



移动阅读

王家柱, 高延超, 铁永波, 等, 2023. 基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价: 以康定为例[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 640–650. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03001)

Wang J Z, Gao Y C, Tie Y B, et al., 2023. Landslide susceptibility assessment based on slope units of mountainous cities and towns: A case study of Kangding city[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 640–650. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03001)

基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价：以康定为例

王家柱, 高延超, 铁永波, 徐 伟, 白永健, 张彦锋

(中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218)

摘要: 山区地质灾害易发性评价对城镇地质灾害风险管理具有重要意义。本文以康定市为例, 以斜坡单元为最小评价单元, 选取高程、坡度、坡向、曲率、工程地质岩组、距道路距离、距断裂距离、距水系距离和斜坡结构等 9 个滑坡影响因子, 根据各因子滑坡面积比曲线与证据权值曲线的突变点, 划分滑坡影响因子二级状态, 并对各影响因子进行相关性分析, 剔除相关性较高的距道路距离因子, 在此基础上, 采用证据权模型进行滑坡易发性评价。对已有治理工程的斜坡单元, 本文尝试利用折减系数法对其易发性进行进一步评价。结合现场调查, 将研究区滑坡易发性程度划分为: 极高易发、高易发、中等易发、低易发。评价结果表明, 自然工况下极高易发区主要位于康定市炉城镇以及研究区北侧二道桥村一带, 高易发区主要位于雅拉河、折多河与瓦斯沟河谷两侧, 对治理工程所在的斜坡单元进行折减后, 极高易发区面积由 11.21% 降至 8.42%, 滑坡比率由 4.03 降低至 2.3, 研究结果符合实际情况, 模型精度达 77.8%。评价结果较好地反映了康定市区的滑坡易发性分布情况, 可为城镇精细化评价提供一定的参考依据。

关键词: 易发性; 斜坡单元; 证据权模型; 治理工程; 山区城镇

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

Landslide susceptibility assessment based on slope units of mountainous cities and towns: A case study of Kangding city

WANG Jiazhu, GAO Yanchao, TIE Yongbo, XU Wei, BAI Yongjian, ZHANG Yanfeng

(Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China)

Abstract: Susceptibility assessment of geological hazard in mountainous areas plays an important role in geological hazard risk management. Taking Kangding city as the example, nine index factors including elevation, gradient, slope aspect, curvature, engineering geological information, distance to road, distance to rivers, distance to fault zones, and the direction and structure of slope were selected as the evaluation indexes based on slope unit. The critical values were selected from the catastrophe points of the landslide ratio curve and weight of evidence curve to determine the factor states on dividing the entire factors interval and the distance to road was removed because of correlation analysis for each influencing factor. Based on the weight of evidence, the Susceptibility assessment was developed. The method of reduction coefficient was used to evaluate the susceptibility accurately for slope units that already had treatment projects. Combine with field investigation results, the study area was classified into four zones with different levels of landslide susceptibility: landslide extremely high-prone area, landslide high-prone area, landslide moderate-

收稿日期: 2020-10-08; 改回日期: 2021-03-15; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 王家柱(1992—), 男, 工程师。主要从事地质灾害防治与评估研究。E-mail: 383001693@qq.com

资助项目: 中国地质调查局地调项目资助(DD20221746); 强震区特大型泥石流防控标准化体系及示范应用(2018YFC1505406); 国家自然科学基金(41702374); 中国地质调查局成都地质调查中心“刘宝珺院士基金”

prone area, and landslide low-prone area. The results show that extremely high-prone area were mainly distributed in the Lucheng Town of Kangding City and Erdaqiao village in the north. Meanwhile, high-prone areas were mainly distributed on the side of Yala River, Zheduo River, and Wasi Valley. After the reduction of the slope unit where the treatment projects are located, the area and landslide ratio of extremely high-prone areas decreased from 11.21% to 8.42% and from 4.03 to 2.3 respectively. The research results were in good agreement with the distribution of known landslides, and the accuracy of the assessment is about 77.8%. The landslide susceptibility assessment results obtained in this paper reflect the distribution of landslides in the study area, providing technical support for the refined risk assessment of mountainous cities and towns.

