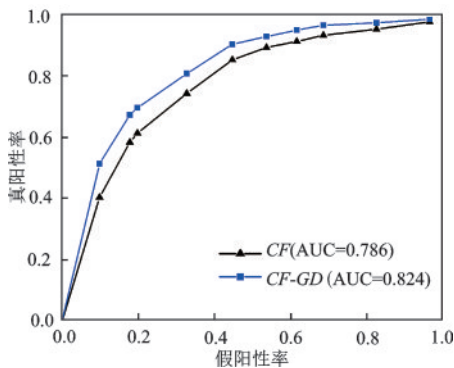


图8 ROC曲线验证
Fig.8 Verification by the ROC curve

5 讨论与结论

5.1 讨论

目前针对泥石流易发性评价方法主要以定性分析和定量分析为主,相比于专家打分法等定性分析方法,确定性系数等定量分析方法的优点主要体现在减少了主观因素的影响。本文中耦合确定性系数模型与地理探测器模型,可以高效地计算不同分级因子对灾害发育的贡献值和影响因子对灾害

发育的解释力,与单一模型评价结果相比,耦合模型评价精度有所提升,弥补了单一模型只能判断影响因子在分级上对灾害发育贡献度的不足。耦合模型可分析泥石流灾害与不同评价因子之间的非线性关系。这种方法主要对泥石流样本数据的完整性要求较高,且现阶段评价在区域尺度开展,对于评价因子的选取还是建立在地质、地貌、降水等基础数据,未涉及灾害形成的机理因子,使评价结果受到数据精度和数据量的影响,无法完全反映灾害形成与评价因子之间的内在联系。后续研究中,将考虑将机理因子纳入评价体系,利用耦合模型进一步提高模型评价精度。

5.2 结 论

(1)评价因子频率比值分析发现,安宁河流域内泥石流在坡度 $>25^\circ$,中起伏山地以及中年期地貌演化阶段的地形地貌区域发生概率更大;数据同样表明安宁河流域内的泥石流在地面峰值加速度较高、地形湿度指数较低以及草地和阔叶林区域内更容易发生。

(2)利用地理探测器模型对安宁河流域内泥石流发育影响因子的贡献度进行分析,其重要性依次为:地震峰值加速度、地形起伏度、坡度、地层岩性、植被覆盖度、植被类型、地形湿度指数以及地貌演化指数。可以得出,历史地震和地貌特征在安宁河流域泥石流发育和分布起到控制性作用。

(3)采用CF和CF-GD不同模型对安宁河流域内泥石流易发性评价,将安宁河流域泥石流划分为极高易发区、高易发区、中等易发区、低易发区以及极低易发区,较低易发区面积占比最大;高易发区主要沿安宁河流域呈条带状分布,在冕宁县和西昌市分布密集。

(4)利用ROC曲线对评价模型准确度进行验证,确定性系数模型(CF)和确定性系数-地理探测器耦合模型(CF-GD)计算的曲线下面积AUC值分别为0.786,0.824,两种评价模型均能客观评价安宁河流域泥石流的易发性,且耦合模型较单一模型具有更高的准确率。

参考文献:

[1] Cui P, Hu K H, Zhuang J Q, et al. Prediction of debris-flow danger area by combining hydrological and inundation simulation methods[J]. Journal of Mountain Sci-

ence, 2011, 8(1): 1-9.

- [2] Leroi E. Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments[C]// VII International Symposium on Landslide Trondheim, [S.l.]: [s.n.], 1996: 35-52.
- [3] Kamp U, Growley B J, Khattak G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 631-642.
- [4] Ohlmacher G C, Davis J C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. Engineering Geology, 2003, 69(3): 331-343.
- [5] 李新坡,莫多闻.应用GIS和神经网络方法进行泥石流危险度评价的研究-以云南省为例[J].水土保持研究, 2005, 12(4): 7-9.
- Li X P, Mo D W. Application of GIS and ANN technology to evaluate the hazard degree of debris-taking Yunnan Province as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4): 7-9. (in Chinese)
- [6] 赵成,张永军,赵玉红.层次分析法在甘肃省地质灾害易发性评价中的应用[J].冰川冻土, 2009, 31(1): 182-188.
- Zhao C, Zhang Y J, Zhao Y H. Application of the hierarchical analytical methods to evaluating geological hazard tendency in Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 182-188. (in Chinese)
- [7] Liang W J, Zhuang D F, Jiang D, et al. Assessment of debris flow hazards using a Bayesian[J]. Geomorphology, 2012, (171-172): 94-100.
- [8] 胡瑞林,范林峰,王珊珊,等.滑坡风险评价的理论与方法研究[J].工程地质学报, 2013, 21(1): 76-84.
- Hu R L, Fan L F, Wang S S, et al. Theory and method for landslide risk assessment-current status and future development [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 76-84. (in Chinese)
- [9] 李秀珍,刘希林,苏鹏程.四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J].防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 426-430, 457.
- Liu X Z, Liu X L, Su P C. Assessment on regional debris flow hazardousness of anning river valley in Liangshan Prefecture, Sichuan [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 426-430, 457. (in Chinese)
- [10] 刘希林,倪化勇,苏鹏程.四川德昌县凉峰沟泥石流灾害特征及防治对策[J].灾害学, 2005, 20(3): 68-72.
- Liu X L, Ni H Y, Su P C. Characteristics of debris flow disaster in Liangfeng Gully of Dechang County, Sichuan and the Countermeasures [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 68-72. (in Chinese)
- [11] 杨光,徐佩华,曹琛,等.基于确定性系数组合模型的

