

基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价

孙 滨, 祝传兵, 康晓波, 叶 雷, 刘 益

Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province

SUN Bin, ZHU Chuanbing, KANG Xiaobo, YE Lei, and LIU Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价

王雷, 吴君平, 赵冰雪, 姚志强, 张乐勤 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 96-102

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204003

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.
SUN Bin, ZHU Chuanbing, KANG Xiaobo, *et al.* Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 119-127.

基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价

孙 滨^{1,2}, 祝传兵^{2,3}, 康晓波^{2,3}, 叶 雷⁴, 刘 益^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650093; 3. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 4. 云南滇湘矿业咨询有限公司, 云南昆明 650217)

摘要:以东川泥石流为研究对象, 选取高程、坡度、坡向、起伏度、曲率、工程岩组、距断层距离、距水系距离、土地利用类型 9 个影响因子, 以研究区 144 条泥石流为样本数据, 建立了东川泥石流易发性评价体系。基于 GIS 平台, 采用信息量模型计算各个评价指标状态分级的信息量值, 以小流域为评价单元使用自然间断法将研究区泥石流易发程度分为极高、高、中和低 4 个易发区等级。结果表明: 研究区极高易发区和高易发区发生泥石流灾害数量占比 94.44%, *AUC* 值为 0.876, 表明选取评价指标合理, 信息量模型适用于东川泥石流易发性评价研究。

关键词: 泥石流; 易发性评价; 信息量模型; 东川

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0119-09

Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province

SUN Bin^{1,2}, ZHU Chuanbing^{2,3}, KANG Xiaobo^{2,3}, YE Lei⁴, LIU Yi^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650093, China; 3. Yunnan Geological Environment Monitoring Institute, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Yunnan Dianxiang Mining Industry Consultants Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650217, China)

Abstract: In this paper, taking debris flow in Dongchuan as the research object, nine influence factors are chosen as the selected indices, including the elevation, slope, aspect, relief, curvature, engineering rock group, distance to faults, distance to faults rivers, and land use types, sample data from 144 debris flows in the study area are used to establish the Dongchuan debris flow susceptibility assessment system. Based on the information model and GIS platform, the information value of each factor classification is calculated, and the natural discontinuity method is used to divide the debris flow susceptibility into 4 levels: extremely high-prone areas, high-prone areas, medium-prone areas, and low-prone areas in the study area. The results show that the number of debris flow disasters in the extremely high and high-risk areas in the study area accounted for 94.44%, and the *AUC* value was 0.876, indicating that the selection of evaluation indicators was reasonable, and the information model was suitable for the evaluation of debris flow susceptibility in Dongchuan.

Keywords: debris flow; susceptibility assessment; information model; Dongchuan

收稿日期: 2022-04-04; 修订日期: 2022-05-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 孙 滨(1987-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要从事地质灾害区划研究。E-mail: sunbin0627@163.com

通讯作者: 刘 益(1979-), 男, 湖南岳阳人, 讲师, 主要从事水工环方面的教学和研究工作。E-mail: yiliu@kust.edu.cn

0 引言

泥石流作为我国自然灾害重要类型之一,具有暴发突然、波及范围广、破坏性大等特点。泥石流易发性评价也从最早的定性分析发展到定量分析,一直以来是国内外地质专家学者研究的热点^[1-2],其评价质量的好坏与评价指标的选取、评价模型的确定有着密不可分的关系^[3-8]。地形地貌、地质构造及人类活动等是泥石流易发性的主要影响因素,也成为其评价指标选取的重要参考依据^[9-10]。常用的泥石流易发性评价模型有专家系统模型(层次分析、专家打分)、数理统计模型(信息量、证据权和逻辑回归等)和机器学习模型(决策树、随机森林、神经网络和支持向量机等)^[11-18],这些模型各有所长,同时也存在一定的缺陷。相对于专家系统模型受人为因素影响明显、机器学习模型存在参数调试较难等问题,信息量模型作为《地质灾害风险调查评价技术要求》(1:50 000)(试行)推荐的方法具有操作简单、应用广泛和客观性好等优势,能够科学的对各指标区间分级^[19]。

东川区地质灾害发育,尤以泥石流分布广泛,危害最为严重,素有“世界泥石流天然博物馆”之称,是全国泥石流危害最严重的地区。据不完全统计,解放以来泥石流已造成人员伤亡 300 余人,直接经济损失近 4 亿元,并且对生态环境破坏明显,严重制约了东川经济与社会发展。因此,在东川建立科学合理的泥石流易发性评价模型,为泥石流精准防控提供支撑,意义重大^[20-21]。

文中在对东川区地质灾害详细调查成果系统梳理基础上,细致分析东川泥石流流域特征、动力学特性与形成机理等,选取坡度、坡向、起伏度、曲率、工程岩组、距水系距离、距断层距离和土地利用类型 9 个评价指标,基于信息量模型和 GIS 平台技术,以小流域为单元对东川泥石流进行了易发性评价,以期东川防灾减灾工作提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