Key words: Susceptibility; slope units; weight of evidence; treatment projects; mountainous cities and towns

0 引言

我国是世界上滑坡灾害极为严重的国家,随着经济高速发展和山区城镇化进程的加快推进,“向山发展、向沟发展”成为必然趋势,削山造地、开挖坡脚使得山区滑坡灾害成逐年加重的趋势(黄润秋, 2007; 张茂省等, 2019; 李媛等, 2004)。以我国西南山区为例,山地面积超过 86%,多数城镇建于滑坡灾害高易发、高风险的高山峡谷区,加之无规划的土地占用与灾害易发区的土地使用,使我国西南山区城镇频繁遭受重大滑坡灾害侵袭(殷跃平, 2013)。1989年7月,华莹山溪口滑坡,造成221人死亡,17人受伤的惨重损失(姜云等, 1992);2001年5月1日,重庆武隆县县城滑坡,造成了79人死亡,7人受伤的惨剧(殷跃平, 2001; 王建锋等, 2002);2005年2月23日丹巴县建设街后山特大滑坡,威胁整个丹巴县城的安全。因此进一步加强山区城镇灾害的易发性区划研究迫在眉睫(唐然, 2007)。

易发性评价又称为敏感性评价(Susceptibility),就是回答“什么地方最容易发生地质灾害”的问题(范强等, 2015; 陈绪钰等, 2019),许多学者利用不同方法,就易发性提出了多种评价模型和改进模型,常见的如层次分析法、逻辑回归法、信息量法、机器学习算法等(许冲等, 2009; Segoni et al., 2016; 王佳佳等, 2014; 赵良军等, 2017),同时也有大量学者对各评价模型评价精度进行了对比分析(Xiao et al., 2020; Mohammady et al., 2019)。其中证据权重法是基于统计概率的方法,通过将历史灾害点与相关地质、地理因素进行空间关联分析,计算各影响因素对地质灾害的权重,在一定程度上避免滑坡危险性分析研究中评价因子权重赋值的主观性,具有较高的评价精度(Agterberg and Cheng, 2002; Goyes-Peñafiel and Hernandez-Rojas, 2021; Kumar and

