

基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价

白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 张世涛, 祝传兵, 康晓波, 孙 滨, 周琰嵩

Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kuming, China using the weight evidence method

BAI Guangshun, YANG Xuemei, ZHU Jieyong, ZHANG Shitao, ZHU Chuanbing, KANG Xiaobo, SUN Bin, and ZHOU Yansong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

安徽黄山市徽州地区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110-116

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146

基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价

$\${suggestArticle.titleEn}$

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203037

白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 等. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 128-138.

BAI Guangshun, YANG Xuemei, ZHU Jieyong, *et al.* Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kunming, China using the weight evidence method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 128-138.

基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价

白光顺^{1,2}, 杨雪梅³, 朱杰勇^{1,2}, 张世涛^{1,2}, 祝传兵^{2,4}, 康晓波^{2,4}, 孙 滨^{1,2}, 周琰嵩⁵

(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. 云南高正地信科技有限公司,
云南昆明 650041; 4. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216;
5. 云南南方地勘工程总公司昆明分公司, 云南昆明 650051)

摘要: 地质灾害易发性评价是国土空间规划和区域地质灾害防灾减灾的重要依据。为探索适合云南高原低山丘陵区地质灾害易发性评价方法, 论文选择云南省昆明市五华区为典型研究区, 选择工程地质岩组、距断裂构造线距离、高程、坡度、坡向、坡面曲率、距公路线距离和土地利用类型等 8 个因素, 应用基于贝叶斯理论的证据权法进行地质灾害易发性评价, 通过对各因素各分级(分类)综合证据权重的近似学生化检验 (*Student-T*) 优化了各因素的分级(分类)方案。采用文中所构建模型评价得出的易发性分区结果表明, 89.9% 和 9.1% 的地灾点落入高和中易发区, 对比分析显示建模结果与地质灾害发育情况吻合度高, 较好地揭示了研究区地质灾害易发性特征, 可为昆明市五华区及云南高原其它低山丘陵区地质灾害防治规划提供参考。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 高原低山丘陵区; 证据权法; 昆明市五华区

中图分类号: P208; P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0128-11

Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kunming, China using the weight evidence method

BAI Guangshun^{1,2}, YANG Xuemei³, ZHU Jieyong^{1,2}, ZHANG Shitao^{1,2}, ZHU Chuanbing^{2,4},
KANG Xiaobo^{2,4}, SUN Bin^{1,2}, ZHOU Yansong⁵

(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 Gaozheng Dixin Technology Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650041, China; 4. Yunnan Geological Environment Monitoring Institute, Kunming, Yunnan 650216, China; 5. Kunming Branch of Yunnan Nanfang Geological Survey Engineering Corporation, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: Geological hazard susceptibility assessment is an important basis for territorial space planning and geological hazard prevention and mitigation. In order to explore the evaluation method suitable for the geological hazard susceptibility of low hills and gullies in Yunnan plateau, Wuhua District of Kunming, Yunnan Province, China was selected as a typical study area. Eight factors including the engineering geology groups, distance from faults, elevation, slope, direction, curvature, distance from

收稿日期: 2022-03-24; 修订日期: 2022-05-12

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

第一作者: 白光顺(1986-), 男, 山东巨野人, 博士研究生, 主要从事工程地质理论和应用研究。E-mail: baiguangshun@foxmail.com

通讯作者: 杨雪梅(1989-), 女, 云南丽江人, 工程师, 主要从事工程地质、测绘等工作 and 应用研究。E-mail: yangxuemeilj@foxmail.com

roads and land use covers were selected, and the weight evidence method based on Bayesian theory was applied to evaluate the susceptibility of geological hazards. After performing the *Student-T* test of the comprehensive evidence weight of each factor, the classification scheme of factors were optimized. The results of vulnerability zoning based on the evaluation of the model established in this paper showed that 89.9% and 9.1% of the geological hazard points fall into high and medium susceptibility areas. The comparative analysis showed that the modeling results are highly consistent with the geological hazards distribution, which better reveals the characteristics of geological hazards susceptibility in the study area. It can provide reference for the planning of geological hazards prevention in Wuhua District and other low hills and gullies areas of Yunnan plateau.

Keywords: geological hazards; susceptibility assessment; low hills and gullies areas on plateau; weight evidence method; Wuhua District of Kunming

0 引言

查明与地质灾害有关的危险区域是地质灾害管理的重要工作,也是促进研究区人民生活 and 基础设施发展安全的重要依据^[1],基于建模评价地质灾害易发性是重要而且有效的途径。

应用经验式、数值模拟和统计方法对地质灾害易发性建模和评价,已经进行了许多研究^[1-10]。其中,经验式方法基于现场观察和专家经验判断;数值模拟计算边坡的稳定性;统计方法部分基于实地观察和专家的先验知识,部分基于对地质灾害发生的权重或概率的统计计算,这类方法使用统计技术来评估诱发地质灾害的各种因素的相关作用,每个因素的重要性都是根据观察到的与地质灾害的关系来确定的。

文中使用基于贝叶斯理论的证据权法,综合GIS技术评价研究区地质灾害易发性。证据权法是一种统计方法,最初应用于非空间、定量的医学诊断,以结合临床诊断的证据来预测疾病^[11-12]。在地球科学中,该方法被广泛应用,如:矿产资源潜力评估和矿床预测^[13-16],公路路基岩溶塌陷危险性评价^[17]和滑坡易发性和危险性^[1,3,18-23]。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

文中选择云南高原滇中昆明盆地低山丘陵地带这一云南省地质灾害防治重点地区的典型代表,云南省省会昆明市的主要行政区之一,昆明市五华区作为研究对象,该区地质灾害易发性评价研究具有典型代表性,可向整个云南高原昆明盆地低山丘陵区和其他低山丘陵区推广,具有技术方法和社会经济意义。研究区面积381.6 km²,地势西北高东南低,昆明盆地内地形开阔低缓,北部山区地形崎岖,沟壑较发育。区域年降水量的80%以上集中在6—9月,年平均降水量608.4~887.0 mm。

碳酸盐岩分布最广,约占全区面积的38.93%,其次为砂岩、泥岩、页岩,约占23.11%,岩浆岩主要为玄武岩,约占16.95%,主要分布在昆明盆地和其他小盆地的松散碎石土体约占11.36%,石英砂岩类约占7.56%,还发育一些岩脉;断裂构造较发育,以南北向构造为主^[24-25]。

1.2 数据收集

通过地质灾害风险普查获得了研究区地质灾害分布数据。根据调查分析,选择工程地质岩组、断裂构造、高程、坡度、坡向、坡面曲率、距公路距离和土地利用类型等8类因素纳入评价分析。地质数据收集自云南省地质局1:20万昆明幅、武定幅区域地质调查报告和图件^[24-25],12.5 m分辨率DEM(数字高程模型)收集自ASF,道路数据收集自OSM,土地利用类型数据收集自ESA(图1、表1)。

1.3 地质灾害发育特征

现状发育地质灾害89处,滑坡73处,崩塌11处,泥石流4条,地面沉降1处,为小—中型,无大型,中型14处,小型75处,主要分布在研究区低山丘陵地貌区,盆地内仅发育1处(图2)。