东川区位于云南省昆明市最北端,面积 1 858.79 km²,属侵蚀剥蚀构造地貌,地势呈东西高中间河谷低、南高北低的特征,最大相对高差达 3 600 m。区域上属金沙江流域,区域年降水量 701~1 163 mm,降水量的 85% 以上集中在 5—10 月。区内地层岩性以元古代昆阳群碎屑岩分布最广,约占全区面积的 43.68%,古生代碎屑岩夹碳酸盐岩约占 19.10%,古生代玄武岩、中生代碎屑岩约占 32.36%,新生代黏土岩和松散碎石土等约占

4.86%。区内地质构造复杂,主构造线为南北向的小江断裂带。复杂的地形地貌、特殊的地质背景及独特的气候条件导致了东川泥石流频发。

通过收集东川区地质灾害详查、隐患排查和风险普查等数据,结合 InSAR 地质灾害隐患早期识别成果和精细化调查野外验证,系统梳理出研究区典型泥石流 144 条(图 1),以此作为样本数据,开展研究区泥石流易发性定量评价。

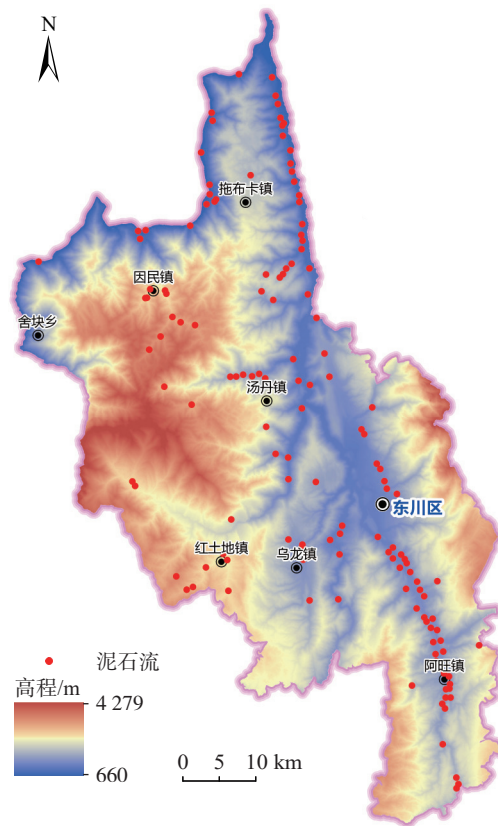


图 1 研究区泥石流灾害点分布

Fig. 1 Distribution of debris flow in study area

1.2 数据来源

DEM 数据收集自阿拉斯加卫星设备,制作高程、坡度、坡向、起伏度和曲率 5 个评价指标;水系数据收集自 OSM 并与 DEM 提取水系进行比对制作距水系距离评价指标;地质数据收集自全国地质资料馆东川幅、会理幅、曲靖幅和武定幅 20 万地质图^[22]制作工程岩组分类和距断层距离 2 个评价指标,土地利用数据收集自欧空局官网制作土地利用类型评级指标(表 1)。

2 研究方法

2.1 流域单元划分

泥石流易发性常用栅格作为评价单元,虽易于划分和模型计算,但忽略其流域特性,不能有效反映真实的

表 1 数据来源及类型
Table 1 Data source and types

基础数据	评价因子	数据来源及制作	数据格式
DEM	高程	ASF (阿拉斯加 卫星设备)	12.5 m×12.5 m 栅格数据
	坡度		
	坡向		
	起伏度		
	曲率		
水系	距水系距离	DEM提取 Open Street Map	矢量数据
地质数据	工程岩组分类 距断层距离	全国地质资料馆	矢量数据
土地类型	土地利用类型	ESA WorldCover	10 m栅格数据
灾害点	泥石流数量	地质灾害详查、排查等	矢量数据

泥石流情况,无法建立合理的评价模型,得出精准的评价结果。文中以收集的 12.5 m×12.5 m 的 DEM 栅格数据为基础,利用 ArcGIS10.8 模型构建器将流域划分过程(填洼→流向→流量→提取河流网络→栅格河网矢量化→盆域分析→栅格转面)模块化,化繁为简,实现自动化生成流域,通过反复调整集水阈值,最终得到最符合实际的流域划分结果。将研究区划分为 961 个流域,其中平均流域面积为 1.94 km²,最大流域面积为 10.62 km²,最小流域面积为 0.44 km²。

2.2 信息量模型基本原理

信息量模型的理论基础是信息论^[23],运用概率论和数理统计的方法以信息熵的概念来分析各种评价指标作用下泥石流易发性的模型。通过各种评价指标与泥石流灾害点空间叠加分析,依托 GIS 平台计算其单个指标信息量,然后进行多个指标的加权叠加得到综合信息量,从而建立泥石流易发性评价模型,其信息量值越大,表明易发性越高。

$$I = \sum_{j=1}^n \ln \frac{N_j/N}{S_j/S}$$

(1)

式中: I ——各种评价指标加权的总信息量,可作为泥石流易发性指数;

- N_j ——单个评价指标特定分级区间内含有泥石流的个数;
- N ——泥石流总数量;
- S_j ——单个评价指标特定分级区间内栅格数;
- S ——总栅格数。