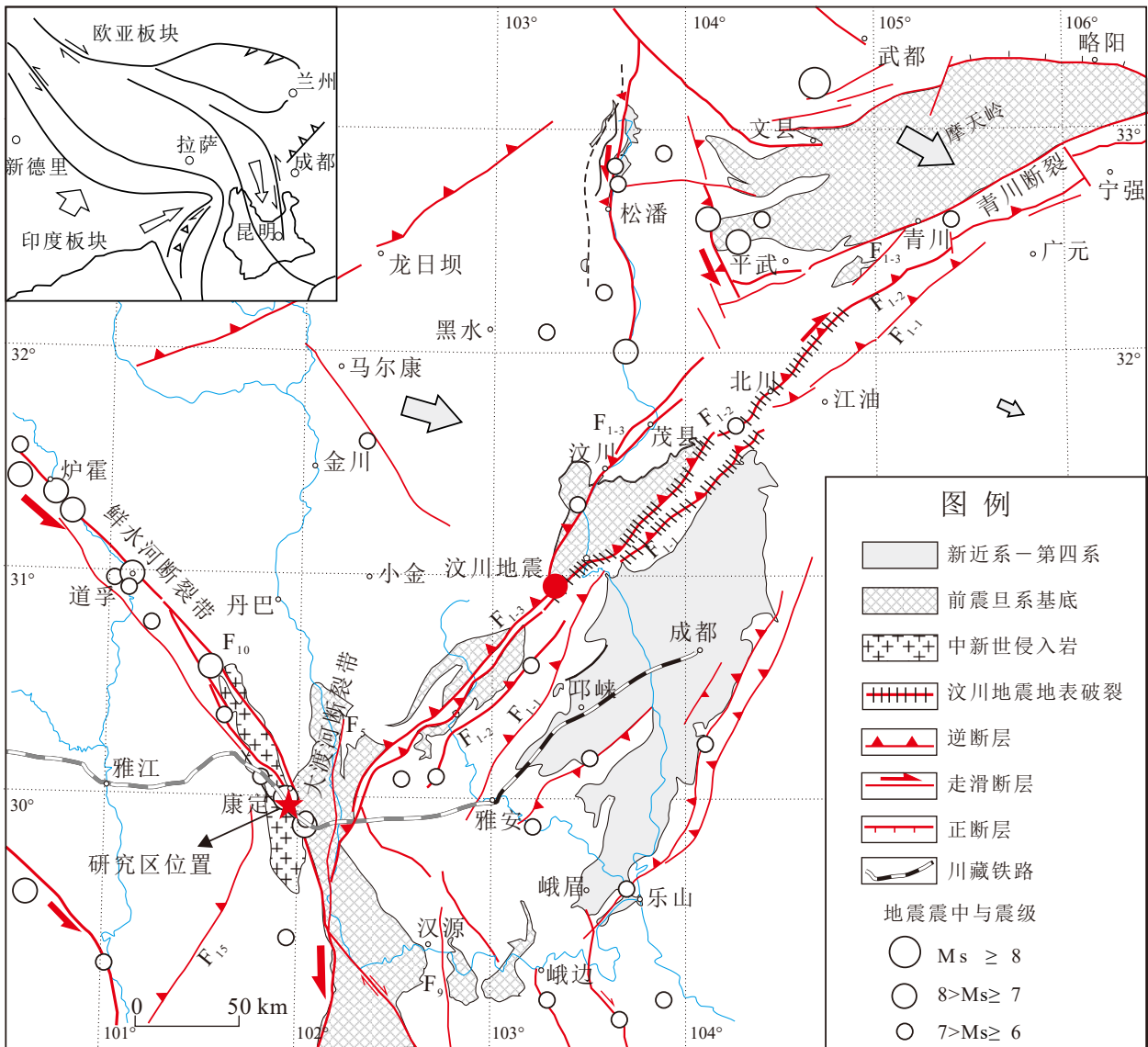
Anbalagan, 2019)。在评价单元的选取上,越来越多的学者已经意识到,利用栅格作为最小评价单元进行评价,其结果很难用于城镇尺度的风险管理和防灾减灾工程,而斜坡单元可以提高与实际地形地貌的吻合度,能较好地体现区域斜坡的整体性和滑坡的实际发育状况(田述军等, 2019)。目前,针对已有防治工程的滑坡易发性评价研究仍然较为薄弱,尤其是在城镇尺度上,部分滑坡已进行工程治理,对此类滑坡所在的斜坡体进行合理的易发性评价,有利于提高评价精度,评价结果也能更好地服务于城镇风险管理。

康定市作为四川省甘孜藏族自治州首府,地质灾害十分发育,对人口稠密、商业繁华的城区居民的生命财产安全构成巨大的威胁(王永利等, 2006; 王德伟等, 2006; 郑万模等, 2012)。魏伦武等按“区内相似,区际相异”的原则,采用不规则单元法将康定城划分为86个地质环境分区单元格对其地质灾害危险性进行评价,取得了较好的结果(魏伦武等, 2006)。本文在前人的研究基础上,选取斜坡单元作为最小评价单元,利用证据权重法对康定市滑坡体进行易发性评价,在此基础上,探讨了针对防治措施的滑坡体进行易发性评价的方法,期望评价结果为城镇滑坡灾害防治与管理提供参考和理论依据。

1 研究区概况

1.1 地质背景

研究区地处青藏高原东缘向盆地过渡地带,受青藏高原急剧隆起抬升和大渡河深切切割作用,区域内山高、坡陡、谷深,地势高差大,岭谷相对高差1000 m~3000 m,岭脊呈尖峰状。区内出露地层复杂,从古生代—新生代均有分布。研究区位于鲜水河、龙门山及安宁河地震带交汇部位,地震活动频繁,地震基本烈度达Ⅸ度(图1)。区内多年平均降水