选择指标“因子面积百分比A”“地灾数百分比B”和“比率($\beta=B/A$)”表征地质灾害的空间分布特征、主控因素和成灾特征。 β 定义了地质灾害点在因素分级中相对于均匀分布的丰度, $\beta>1$ 表示相对丰度更高, $\beta<1$ 则相反。 $\beta>1$ 的因素分级有(图3、表2):高程1800~1850 m、1920~1950 m和1950~2000 m,坡度15°~25°、25°~35°和>35°,坡向北东、东、南东和北,坡面曲率-0.75~-0.28(凹形)、-0.28~-0.15(凹形)、-0.15~-0.05(凹形)和0.05~0.15(凸形),石英砂岩岩组和砂岩、泥岩、页岩岩组,距断层距离0~50 m、300~500 m和1000~2000 m,距主要公路距离0~50 m和50~100 m,草地和裸地/稀疏植被区域。这些因素分级内,发育了相对于均匀分布丰度更高的地质灾害,表征这些因素分级可能是研究区地质灾害的主控因素。

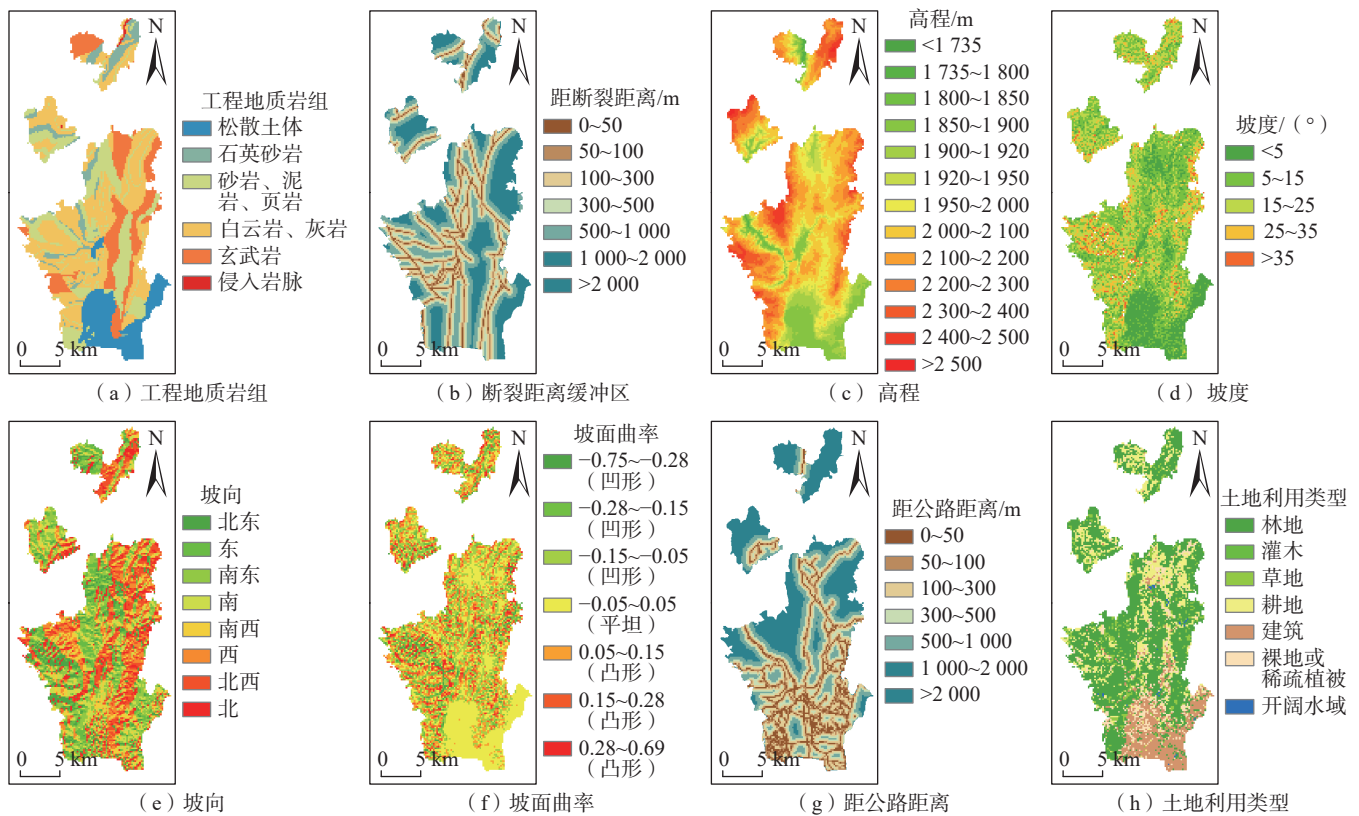


图 1 因素基础数据图

Fig. 1 Basic data charts of factors

表 1 数据简介

Table 1 Data introduction

数据	灾点及致灾要素	类型	来源
地灾	地灾点	矢量点	地质灾害风险普查
地质	工程地质岩组	矢量面	云南省地质局
	距断裂距离	矢量线和缓冲区	云南省地质局
地形地貌	高程	栅格	12.5 m DEM, https://asf.alaska.edu/
	坡度	栅格	根据DEM, 应用ArcGIS提取
	坡向	栅格	根据DEM, 应用ArcGIS提取
道路	距公路距离	矢量线缓冲区	http://www.openstreetmap.org , 根据矢量线用ArcGIS制作
	土地利用类型	栅格	ESA WorldCover 10 m 2020, https://esa-worldcover.org/en

2 方法

2.1 权重计算

把研究区栅格单元化, 利用条件概率计算证据因素图层所有单元对地质灾害发生的贡献权重^[13-15, 26-27]。定义 D 为已发生地质灾害的单元, \bar{D} 为未发生地质灾害的单元, B 为证据因素区内的单元, \bar{B} 为证据因素区外的单元。

证据因素 B 条件下 D 的条件(后验)概率为:

$$O(D|B) = O(D) \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (1)$$

式中: $O(D)$ ——证据因素 B 的先验概率, $O(D) = \frac{\text{事件将会发生的概率}}{\text{事件不会发生的概率}} = \frac{P(D)}{1 - P(D)} = \frac{P(D)}{P(\bar{D})}$;