- 区域滑坡敏感性评价[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1153-1163.
- Yang G, Xu P H, Cao C, et al. Assessment of regional landslide susceptibility based on combined model of certainty factor method[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1153-1163. (in Chinese)
- [12] Smith H G, Spiekermann R, Betts H, et al. Comparing methods of landslide data acquisition and susceptibility modelling: Examples from New Zealand[J]. Geomorphology, 2021, 381(3): 107660.
- [13] Ali S A, Parvin F, Vojteková J, et al. GIS-based landslide susceptibility modeling: comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(2): 857-876.
- [14] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 892-899.
- Ning N, Ma J Z, Zhang P, et al. Debris flow hazard assessment for the Bailongjiang River, Southern Gansu[J]. Resources Science, 2013, 35(4): 892-899. (in Chinese)
- [15] 程霄. 汶川映秀地区震后泥石流敏感性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Cheng X. Susceptibility assessment of debris flow after the earthquake in yingxiu area, wenchuan county [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 李益敏, 李取豪, 赵志芳. 基于确定性系数模型的泸州市泥石流易发性评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 336-342.
- Li Y M, Li Y H, Zhao Z F. Assessment on susceptibility of debris flow in lushui based on the certain factor model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 336-342. (in Chinese)
- [17] 许伟. 川西安宁河现代沉积物的环境质量演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Xu W. Recent deposition environmental quality Evolution of the anning river in western Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] Polat A, Erik D. Debris flow susceptibility and propagation assessment in West Koyulhisar, Turkey[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(11): 2611-2623.
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [20] 唐川. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究, 2005, 24(2): 178-185.
- Tang C. Susceptibility spatial analysis of debris flows in the Nujiang River Basin of Yunnan[J]. Geographical Research, 2005, 24(2): 178-185. (in Chinese)
- [21] 邹强, 唐建喜, 李淑松, 等. 基于水文响应单元的泥石流灾害易发性分区方法[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 496-505.
- Zou Q, Tang J X, Li S S, et al. Susceptibility assessment method of debris flows based on hydrological response unit[J]. Mountain Research, 2017, 35(4): 496-505. (in Chinese)
- [22] 张纪恺, 凌斯祥, 李晓宁, 等. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1595-1610.
- Zhang Q K, Ling S X, Li X N, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou County, Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1595-1610. (in Chinese)
- [23] 胡凯衡, 魏丽, 刘双, 等. 横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性研究[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2303-2313.
- Hu K H, Wei L, Liu S, et al. Spatial pattern of debris-flow catchments and the rainfall amount of triggering debris flows in the Hengduan Mountains region[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 2303-2313. (in Chinese)
- [24] 牛全福, 陆铭, 李月锋, 等. 基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 48-56.
- Niu Q F, Lu M, Li Y F, et al. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 48-56. (in Chinese)
- [25] 扈秀宇, 秦胜伍, 窦强, 等. 基于GIS和随机森林模型的泥石流敏感性分析—以吉林省洮南市北部山区为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 204-210, 217.
- Hu X Y, Qin S W, Dou Q, et al. Susceptibility analysis of debris flow based on gis and random forest—a case study of a mountainous area in Northern Taonan City, Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 204-210, 217. (in Chinese)
- [26] 吕江峰. 基于流域单元的永吉县泥石流敏感性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- Lyu J F. Susceptibility analysis of debris flow in Yongji County based on watershed units[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)