F₁₋₁—龙门山前山断裂, F₁₋₂—龙门山中央断裂, F₁₋₃—龙门山后山断裂, F₅—大渡河断裂带, F₁₀—鲜水河断裂带, F₉—甘洛-竹核断裂, F₁₅—玉农希断裂。

图1 研究区活动断裂分布图

Fig. 1 The active fault spatial distribution of study area

量 803.4 mm, 多集中在 6 月到 9 月, 占全年的 60%~85%, 多暴雨和连绵雨。

1.2 滑坡特征

本次研究范围主要集中在康定市城区, 总面积约 54.5 km², 区内共有滑坡 31 处, 规模以中型为主, 占总滑坡的 61.29%, 最小滑坡方量为 6 000 m³, 最大规模(白土坎滑坡)达 2 000×10⁴ m³, 属特大型滑坡。滑坡主要沿河流两侧分布, 在康定市城区内三江交汇(分别为雅拉河、折多河和瓦斯沟)处, 也是康定市中心, 滑坡灾害发育密集(图 2)。

2 评价方法

2.1 斜坡单元划分

本文采用的斜坡单元作为评价单元, 可克服栅格单元切割斜坡整体性的缺点, 划分方法为“集水区重叠法”, 主要步骤为: 对正、反 DEM 数据进行洼地填充, 并求解流向, 根据流向计算集水单元格数作为流量。然后通过设定阈值提取河网, 依据节点将河网分界成枝干, 作为局部洼地。最后以流向为底图, 局部洼地作为集水点, 计算子流域, 通过正反集水区重叠切割和人工修编得到斜坡单元。按