$P(B|D)$ 、 $P(B|\bar{D})$ ——在地质灾害发生(D)和未发生(\bar{D})时, 证据因素 B 的条件概率, 取自然对数即是证据权重法中的正权重(证据因素存在区的权重值) W^+ 。

$$W^+ = \ln \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \quad (2)$$

$$P(B|D) = P(B \cap D) / P(D) \quad (3)$$

$$P(B|\bar{D}) = P(B \cap \bar{D}) / P(\bar{D}) \quad (4)$$

用 D 和 B 的单元数 N 可表示为:

$$P(B|D) = N(B \cap D) / N(D) \quad (5)$$

$$P(B|\bar{D}) = N(B \cap \bar{D}) / N(\bar{D}) \quad (6)$$

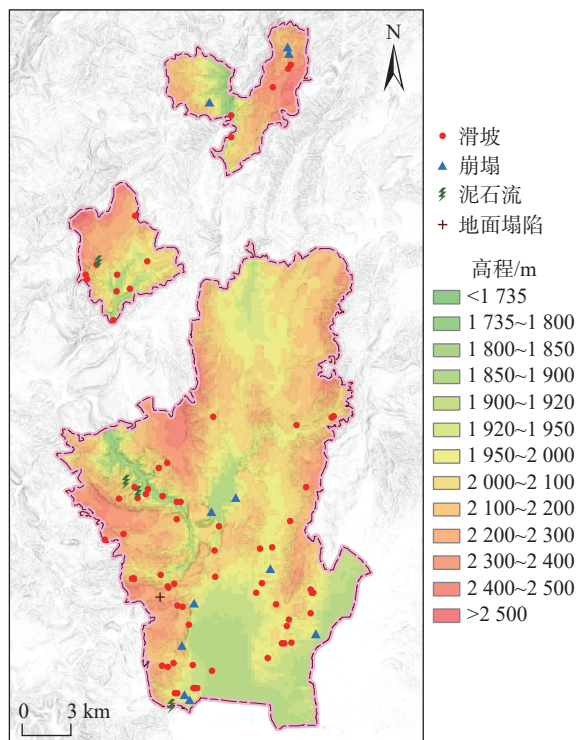


图2 地质灾害分布图(底图为高程和山体阴影渲染)

Fig. 2 Map of geological hazard distribution (The bottom was rendered by elevation and hillshade)

同式(1), 在证据因素不存在的情况下(\bar{B}), D 的条件概率(后验)为:

$$O(D|\bar{B}) = O(D) \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (7)$$

式中: $P(\bar{B}|D)/P(\bar{B}|\bar{D})$ ——取自然对数即是负权重(证据因素不存在区的权重值) W^- 。

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \quad (8)$$

同式(3)—(6):

$$P(\bar{B}|D) = N(\bar{B} \cap D) / N(D) \quad (9)$$

$$P(\bar{B}|\bar{D}) = N(\bar{B} \cap \bar{D}) / N(\bar{D}) \quad (10)$$

$N(B \cap D) + N(\bar{B} \cap D) = N(D)$, $N(B \cap \bar{D}) + N(\bar{B} \cap \bar{D}) = N(\bar{D})$, 所以式(2)和式(8)可写为:

$$W^+ = \ln \left(\frac{N(B \cap D)}{N(B \cap D) + N(\bar{B} \cap D)} / \frac{N(B \cap \bar{D})}{N(B \cap \bar{D}) + N(\bar{B} \cap \bar{D})} \right) \quad (11)$$

$$W^- = \ln \left(\frac{N(\bar{B} \cap D)}{N(B \cap D) + N(\bar{B} \cap D)} / \frac{N(\bar{B} \cap \bar{D})}{N(B \cap \bar{D}) + N(\bar{B} \cap \bar{D})} \right) \quad (12)$$

根据式(11)和(12), 使用 ArcGIS 空间分析工具执行权重 W^+ 和 W^- 计算。

W^+ 的大小表明证据因素的存在与地质灾害发生之间存在正相关关系。 W^- 表示负相关, 即证据因素存在抑制诱发地质灾害的作用。证据因素原始数据缺失区域的权重值取 0。两个权重之间的差异 $W_f = W^+ - W^-$, 即综合权重, 量化证据因素和地质灾害相关性大小。如果 W_f 为正, 则证据因素对地质灾害有利, 如果为负, 则对滑坡不利。如果 W_f 接近于零, 则表明证据因素与地质灾害的相关性不大。

2.2 因素分级(分类)的显著性测试

在上述权重值计算及分析的基础上, 实施证据因素分类的优选, 选择类间差异显著的证据因素类, 归并不显著的证据因素类。选择近似学生化检验 (*Student-T*) 统计值进行显著性测试^[15, 28]:

$$Student - T = W_f / \sigma_{W_f} = W_f / \sqrt{\sigma_{W^+}^2 + \sigma_{W^-}^2} \quad (13)$$

式中: σ_{W^+} 、 σ_{W^-} ——分别是 W^+ 和 W^- 的标准差;

W_f ——综合权重;

σ_{W_f} ——综合权重标准差。

当测试值的绝对值 $|Student - T|$ 为 1.96 和 2.326 时, 置信度达 97.5%、99%, 文中以 $|Student - T| = 2$ 作为阈值。先将证据因素划分为若干分级(分类), 计算权重和标准差、*Student - T*, 将 $|Student - T| < 2$ 的各分类视为显著性低并归为一类, 保留 $|Student - T| \geq 2$ 的因素分类, 然后重新计算归并后各分类的权重值。

2.3 证据综合

根据贝叶斯法则, 任一单元 K 为地质灾害的可能性, 即对数后验概率可表示为^[13-15, 26, 27]:

$$F = \ln O \left(D \mid \sum_{i=1}^n B_i^{K(i)} \right) = \sum_{i=0}^n W_i^K + \ln O(D) \quad (14)$$

式中: B_i ——第 i 个证据因素层;

$K(i)$ —— W_i 是第 i 个证据因素存在或不存在的权重, 在第 i 个证据因素层存在时是+, 不存在时是-。

最后计算后验概率:

$$P = O / (1 + O) = \exp(F) / (1 + \exp(F)) \quad (15)$$

后验概率的大小作为易发性高低的指标, 值越大表示易发性越高, 值越小表示易发性越低。

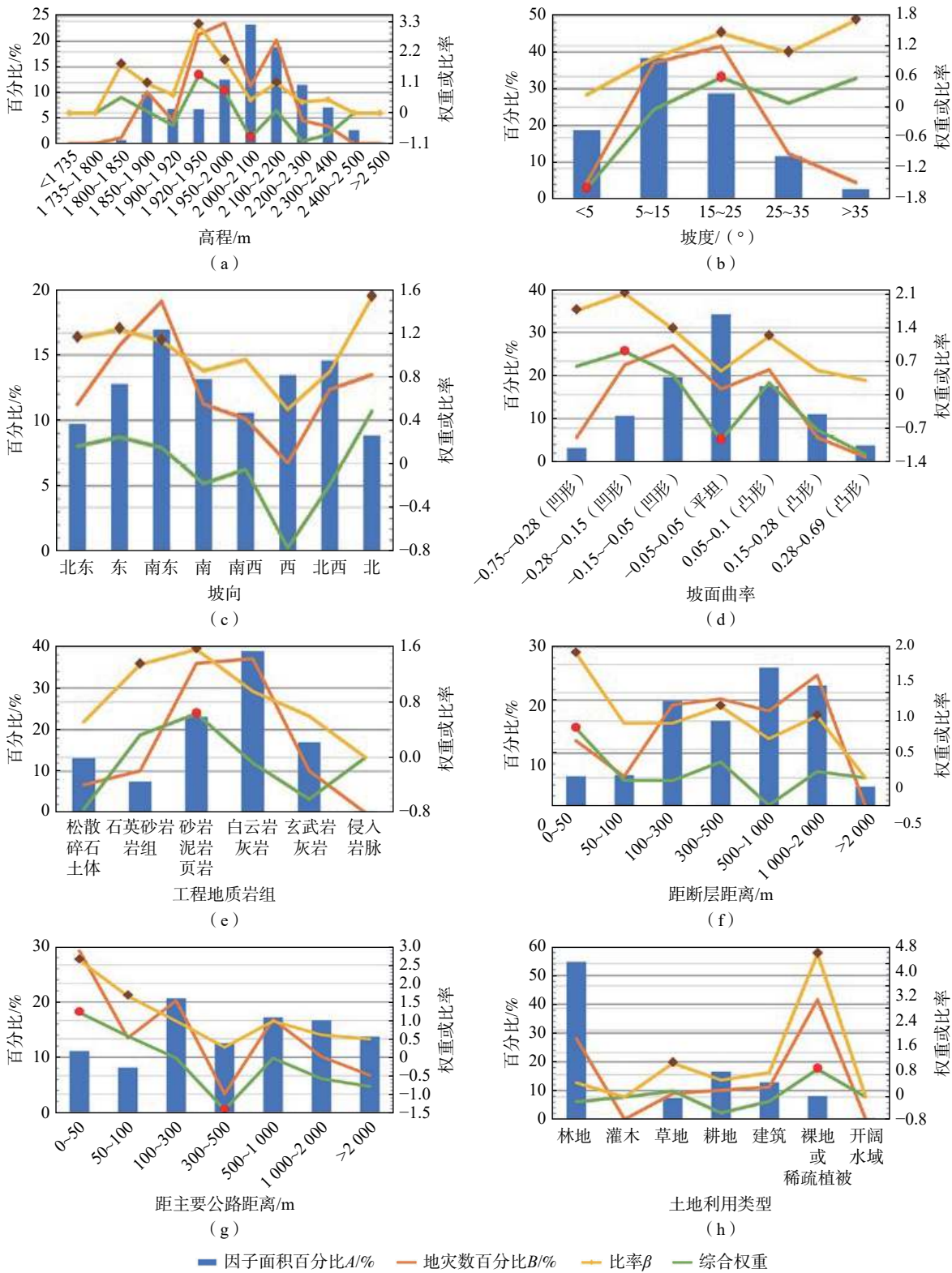
3 结果与讨论

3.1 证据权重计算结果和相关性分析

证据权重计算结果(表2、图4)与1.3节可相互印证。在地形高程方面, 1800~1850 m、1920~1950 m 和

1 950 ~ 2 000 m 段利于地质灾害发生, 正权重 0.555 0、1.175 8 和 0.643 9。>35° 和 15° ~ 25° 的山体斜坡较易于

地质灾害发生, 正权重 0.543 6 和 0.378 5。坡向因素各分级权重值均不高, 表明坡向对地质灾害发生的驱动作



注: ◆ 标识比率 $\beta > 1$ 的因子分级; ● 标识综合证据权重[Student-T] ≥ 2 的因子分级。

图 3 各因素分级分区和地灾点数量相关性统计图

Fig. 3 Statistical charts of correlation between the factors and the number of geological hazard points

用可能不太显著。坡面曲率结果显示, $-0.75 \sim -0.28$ (凹形)和 $-0.28 \sim -0.15$ (凹形)两个凹形坡分级段较易于地质灾害发生, 正权重 0.569 0 和 0.757 7。工程地质岩组各岩组分类的正权重值总体不高, 但砂岩、泥岩、页岩岩组的统计结果仍然表现出对地质灾害发生的较有利性, 其正权重 0.447 4, 高于排在第二位的石英砂岩岩组(正权重值为 0.294 7)。距断层距离和距主要公路距离

因素统计结果均显示出了较明显的距离效应, 即距断裂或主要公路远的地区与地质灾害发生负相关, 距断裂 0 ~ 50 m 和距主要公路 0 ~ 50 m、50 ~ 100 m 易于地质灾害发生, 其正权重 0.797 3、0.982 0 和 0.511 1。裸地或稀疏植被地区是易于地质灾害发生的区域, 其正权重 0.871 9。