3 研究区泥石流易发性评价

3.1 评价指标选取原则

泥石流的形成影响因素众多,其演化是一个复杂的

多因素耦合作用的地质过程。东川自 1961 年中科院建立野外观测站至今,对东川泥石流动力地貌过程与区域演化规律、运动学与动力学特征、流体物理力学与流变特性等方面取得了一系列国际先进水平成果。本文在系统分析东川泥石流触发因素基础上,结合大量专家学者泥石流易发性评价研究成果进行了评价指标的优选,选取坡度、坡向、起伏度、曲率、工程岩组、距水系距离、距断层距离和土地利用类型 9 个评价指标。

3.2 评价流程

首先通过 GIS 平台得到各评价指标的状态分级^[24-25],然后对其分级区间进行重分类,与泥石流灾害点图层进行空间叠加分析统计,计算各评价指标图层的的信息量值;采用栅格转面-空间连接-面转栅格实现将各评价指标的状态分级信息量值赋值到栅格图层中,运用空间分析工具叠加各评价指标的信息量栅格图层获取总信息量值,并按流域单元划分总信息量栅格图层,以子流域总信息量的平均值作为该子流域的信息量值,并按自然间断法对其进行重分类,实现研究区的泥石流易发性分区。

3.3 评价指标状态分级

因各评价指标的状态分级对信息量模型精度影响较大,科学合理划分其状态分级至关重要。文中在处理各评价指标状态分级时首先采用自然间断法一般将其细分为 10~15 级,与泥石流灾害点图层进行叠加分析,得出其信息量值,然后优先将信息量值为零的分级与相邻分级合并,接着将信息量值相近的分级与相邻分级合并,最后计算归并后的分级信息值,从而实现最优各评价指标状态分级(图 2、表 2)。

(1) 高程

以研究区 12.5 m 精度的 DEM 栅格数据为基础,最高点为拱王山雪岭,海拔 4 344 m,最低点位于金沙江与小江交汇处,海拔 660 m,高差大于 3 600 m。以 660~4 344 m 为区间,将高程分为 5 级,见图 2(a)。泥石流主要分布在 660~3 000 m,占泥石流总数量的 84.34%,见图 3(a)。

(2) 坡度

从 0°起,以 10°为间隔,将坡度分为 5 级,见图 2(b)。泥石流点在坡度各分级均有分布,主要集中在 20°~40°,见图 3(b)。

(3) 坡向

将坡向划为 10 个分级,见图 2(c)。泥石流在南、西南、东南方向比例为 34.57%,在北、北西、北东方向为 37.93%,可见泥石流在北坡比例大于南坡,见图 3(c)。