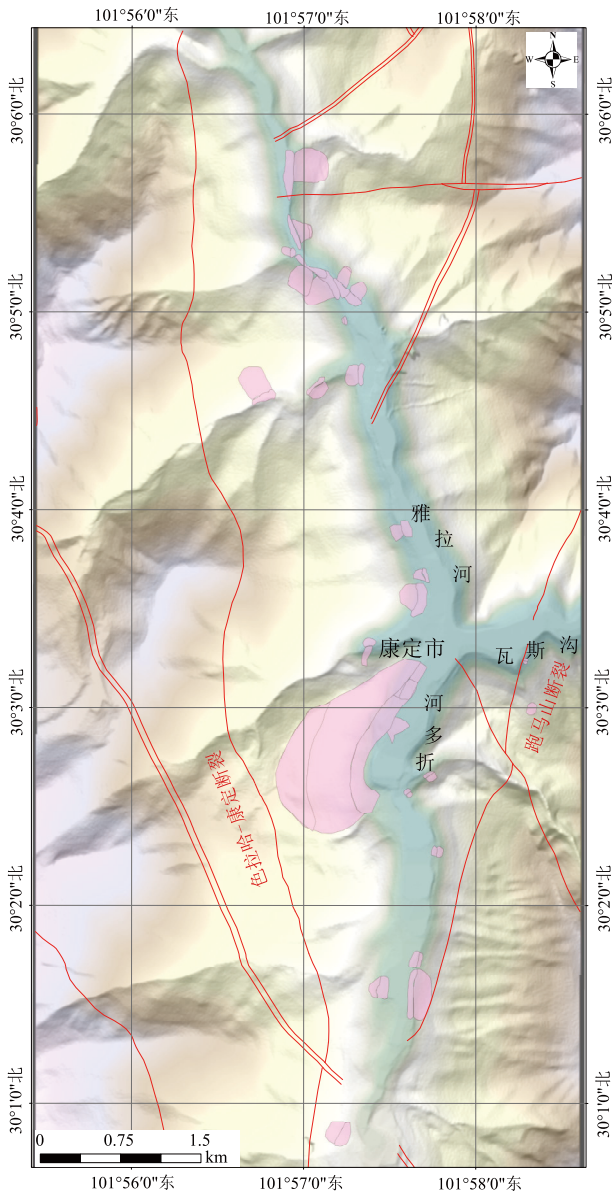


图2 滑坡灾害分布特征

Fig.2 Distribution of landslide hazard

此方法,将研究区划分为219个斜坡单元。

2.2 证据权模型

证据权法(weight evidence analysis method)最初用于非空间的医疗诊断支持,加拿大数学地质学家 Agterberg 将此法引入地质学领域,近年来也被广泛用于地质灾害易发性评价,其实质是根据已发生的灾害与灾害影响因子(如坡度、构造、斜坡结构等)进行空间关联分析,并求取各影响因子对灾害的贡献率(即权重),最后将各影响因子进行叠加得到地质灾害易发性指数。

本文以斜坡单元作为最小的评价单元,将每个因子划分为不同等级,将每个评价因子图层与历史

滑坡灾害点数据关联分析,计算该评价因子中各个等级的权重值。计算公式如下:

$$W^+ = \ln \frac{P\{D|B\}}{P\{D|\bar{B}\}} = \ln \frac{P(D \cap B)/P(B)}{P(D \cap \bar{B})/P(\bar{B})} \quad (1)$$

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

$$w_f = w^+ - w^- \quad (3)$$

式中, P 表示概率, $P\{D|B\}$ 表示 B 发生的条件下 D 发生的概率, D 代表在评价因子下发生滑坡的斜坡单元数, \bar{D} 代表评价因子下未发生滑坡的斜坡单元数, B 代表发生滑坡的斜坡单元总数, \bar{B} 代表未发生滑坡的斜坡单元总数, w^+ 为正相关权重, w^- 为负相关权重,当 $w^+ > 0$ 或 $w^- < 0$ 时,代表影响因子与滑坡呈正相关;当 $w^+ < 0$ 或 $w^- > 0$ 时,代表影响因子与滑坡呈负相关; w_f 表示该因子对滑坡的权重值,正值代表该因子对滑坡发生有利,负值代表该因子对滑坡发生不利,为零则代表该因子与滑坡发生无关。