表 2 因素证据权重计算结果表
Table 2 Calculation results of factor evidence weights

因素	因素分级	因素面积 百分比/%	地灾数 百分比/%	正权重 W^+	W^+ 的 标准差 σ_{W^+}	负权重 W^-	W^- 的 标准差 σ_{W^-}	综合权重 W_f	W_f 的 标准差 σ_{W_f}	$Student-T$	分类 归并	归并后 权重	权重 标准差
高程/m	<1 735	0.01	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.274 4	0.160 7
	1 735 ~ 1 800	0.36	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.274 4	0.160 7
	1 800 ~ 1 850	0.65	1.12	0.555 0	1.008 2	-0.004 8	0.107 1	0.559 8	1.013 8	0.552 2	合并	-0.274 4	0.160 7
	1 850 ~ 1 900	9.55	10.11	0.057 4	0.335 0	-0.006 3	0.112 3	0.063 6	0.353 3	0.180 1	合并	-0.274 4	0.160 7
	1 900 ~ 1 920	6.81	4.49	-0.418 6	0.501 5	0.024 8	0.109 0	-0.443 4	0.513 3	-0.863 9	合并	-0.274 4	0.160 7
	1 920 ~ 1 950	6.73	21.35	1.175 8	0.232 9	-0.172 0	0.120 0	1.347 8	0.262 0	5.144 4	4	1.175 8	0.232 9
	1 950 ~ 2 000	12.50	23.60	0.643 9	0.220 2	-0.136 8	0.121 8	0.780 7	0.251 6	3.103 2	5	0.643 9	0.220 2
	2 000 ~ 2 100	23.25	11.24	-0.731 8	0.316 9	0.146 8	0.113 1	-0.878 7	0.336 5	-2.611 0	13	-0.731 8	0.316 9
	2 100 ~ 2 200	18.86	20.22	0.070 8	0.236 9	-0.017 2	0.119 2	0.087 9	0.265 2	0.331 5	合并	-0.274 4	0.160 7
	2 200 ~ 2 300	11.48	4.49	-0.943 6	0.500 9	0.076 7	0.109 0	-1.020 3	0.512 6	-1.990 3	合并	-0.274 4	0.160 7
	2 300 ~ 2 400	7.02	3.37	-0.738 3	0.578 6	0.038 9	0.108 4	-0.777 2	0.588 7	-1.320 1	合并	-0.274 4	0.160 7
	2 400 ~ 2 500	2.61	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.274 4	0.160 7
>2 500	0.19	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.274 4	0.160 7	
坡度/(°)	<5	18.72	4.49	-1.429 7	0.500 6	0.162 0	0.109 1	-1.591 6	0.512 3	-3.106 8	5	-1.429 7	0.500 6
	5 ~ 15	38.32	37.08	-0.028 8	0.174 9	0.017 4	0.134 3	-0.046 2	0.220 5	-0.209 3	合并	0.022 1	0.145 0
	15 ~ 25	28.72	41.57	0.3785	0.165 5	-0.2023	0.139 2	0.580 8	0.216 3	2.685 3	3	0.378 5	0.165 5
	25 ~ 35	11.60	12.36	0.068 8	0.303 0	-0.009 3	0.113 8	0.078 2	0.323 7	0.241 6	合并	0.022 1	0.145 0
	>35	2.64	4.49	0.543 6	0.504 0	-0.019 5	0.109 0	0.563 2	0.515 7	1.092 1	合并	0.022 1	0.145 0
坡向	北东	9.72	11.24	0.146 0	0.317 9	-0.017 1	0.113 0	0.163 1	0.337 4	0.483 3	合并	-0.000 1	0.106 5
	东	12.77	15.73	0.210 7	0.268 8	-0.034 9	0.116 0	0.245 6	0.292 8	0.838 8	合并	-0.000 1	0.106 5
	南东	16.92	19.10	0.122 2	0.243 8	-0.026 8	0.118 4	0.149 0	0.271 0	0.549 6	合并	-0.000 1	0.106 5
	南	13.16	11.24	-0.159 2	0.317 5	0.022 1	0.113 0	-0.181 3	0.337 0	-0.537 9	合并	-0.000 1	0.106 5
	南西	10.57	10.11	-0.044 8	0.334 8	0.005 2	0.112 3	-0.050 0	0.353 2	-0.141 5	合并	-0.000 1	0.106 5
	西	13.45	6.74	-0.695 4	0.409 2	0.075 4	0.110 3	-0.770 7	0.423 8	-1.818 6	合并	-0.000 1	0.106 5
	北西	14.58	12.36	-0.166 7	0.302 7	0.025 9	0.113 8	-0.192 6	0.323 4	-0.595 5	合并	-0.000 1	0.106 5
	北	8.82	13.48	0.429 0	0.290 8	-0.052 9	0.114 5	0.481 9	0.312 5	1.542 3	合并	-0.000 1	0.106 5
坡面 曲率	$-0.75 \sim -0.28$ (凹形)	3.20	5.62	0.569 0	0.450 9	-0.025 5	0.109 6	0.594 5	0.464 0	1.281 2	合并	0.096 0	0.136 7
	$-0.28 \sim -0.15$ (凹形)	10.64	22.47	0.757 7	0.225 8	-0.143 2	0.120 9	0.900 9	0.256 2	3.517 1	1	0.757 7	0.225 8
	$-0.15 \sim -0.05$ (凹形)	19.66	26.97	0.319 7	0.205 4	-0.096 2	0.124 6	0.415 9	0.240 3	1.731 1	合并	0.096 0	0.136 7
	$-0.05 \sim 0.05$ (平坦)	34.18	16.85	-0.711 9	0.258 8	0.236 2	0.116 9	-0.948 2	0.284 0	-3.338 8	6	-0.711 9	0.258 8
	$0.05 \sim 0.15$ (凸形)	17.53	21.35	0.199 0	0.230 7	-0.047 8	0.120 1	0.246 8	0.260 1	0.948 9	合并	0.096 0	0.136 7
	$0.15 \sim 0.28$ (凸形)	11.00	5.62	-0.676 6	0.448 3	0.059 3	0.109 7	-0.735 9	0.461 5	-1.594 5	合并	0.096 0	0.136 7
	$0.28 \sim 0.69$ (凸形)	3.78	1.12	-1.219 4	1.001 4	0.027 5	0.107 1	-1.246 9	1.007 1	-1.238 1	合并	0.096 0	0.136 7
工程 地质 岩组	松散碎石土体	13.15	6.74	-0.673 6	0.409 2	0.072 0	0.110 3	-0.745 6	0.423 8	-1.759 2	合并	-0.184 4	0.132 9
	石英砂岩	7.55	10.11	0.2947	0.335 4	-0.028 3	0.112 3	0.323 0	0.353 7	0.913 1	合并	-0.184 4	0.132 9
	砂岩、泥岩、页岩	23.08	35.96	0.4474	0.178 1	-0.184 4	0.133 0	0.631 8	0.222 2	2.843 0	3	0.447 4	0.178 1
	白云岩、灰岩	38.88	37.08	-0.049 1	0.174 9	0.030 1	0.134 3	-0.079 3	0.220 5	-0.359 6	合并	-0.184 4	0.132 9
	玄武岩	16.94	10.11	-0.520 6	0.334 3	0.080 0	0.112 4	-0.600 5	0.352 6	-1.702 9	合并	-0.184 4	0.132 9
	侵入岩脉	0.29	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.184 4	0.132 9

续表 2

因素	因素分级	因素面积 百分比/%	地灾数 百分比/%	正权重 W^+	W^+ 的 标准差 σ_{W^+}	负权重 W^-	W^- 的 标准差 σ_{W^-}	综合权重 W_f	W_f 的 标准差 σ_{W_f}	$Student-T$	分类 归并	归并后 权重	权重 标准差
距断层 距离/m	0~50	5.63	12.36	0.797 3	0.304 6	-0.074 6	0.113 7	0.871 9	0.325 2	2.681 4	3	0.797 3	0.304 6
	50~100	5.86	5.62	-0.042 9	0.449 2	0.002 6	0.109 6	-0.045 5	0.462 4	-0.098 5	合并	-0.074 6	0.113 7
	100~300	19.87	19.10	-0.039 7	0.243 6	0.009 6	0.118 4	-0.049 3	0.270 9	-0.182 2	合并	-0.074 6	0.113 7
	300~500	16.11	20.22	0.229 9	0.237 1	-0.050 8	0.119 2	0.280 6	0.265 4	1.057 4	合并	-0.074 6	0.113 7
	500~1 000	26.12	17.98	-0.376 4	0.250 8	0.105 6	0.117 7	-0.482 0	0.277 0	-1.739 7	合并	-0.074 6	0.113 7
	1 000~2 000	22.75	24.72	0.084 0	0.214 3	-0.026 1	0.122 7	0.110 1	0.246 9	0.445 7	合并	-0.074 6	0.113 7
	>2 000	3.66	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.074 6	0.113 7
距主要 公路 距离/m	0~50	11.11	29.21	0.982 0	0.198 6	-0.229 6	0.126 5	1.211 6	0.235 4	5.146 9	3	0.982 0	0.198 6
	50~100	8.14	13.48	0.511 1	0.290 9	-0.060 5	0.114 5	0.571 6	0.312 6	1.828 4	合并	-0.125 7	0.129 6
	100~300	20.62	20.22	-0.019 6	0.236 8	0.005 0	0.119 2	-0.024 7	0.265 1	-0.093 1	合并	-0.125 7	0.129 6
	300~500	12.53	3.37	-1.319 5	0.578 1	0.100 5	0.108 4	-1.420 1	0.588 2	-2.414 4	4	-1.319 5	0.578 1
	500~1 000	17.21	16.85	-0.021 0	0.259 4	0.004 3	0.116 8	-0.025 3	0.284 5	-0.088 9	合并	-0.125 7	0.129 6
	1 000~2 000	16.67	10.11	-0.503 8	0.334 3	0.076 5	0.112 4	-0.580 3	0.352 7	-1.645 5	合并	-0.125 7	0.129 6
	>2 000	13.72	6.74	-0.715 3	0.409 2	0.078 5	0.110 3	-0.793 9	0.423 8	-1.873 3	合并	-0.125 7	0.129 6
土地 利用 类型	林地	54.70	28.09	-0.079 4	0.149 7	0.088 3	0.151 5	-0.167 6	0.213 0	-0.787 0	合并	-0.128 7	0.118 3
	灌木	0.14	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.128 7	0.118 3
	草地	7.39	8.99	0.197 9	0.355 6	-0.017 6	0.111 6	0.215 5	0.372 7	0.578 3	合并	-0.128 7	0.118 3
	耕地	16.54	10.11	-0.495 5	0.334 3	0.074 9	0.112 4	-0.570 4	0.352 7	-1.617 4	合并	-0.128 7	0.118 3
	建筑	12.82	11.24	-0.133 2	0.317 5	0.018 2	0.113 0	-0.151 4	0.337 0	-0.449 2	合并	-0.128 7	0.118 3
	裸地或稀疏植被	8.09	41.57	0.871 9	0.245 2	-0.128 7	0.118 3	1.000 6	0.272 3	3.674 6	4	0.871 9	0.245 2
	开阔水域	0.32	0.00	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	合并	-0.128 7	0.118 3