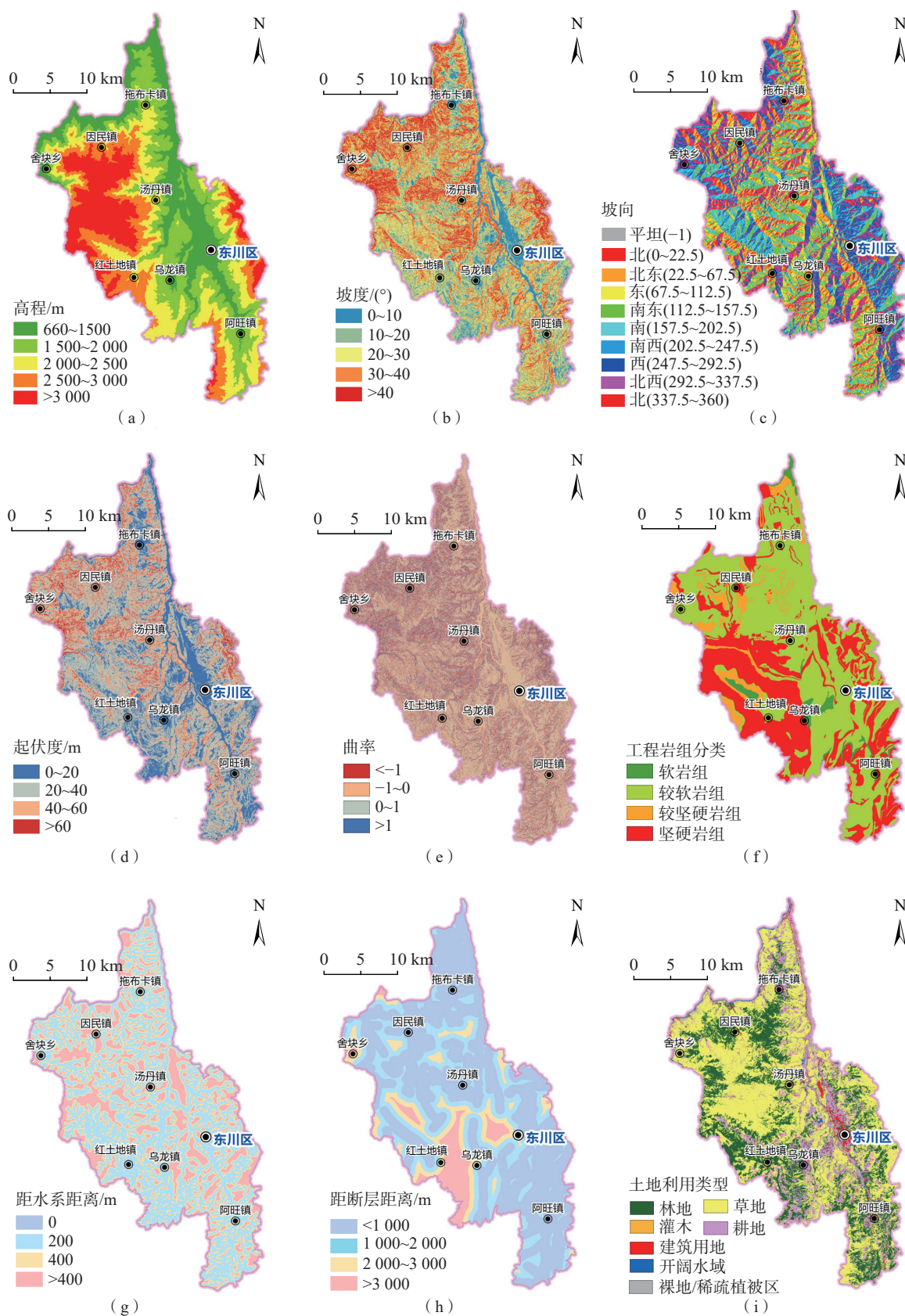


图 2 各评价因子状态分级图

Fig. 2 State classification of the factors

表 2 各因素状态信息量表
Table 2 Weighted information values of each factor

指标因子	分级	泥石流点比例	信息量值	指标因子	分级	泥石流点比例	信息量值
高程/m	660 ~ 1 500	0.203 3	1.238 744	曲率	-38 ~ -1	0.213 9	-0.131 543
	1 500 ~ 2 000	0.259 8	-0.577 567		-1 ~ 0	0.311 4	0.430 833
	2 000 ~ 2 500	0.220 9	-1.380 367		0 ~ 2	0.383 8	-0.205 470
	2 500 ~ 3 000	0.159 4	-0.831 065		>2	0.090 9	-1.473 365
	>3 000	0.156 6	-1.729 497	工程岩组	软岩组	0.027 7	1.255 712
坡度/(°)	0 ~ 10	0.113 7	1.315 538		较软岩组	0.564 7	0.067 643
	10 ~ 20	0.213 3	0.545 702		较坚硬岩组	0.069 3	-0.220 774
	20 ~ 30	0.282 1	-0.871 237		坚硬岩组	0.338 3	-0.330 859
	30 ~ 40	0.255 3	-1.206 583	距水系距离/m	0	0.003 7	1.322 303
	>40	0.135 6	-2.278 888		200	0.502 2	0.624 230
坡向	平坦(-1)	0.001 1	0.000 000		400	0.278 6	-1.899 977
	北(0 ~ 22.5)	0.063 8	0.084 068		>400	0.215 5	-3.435 165
	北东(22.5 ~ 67.5)	0.126 8	0.353 573	距断层距离/m	<1 000	0.612 6	0.183 653
	东(67.5 ~ 112.5)	0.136	0.392 672		1 000 ~ 2 000	0.227 7	-0.445 741
	南东(112.5 ~ 157.5)	0.126 6	-0.337 806		2 000 ~ 3 000	0.093 3	0.041 246
	南(157.5 ~ 202.5)	0.107 2	-0.791 193		>3 000	0.066 4	-1.158 486
	南西(202.5~247.5)	0.111 9	-0.214 621	土地利用类型	林地	0.283 9	0.184 122
	西(247.5 ~ 292.5)	0.137 9	0.269 687		灌木	0.002 4	-1.048 475
	北西(292.5 ~ 337.5)	0.126 9	-0.266 767		草地	0.487 7	0.955 946
起伏度/(°)	北(337.5 ~ 360)	0.061 8	-0.394 293		耕地	0.116 6	-0.437 008
	0 ~ 20	0.263 9	1.006 637		建筑用地	0.023 0	-1.937 148
	20 ~ 40	0.408 4	-0.577 548		裸地/稀疏植被区	0.082 2	-0.994 439
	40 ~ 60	0.246 5	-1.960 151		开阔水域	0.004 2	-0.514 259
	60 ~ 441	0.081 2	-1.766 161				

(4)地形起伏度

地形起伏度可以直观的反映山体的相对高差,是划分地貌类型的一个重要指标,同时还能有效地体现人类活动与地质灾害发育程度的相关性。借助 ArcGIS 平台提取出研究区地形起伏度在 0 ~ 441 m,分为 0 ~ 20 m 平坦起伏、20 ~ 40 m 微起伏、40 ~ 60 m 小起伏,>60 m 较大起伏 4 个分级,见图 2(d)。泥石流在微起伏占比最高,为 40.84%,见图 3(d)。