3 评价指标体系

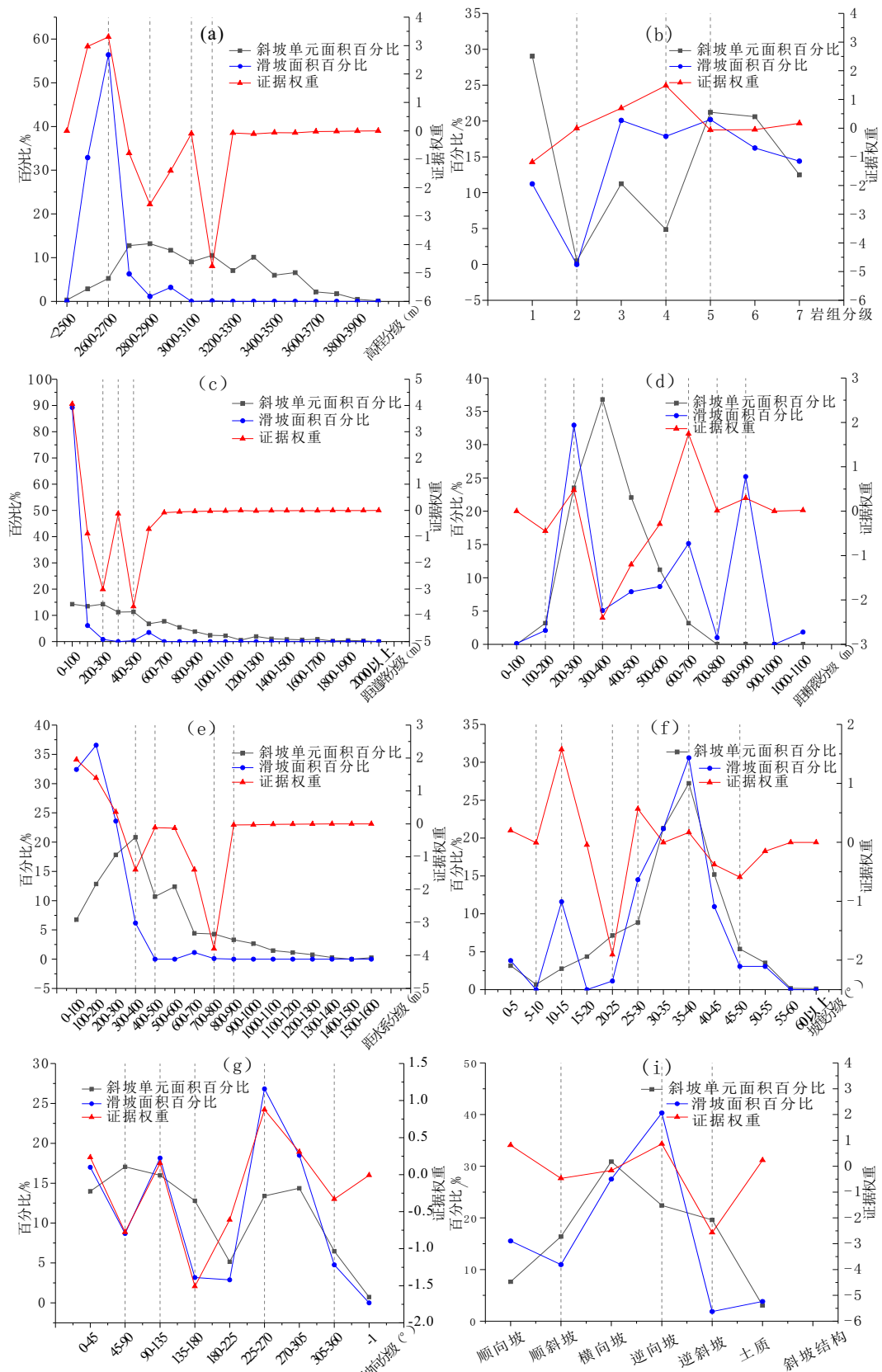
评价指标体系包括评价因子和评价因子的相关性分析。滑坡是地形地貌、地层岩性、地质构造和人类工程活动等多种因素共同作用而成,本文在现场调查的基础上,结合前人研究成果,选择高程、工程地质岩组、距道路距离、距断裂距离、距水系距离、坡度、坡向、曲率和斜坡结构等9个因素作为评价因子,并利用证据权法对各评价指标进行状态分级。

3.1 基于证据权法的评价指标分级

评价指标可按数据类型分为离散型数据和连续型数据。其中离散型数据的各个等级就代表明确的物理意义(如工程地质岩组、斜坡结构和曲率等),因而无需进行划分;而连续性数据,首先按某一定值对其进行分割离散化,对比分析滑坡面积比、分级面积比和证据权重,综合分析各状态对滑坡的影响程度,并选择其中的特征点作为临界值对数据进行合理划分。其中滑坡面积比、分级面积比按式(4)和式(5)计算。

$$\text{滑坡面积比} = \frac{\text{指标因子各二级状态内发生的滑坡面积}}{\text{全区滑坡总面积}} \quad (4)$$

$$\text{分级面积比} = \frac{\text{指标因子各二级状态面积}}{\text{指标因子总面积}} \quad (5)$$



a. 高程分级图; b. 岩组分级图; c. 距道路距离分级图; d. 距断裂距离分级图; e. 距水系距离分级图; f. 坡度分级图; g. 坡向分级图; h. 斜坡结构分级图。