3.2 模型 ROC 曲线和 AUC

采用接受者操作特性曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)和 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积(Area Under Curve, AUC)^[29-32]评估模型拟合精度。模型拟合精度越好则 AUC 越接近 1, 0.7~0.9 时表示较好。文中建立的证据权重模型的 AUC 为 80.4%, 拟合精度优异(图 5)。

3.3 易发性评价结果

综合自然间断点分级和地质灾害分布, 圈定了高易发区、中易发区和低易发区(表 3、图 6), 其中高易发区 188.55 km²(占研究区总面积的 49.41%), 中易发区 152.21 km²(占研究区总面积的 39.88%), 89.9% 和 9.1% 的地灾点落入高易发区和中易发区, 显示易发性分区符合已发地质灾害分布, 模型预测性能较好。

结合地质环境因素特征分析西部高易发区(图 6 蓝色框范围内、图 7)主要位于砂岩、泥岩和页岩岩组, 断裂构造较密集, 以山谷斜坡地貌为主, 坡度 15°~25°和>35°较陡峭斜坡范围成片发育且面积较广, 主要公路建于本区山谷, 裸地/稀疏植被和草地连片覆盖范围较大。预测圈定的高易发区的这些分布特征, 与上文分析得到的地质灾害控制因素特征吻合, 预测结果符合地质灾害空间分布特征。

4 结论

(1)“因子面积百分比 A”“地灾数百分比 B”和“比率 β”, 以及各因素各分类地质灾害证据权重可以定量地分析各因素与地质灾害发生的相关性。

表 3 地质灾害易发性分区表

易发性分区	面积/ km ²	占总面积/ %	编号	面积/ km ²	占大区/ 面积%	灾点数	灾点密度/ (个·km ⁻²)
地质灾害 高易发区(I)	188.55	49.41	I ₁	152.32	80.79	64	0.41
			I ₂	17.93	9.51	9	0.50
			I ₃	16.11	8.54	8	0.94
			I ₄	2.19	1.16	1	0.46
地质灾害 中易发区(II)	152.21	39.88	II ₁	1.30	0.85	-	-
			II ₂	18.82	12.36	2	0.11
			II ₃	15.03	9.87	1	0.07
			II ₄	12.92	8.49	-	-
			II ₅	18.51	12.16	2	0.11
			II ₆	9.12	5.99	-	-
			II ₇	44.66	29.34	-	-
			II ₈	12.34	8.11	1	0.08
			II ₉	11.73	7.71	-	-
			II ₁₀	7.78	5.11	-	-
低易发区(III)	47.40	12.42	III ₁	47.40	100	1	0.02