(5)曲率

曲率主要是用来反映地形弯曲程度的指标,将曲率划为 4 个分级,见图 2(e)。泥石流主要分布在曲率 -1 ~ 2,占泥石流总数量的 69.52%,见图 3(e)。

(6)工程岩组分类

以研究区 20 万地质图为基础,根据地层岩性的工程地质特性,将研究区工程岩组划分为 4 大类,见图 2(f)。泥石流主要分布在较软岩组内,占泥石流总数量的 56.47%,见图 3(f)。

(7)距水系距离

研究区水系发育,分布有小江流域和普渡河流域,

均属金沙江水系。以研究区内河流为中心作 200 m、400 m、>400 m 缓冲区分析,见图 2(g)。结果表明,在距河流 400 m 范围内泥石流点分布集中,占泥石流总数量的 78.08%,见图 3(g)。

(8)距断层距离

研究区位于川滇菱形块体内部小江断裂与普渡河断裂夹持地带,断层发育。以研究区 1 : 20 万构造纲要图为基础,以断层为中心作 1 km、2 km、3 km、>3 km 缓冲区分析,见图 2(h)。分析表明泥石流主要位于断层 0 ~ 2 km 范围内,占比 84.03%,见图 3(h)。

(9)土地利用类型

土地利用数据采用欧空局(ESA)发布的 2020 年 10 m 分辨率的全球土地利用(World Cover)数据。研究区土地利用主要包括林地、灌木、草地、耕地、建筑用地、裸地/稀疏植被区和开阔水域 7 类,见图 2(i)。泥石流主要集中分布在林地、草地和耕地内,占比 88.82%,见图 3(i)。

3.4 基于 GIS 的信息量计算和易发性评价

评价指标体系建立完成后,基于 GIS 平台将各评价

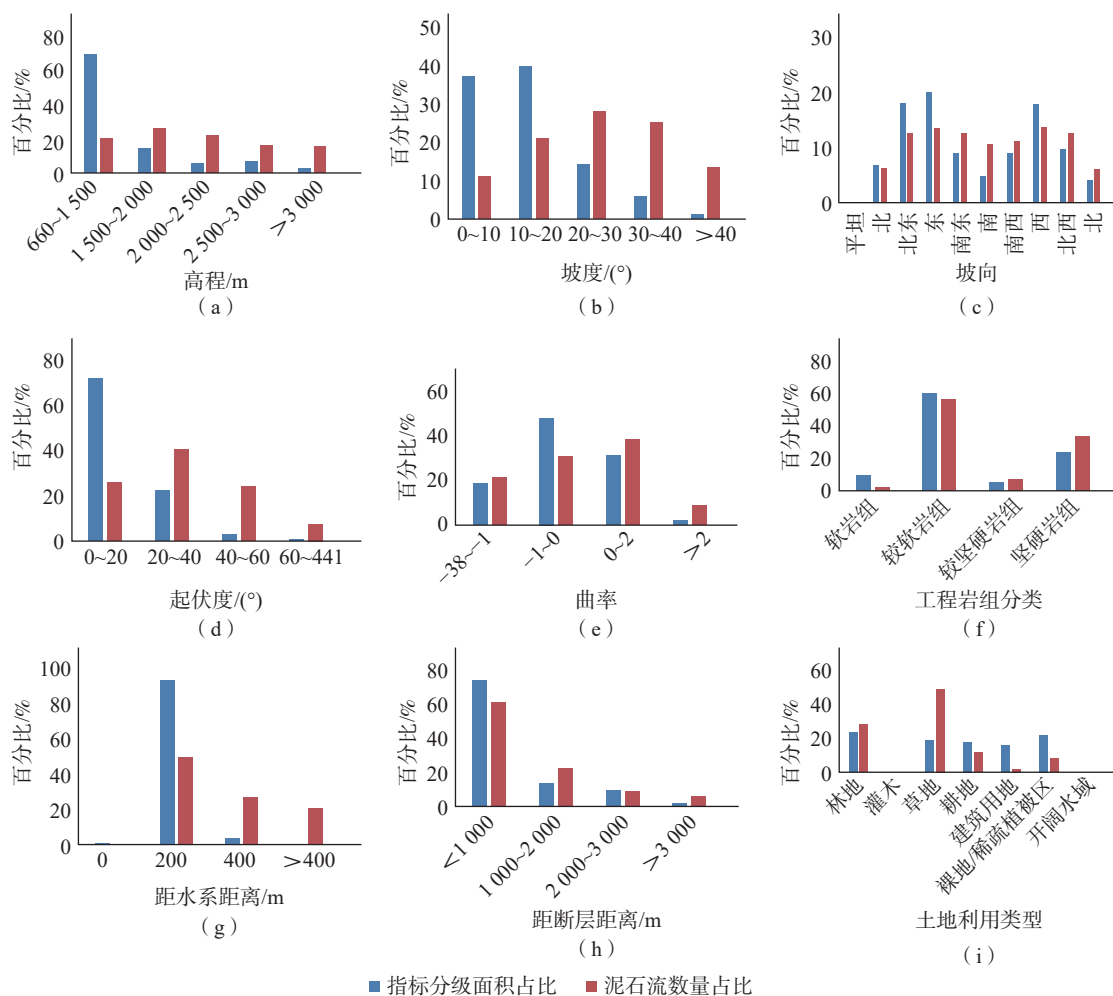


图 3 各指标分级分区面积和泥石流数量相关性统计图

Fig. 3 Statistical charts of correlation between the area of factor and the number of debris flow points