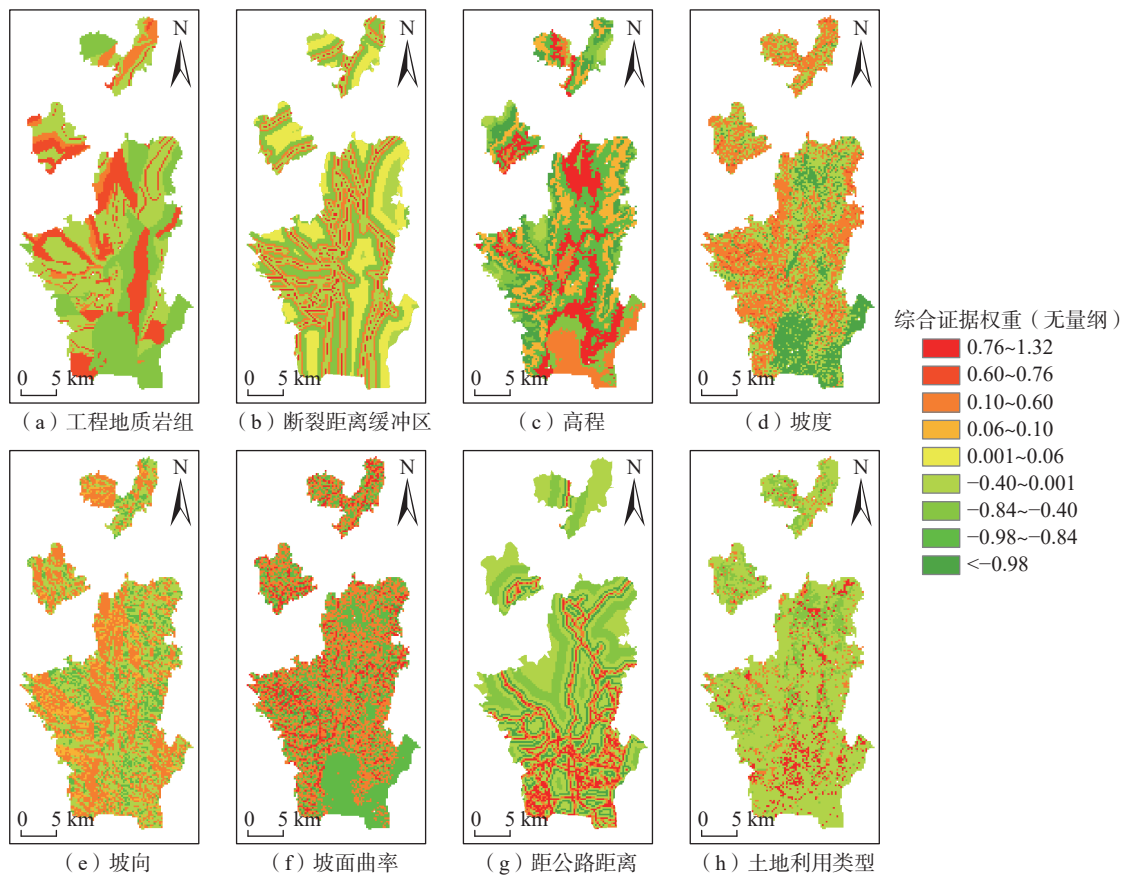


图 4 因素证据权重计算结果图

Fig. 4 Calculation results charts of factor evidence weights

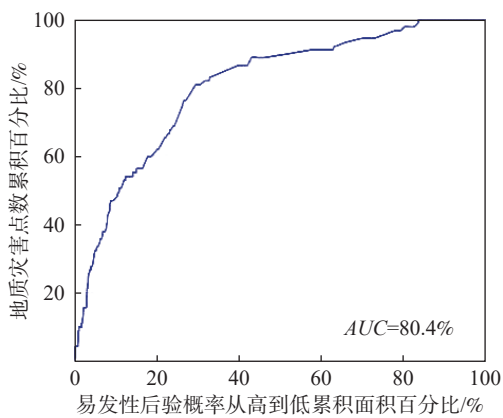


图 5 模型预测性能 ROC 曲线图

Fig. 5 ROC curve of model prediction performance

(2)圈定高易发区 188.55 km²(占总面积的 49.41%), 中易发区 152.21 km²(占总面积的 39.88%), 易发性分区图具有较好的等级区分度。

(3)通过证据权法绘制的地质灾害易发性图可以有效地预测该区地质灾害, 模型拟合精度 $AUC=80.4%$ 。89.9% 和 9.1% 的地灾点落入高和中易发区, 建模结果

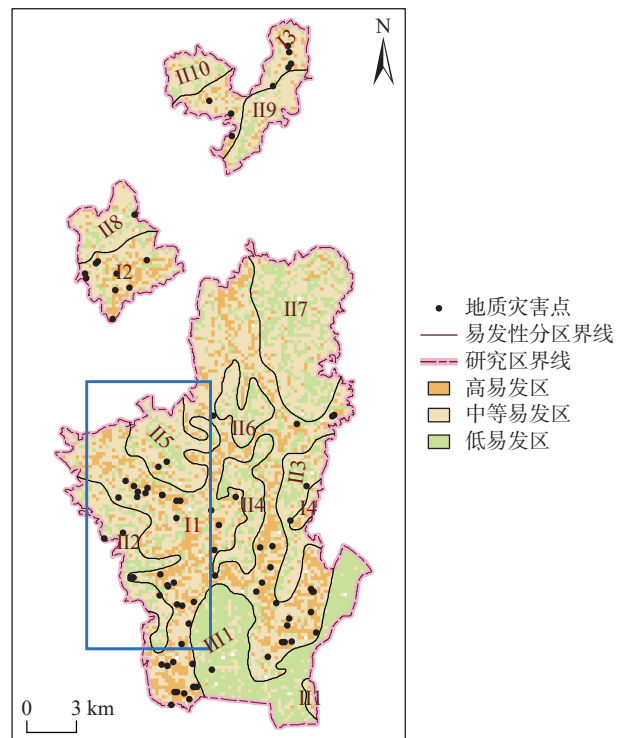


图 6 地质灾害易发性栅格图

Fig. 6 Grid map of geological hazard susceptibility

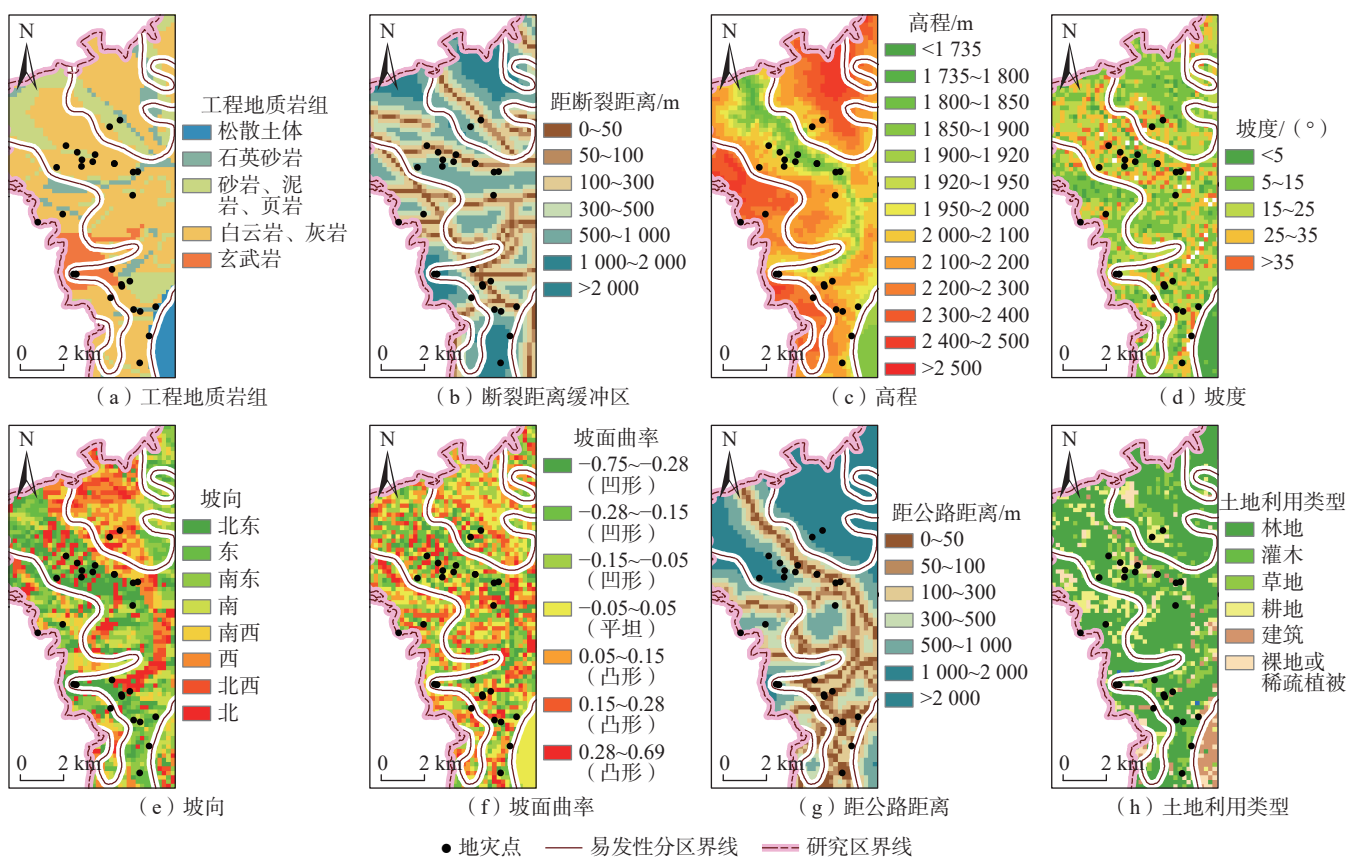


图 7 典型区因素和地质灾害分布图

Fig. 7 Factors and geological hazards in typical zone

与实际地质灾害发育情况吻合度高,较好地揭示了研究区地质灾害易发性特征。

(4)证据权法在研究区这类云南高原低山丘陵区有效性高,方法理论清晰,较为成熟,由数据驱动,参数定义明确,易于一线工程师推广使用。同时,该方法权重的估计和模型预测性能受预测因子选择、因子数据空间分辨率、因子分级影响较大,具体工作中宜对这些问题进行深入研究和统计分析。建议通过对因子分级进行显著性测试实施优选,减小对权重的高估或低估,提高模型效能。

参考文献(References):

[1] REGMI N R, GIARDINO J R, VITEK J D. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: western Colorado, USA [J]. *Geomorphology*, 2010, 115(1/2): 172 - 187.