指标状态分级(图 2)与泥石流灾害点进行空间叠加分析,得出各评价指标状态分级区内泥石流分布数量(图 3),根据信息量模型公式进行各评价指标信息量值计算,然后通过栅格叠加分析计算总信息量值,以自然间断法将其划分为 4 个等级,得到研究区泥石流易发性分区图,见图 4(a)。低易发区 $[-14.15, -5.60]$ 、中易发区 $[-5.60, -2.72]$ 、高易发区 $[-2.72, 0.42]$ 及极高易发区 $[0.42, 8.10]$, 占东川区全域栅格比例为 18.49%、32.43%、33.30% 和 15.78%, 其灾点占栅格频率比分别为 0.038、0.150、0.542、4.843, 极高易发区和高易发区内灾点频率比最高,符合客观事实。

3.5 基于小流域的信息量法易发性评价

目前泥石流易发性定量评价多采用直接以栅格单元为评价单元,往往会出现单条泥石流流域内存在不同的易发性分区,忽略了泥石流单元的整体性,与实际的环境不相符合,对指导泥石流的精准防控不利。为真实

反映泥石流的环境演变,解决单条泥石流流域内分区差异性,文中将基于栅格单元计算得来的泥石流易发性总信息量值以流域为单元进行划分,然后统计每个子流域范围内信息量值的平均值,作为研究区子流域单元信息量值,通过自然间断法将其划分为 4 个等级:低易发区 $[-7.85, -3.97]$ 、中易发区 $[-3.97, -2.25]$ 、高易发区 $[-2.25, -0.31]$ 及极高易发区 $[-0.31, 3.39]$, 得到研究区泥石流易发性分区图,见图 4(b)。

4 结果分析与精度评价

4.1 易发性结果分析

研究区泥石流极高易发区和高易发区主要集中在小江流域沿岸的阿旺镇、铜都镇、拖布卡镇一带分布,占全域面积的 37.27%, 其中著名的蒋家沟、大小白泥沟、大桥河沟以及城市后山 4 条沟均位于极高易发区,与历史泥石流灾害点吻合度较高。