[2] DU J, GLADE T, WOLDAI T, et al. Landslide susceptibility assessment based on an incomplete landslide inventory in the Jilong Valley, Tibet, Chinese Himalayas [J]. *Engineering Geology*, 2020, 270: 105572.

[3] GOYES-PEÑAFIEL P, HERNANDEZ-ROJAS A. Landslide

susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: A case study in Popayan, Colombia [J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105958.

[4] BĂLTEANU D, MICU Mihai, JURCHESCU M, et al. National-scale landslide susceptibility map of Romania in a European methodological framework [J]. *Geomorphology*, 2020, 371: 107432.

[5] 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: 107660.

[6] 黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 等. 基于RBF神经网络-信息量耦合模型的滑坡易发性评价——以甘肃岷县为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 116 - 126. [HUANG Lixin, HAO Junming, LI Wangping, et al. Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 116 - 126. (in Chinese with English abstract)]

[7] 廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 等. 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划 [J]. *中国地质灾害与防治学*

- 报, 2021, 32(5): 121 - 129. [LIAO Xiaoping, XU Fengguang, CAI Xudong, et al. Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 121 - 129. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 罗守敬, 王珊珊, 付德荃. 北京山区突发性地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 126 - 133. [LUO Shoujing, WANG Shanshan, FU Dequan. Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 126 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 吴赛男, 田毅. 我国单体滑坡模拟和区域滑坡易发性评价研究进展 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 113 - 119. [WU Sainan, TIAN Yi. Review on progress of individual landslide simulation and assessment of regional landslide susceptibility in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 113 - 119. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 闫怡秋, 杨志华, 张绪教, 等. 基于加权证据权模型的青藏高原东部巴塘断裂带滑坡易发性评价 [J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 26 - 37. [YAN Yiqiu, YANG Zhihua, ZHANG Xujiao, et al. Landslide susceptibility assessment based on weight-of-evidence modeling of the Batang fault zone, eastern Tibetan Plateau [J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 26 - 37. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LUSTED L B. An introduction to medical decision making [J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 1970, 49(5): 322.
- [12] SPIEGELHALTER D J, KNILL-JONES R P. Statistical and knowledge-based approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series A (General)*, 1984, 147(1): 35.
- [13] BONHAM-CARTER G F, AGTERBERG F P, WRIGHT D F. Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential [R]. *Natural Resources Canada/CMSS/Information Management*, 1990.
- [14] AGTERBERG F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. *Nonrenewable Resources*, 1992, 1(1): 39 - 50.
- [15] AGTERBERG F P, BONHARN-CARTER G F. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping [M]. *Computers in Geology - 25 Years of Progress*. 13 - 32: Oxford University Press, 1994.
- [16] CARRANZA E, HALE M. Spatial association of mineral occurrences and curvilinear geological features [J]. *Mathematical Geology*, 2002, 34: 203 - 221.
- [17] 孙琳, 任娜娜, 李云安, 等. 基于证据权法的公路路基岩溶塌陷危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 94 - 100. [SUN Lin, REN Nana, LI Yunan, et al. Risk assessment on karst collapse of the highway subgrade based on weights of evidence method [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 94 - 100. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘璐瑶, 高惠瑛. 基于证据权与 Logistic 回归模型耦合的滑坡易发性评价 [J/OL]. *工程地质学报*. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-482>. [LIU Luyao, GAO Huiying. Landslide susceptibility assessment based on coupling of woe model and logistic regression model [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-482>. (in Chinese with English abstract)]
- [19] CHEN L F, GUO H X, GONG P S, et al. Landslide susceptibility assessment using weights-of-evidence model and cluster analysis along the highways in the Hubei section of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Computers & Geosciences*, 2021, 156: 104899.
- [20] ALSABHAN A H, SINGH K, SHARMA A, et al. Landslide susceptibility assessment in the Himalayan range based along Kasauli - Parwanoo Road corridor using weight of evidence, information value, and frequency ratio [J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2022, 34(2): 101759.
- [21] SAHA A, SAHA S. Comparing the efficiency of weight of evidence, support vector machine and their ensemble approaches in landslide susceptibility modelling: a study on Kurseong region of Darjeeling Himalaya, India [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, 19: 100323.
- [22] 黄发明, 石雨, 欧阳慰平, 等. 基于证据权和卡方自动交互检测决策树的滑坡易发性预测 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(5): 1 - 15. [HUANG Faming, SHI Yu, OUYANG Weiping, et al. Landslide susceptibility prediction modeling based on weight of evidence and Chi-square automatic interactive detection [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(5): 1 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 杨华阳, 许向宁, 杨鸿发. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 20 - 29. [YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 20 - 29. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 云南省地质局第二区测队. 昆明幅 G-48-25 1/20 万地质调查报告 [R]. 昆明: 云南省地质局, 1971. [The Second Regional Survey Bureau. Kunming G-48-25 1/200 000

- Geological survey report [R] . Kunming: Yunnan Geological Bureau, 1971. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 云南省地质局第二区测大队. 武定幅G-48-19 1/20万地质图, 矿产图及其说明书 [R] .昆明: 云南省地质局, 1969. [The Second Regional Survey Bureau. Wuding G-48-19 1/200 000 geological map, mineral map and description [R] . Kunming: Yunnan Geological Bureau, 1969. (in Chinese)]
- [26] BONHAM-CARTER G F. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS [M] . Canada: Pergamon, 1994.
- [27] CARTER GF B, AGTERBERG F P, WRIGHT D F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia [J] . *photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, 54(11): 1585 – 1592.
- [28] AGTERBERG F P, BONHAM-CARTER G F, WRIGHT D F. Statistical pattern integration for mineral exploration [M] . *Computer Applications in Resource Estimation* Amsterdam: Elsevier, 1990: 1 – 21.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] OMAR L, IVRISSIMTZIS I. Using theoretical ROC curves for analysing machine learning binary classifiers [J] . *Pattern Recognition Letters*, 2019, 128: 447 – 451.
- [32] 王高峰, 郭宁, 邓兵, 等. 不同组合模型区域滑坡易发性及精度分析 [J] . *西北地质*, 2021, 54(2): 259 – 272. [WANG Gaofeng, GUO Ning, DENG Bing, et al. Analysis of landslide susceptibility and accuracy in different combination models [J] . *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 259 – 272. (in Chinese with English abstract)]