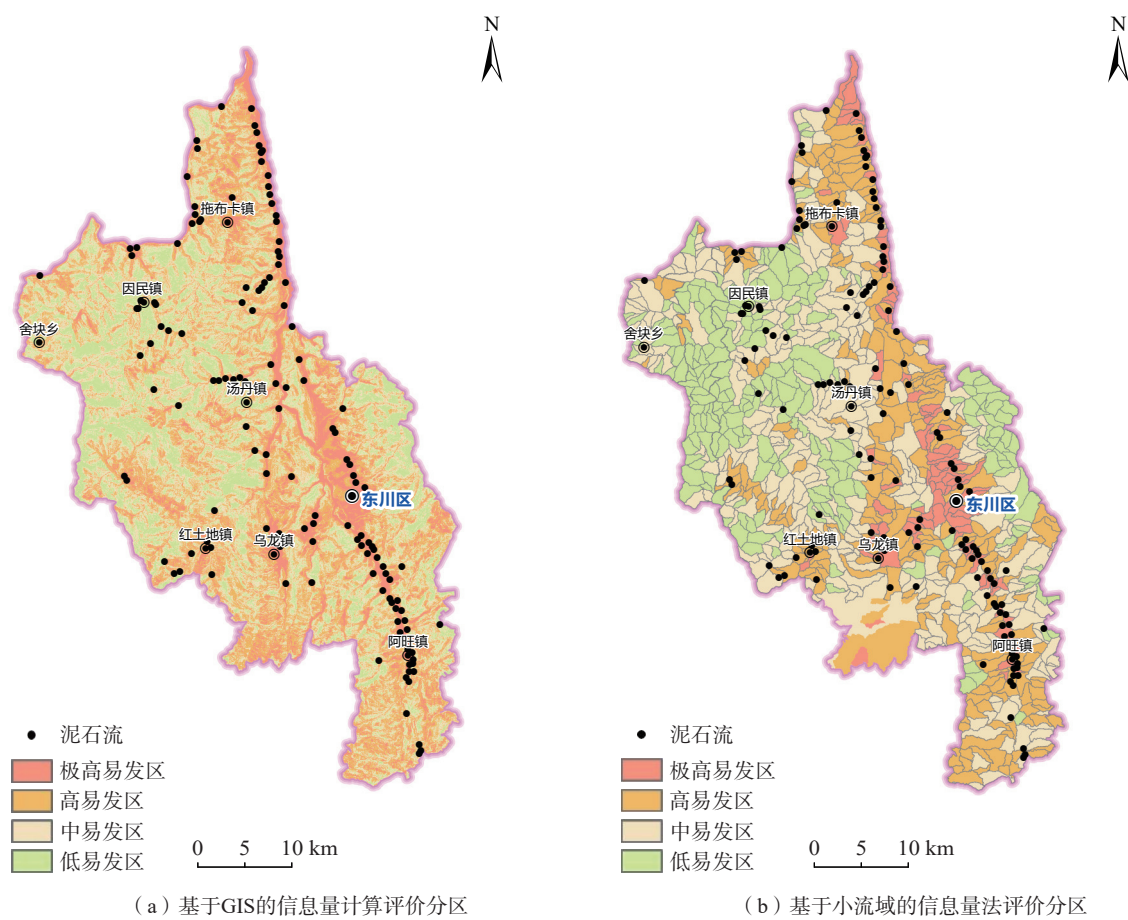


图 4 泥石流易发性分区图

Fig. 4 Zoning map of debris-flows susceptibility

极高易发区和高易发区内地质环境特征典型,主要表现在以下几点:(1)位于小江活动断裂附近,构造极为发育,地震频发;(2)工程岩组以较软岩组为主,受小江断裂等影响岩石极为破碎,为泥石流发生提供了物质来源;(3)地形陡峻,相对高差大,地貌以侵蚀剥蚀为主;(4)距离水系越近泥石流易发性越高;(5)主要集中在小江河谷一线,人类工程活动强烈,对地形地貌破坏作用明显。

4.2 易发性精度评价

文中采用深度学习二分类中常用评价模 ROC 型曲线进行检验,构建以易发性分区累计百分比为横轴,泥石流灾点数累计百分比为纵轴,曲线下面积(AUC)表示易发性预测成功率,其值越接近 1,代表准确率越高^[26-28]。本次采用的信息量模型 AUC 为 0.876,准确度较高(图 5)。

5 结论

(1)构建了云南东川泥石流易发性定量评价指标体系,对评价指标状态分级进行优化处理后发现:泥石流

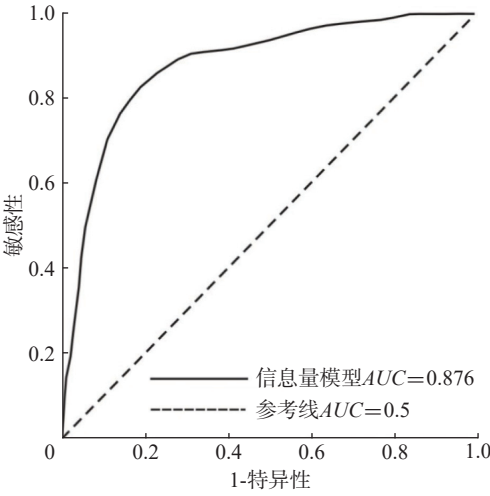


图 5 ROC 曲线

Fig. 5 The curve of receiver operating characteristic

主要分布在高程 660~3 000 m、坡度 20°~40°, 曲率 -1~2, 地形集中在微起伏地形,工程岩组主要以较软岩组为主,距河流 400 m 内,断层在 0~2 km,土地利用类型以林地、草地和耕地为主,而坡向对其影响不大。

(2)东川泥石流极高易发区和高易发区主要集中在小江流域沿岸的阿旺镇、铜都镇、拖布卡镇一带分布,占全域面积的 37.27%。

(3)通过信息量模型可以很好建立东川泥石流易发性定量预测模型,ROC 曲线检验模型 $AUC=0.876$,准确度较高,建模结果与历史泥石流灾害点吻合度较高,较好地揭示了研究区泥石流易发性特征,为东川防灾减灾工作提供参考。

文中在评价指标选取和状态分级过程中仍存在一些不足之处。评价指标选取和状态分级合并主观性较强,后续可引入类似 ROC 曲线等验证模型进行定量化评价,提高其合理性和科学性。

参考文献(References):

- [1] 岳溪柳,黄玫,徐庆勇,等.贵州省喀斯特地区泥石流灾害易发性评价[J].地球信息科学学报,2015,17(11): 1395-1403. [YUE Xiliu, HUANG Mei, XU Qingyong, et al. The susceptibility assessment of debris flow in karst region of Guizhou Province [J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(11): 1395-1403. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈剑,黎艳,许冲.金沙江干热河谷区泥石流易发性评价模型及应用[J].山地学报,2016,34(4): 460-467. [CHEN Jian, LI Yan, XU Chong. Susceptibility assessment model of debris flows in the dry-hot valley of the Jinsha River and its application [J]. Mountain Research, 2016, 34(4): 460-467. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王劲峰.中国自然灾害区划:灾害区划、影响评价、减灾对策[M].北京:中国科学技术出版社,1995. [WANG Jinfeng. Regionalization of hazards in China: Regionalization, assessment and strategies [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)]
- [4] 殷坤龙,朱良峰.滑坡灾害空间区划及GIS应用研究[J].地学前缘,2001,8(2): 279-284. [YIN Kunlong, ZHU Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of GIS [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(2): 279-284. (in Chinese with English abstract)]
- [5] DYMOND J R, JESSEN M R, LOVELL L R. Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 1999, 1(2): 122-131.
- [6] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 271-289.
- [7] TIEN BUI D, PRADHAN B, LOFMAN O, et al. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh Province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks [J]. Geomorphology, 2012, 171/172: 12-29.
- [8] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5): 1037-1054.
- [9] 胡凯衡,崔鹏,韩用顺,等.基于聚类和最大似然法的汶川灾区泥石流滑坡易发性评价[J].中国水土保持科学,2012,10(1): 12-18. [HU Kaiheng, CUI Peng, HAN Yongshun, et al. Susceptibility mapping of landslides and debris flows in 2008 Wenchuan earthquake by using cluster analysis and maximum likelihood classification methods [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 12-18. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 焦方谦,赵新生,陈川.证据权模型在泥石流灾害易发性评价中的应用[J].干旱区地理,2013,36(6): 1111-1124. [JIAO Fangqian, ZHAO Xinseng, CHEN Chuan. Debris flow hazard susceptibility evaluation application with weighted evidences model [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 1111-1124. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘磊,殷坤龙,王佳佳,等.降雨影响下的区域滑坡危险性动态评价研究——以三峡库区万州主城区为例[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3): 558-569. [LIU Lei, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Dynamic evaluation of regional landslide hazard due to rainfall: A case study in Wanzhou central district, Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 558-569. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘磊.三峡水库万州区库岸滑坡灾害风险评价研究[D].武汉:中国地质大学,2016. [LIU Lei. Assessment of landslide risk along Wanzhou area in Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [13] CHEN W, POURGHASEMI H R, KORNEJADY A, et al. Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques [J]. Geoderma, 2017, 305: 314-327.
- [14] ZHOU C, YIN K L, CAO Y, et al. Application of time series analysis and PSO-SVM model in predicting the Bazimen landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Engineering Geology, 2016, 204: 108-120.
- [15] TIEN BUI D, TUAN T A, KLEMPE H, et al. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: A comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree [J]. Landslides, 2016, 13(2): 361-378.
- [16] 吴孝情,赖成光,陈晓宏,等.基于随机森林权重的滑坡

- 危险性评价: 以东江流域为例 [J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 119–129. [WU Xiaoqing, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, et al. A landslide hazard assessment based on random forest weight: A case study in the Dongjiang River basin [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 119–129. (in Chinese with English abstract)]
- [17] PARK I, LEE S. Spatial prediction of landslide susceptibility using a decision tree approach: A case study of the Pyeongchang area, Korea [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(16): 6089–6112.
- [18] 庄育龙, 田原, 程楚云. 基于深度神经网络的滑坡危险性评价: 以深圳市为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(2): 104–110. [ZHUANG Yulong, TIAN Yuan, CHENG Chuyun. Landslide susceptibility assessment based on deep neural network: A case study of Shenzhen [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(2): 104–110. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. [WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: A case study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(4): 797–808. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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 Ruilin, FAN Linfeng, WANG Shanshan, 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 with English abstract)]
- [21] 程英建, 石豫川, 石胜伟, 等. 数量化理论在泥石流易发性预测中的应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(1): 140–145. [CHENG Yingjian, SHI Yuchuan, SHI Shengwei, et al. Prediction of debris flow occurrence based on the quantification theory [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(1): 140–145. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李晨阳, 王新春, 何春珍, 等. 全国 1: 200 000 数字地质图(公开版)空间数据库(V1) [DB]. 中国地质调查局发展研究中心, 中国地质调查局, 全国地质资料馆, 1957. [LI Chenyang, WANG Xinchun, HE Chunzhen, et al. China national digital geological map (public version at 1: 200000 scale) spatial database (V1) [DB]. Development and Research Center, China Geological Survey, China Geological Survey, National Geological Archives of China, 1957. (in Chinese)]
- [23] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价: 以重庆万州为例 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 991–996. [GAO Kechang, CUI Peng, ZHAO Chunyong, et al. Landslide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS information value method in the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 991–996. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等. 基于RS和GIS的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 221–229. [WANG Ningtao, PENG Ke, LI Qinghua, et al. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS & GIS analysis: A case study of Wufeng County, Hubei Province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 221–229. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 牛全福, 程维明, 兰恒星, 等. 基于信息量模型的玉树地震次生地质灾害危险性评价 [J]. *山地学报*, 2011, 29(2): 243–249. [NIU Quanfu, CHENG Weiming, LAN Hengxing, et al. Susceptibility assessment of secondary geological disaster based on information value methodology for Yushu earthquake region [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(2): 243–249. (in Chinese with English abstract)]
- [26] HOYER A, KUSS O. Meta-analysis of full ROC curves with flexible parametric distributions of diagnostic test values [J]. *Research Synthesis Methods*, 2020, 11(2): 301–313.
- [27] WALKER S P. The ROC curve redefined - optimizing sensitivity (and specificity) to the lived reality of cancer [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2019, 380(17): 1594–1595.
- [28] OMAR L, IVRISSIMTZIS I. Using theoretical ROC curves for analysing machine learning binary classifiers [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2019, 128: 447–451.