图3 评价因子状态分级统计图

Fig. 3 Statistical results of state classification of assessment index

3.1.1 高程

不同高程地形条件存在差异,同时,不同高程人类工程活动强度也不同,直接影响滑坡发育情况。研究区属于高山峡谷地貌,地形高差大,高程范围2 490~3 935 m,本文以100 m为间隔对高程数据进行离散化。由图3a可知,滑坡主要集中在海拔3 000 m以下区域,证据权重值在海拔2 490~2 700 m以及2 900~3 100 m呈上升趋势,其余为下降趋势或变化趋势不明显,因此将高程值分为[2 490, 2 700], (2 700, 2 900], (2 900, 3 100], (3 100, 3 200], >3 200。

3.1.2 工程地质岩组

工程地质岩组是斜坡的物质基础,对滑坡发育程度起着关键的控制作用。根据研究区出露的地层岩性、岩体的物理力学性质、岩石结构、岩石强度等特征,将研究区划分为七大岩组(图3b、表1)。

3.1.3 距道路距离

道路修建过程中的开挖和切坡,易形成高陡临空面,造成边坡应力重分布,最终导致滑坡发生。本文以100 m为距离对道路进行离散化,由图3c可知,滑坡主要集中在距道路0~200 m的范围内,其中证据权重值在0~300 m和400~500 m范围内呈下降趋势,其余均呈上升趋势,因此距道路距离可划分为[0, 300], (300, 400], (400, 500], >500。

3.1.4 距断裂距离

断裂造成岩体破碎,同时断裂活动及其对地下水的控制作用都直接影响滑坡的稳定性。以100

m为间隔,对断裂距离进行离散化,由图3d可知,滑坡主要发育在距断裂500 m的范围内,其中证据权重值在0~200, 300~400, 700~800, 900以上呈下降趋势,其余呈上升趋势或变化不明显,因此距断裂距离可划分为[0, 200], (200, 300], (300, 400], (400, 700], (700, 800], (800, 900], >900。

3.1.5 距水系距离

水是滑坡的主要诱因之一。地表水会冲刷坡脚,改变坡体形态;地下水会软化斜坡岩土体,降低滑坡稳定性。以100 m为间隔,滑坡主要分布在距水系距离100 m范围内,综合考虑滑坡面积比与分级面积比,将距水系距离划分为[0, 400], (400, 500], (500, 800], (800, 900], >900(图3e)。

3.1.6 坡度

地形坡度影响斜坡的应力分布与地表径流以及地下水补给、排泄等情况,是发育滑坡的重要因素之一。本文以5°为间隔,对坡度数据进行离散化。由图3e可知,滑坡主要发育在30°~40°,权重值在10°~15°、25°~30°和50°以上呈上升趋势,因此将坡度划分为[0, 10], (10, 15], (15, 25], (25, 30], (30, 40], (40, 50], >50°(图3f)。

3.1.7 坡向

地形坡向的差异导致日照与降雨量存在差异,进而影响坡体植被蒸腾与水体蒸腾,对滑坡发育也存在一定的影响。斜坡坡向分布在[-1°, 360°],其中-1°表示平地,本文以45°为间隔,将斜坡坡向划分为9个等级(图3g),其中0°~90°、135°~180°、270°~360°呈向下趋势,其余分级呈上升趋势或无明显变化,故将坡向分为[0, 90], (90, 135], (135, 180], (180, 270], (270, 360]和-1°。

3.1.8 曲率

斜坡的坡面形态,影响着物质的搬运和沉积,进而对滑坡的发育产生影响。本文利用Arcgis中栅格表面工具,对DEM数据自动提取斜坡曲率,按照曲率大小,将滑坡划分为凸形坡、凹形坡和平行坡。

3.1.9 斜坡结构

斜坡结构对滑坡发育与否起着重要的控制作用。本文根据岩层倾向与坡向的关系,将斜坡结构划分为顺向坡、顺斜坡、横向坡、逆斜坡、逆向坡和土质斜坡六大类型(图3h)。

3.2 评价指标相关性分析

在易发性评价指标体系中,各评价指标之间并

表1 研究区工程地质岩组划分表

Table 1 Classification of engineering geological rock group

岩组编号	工程地质岩组
岩组1	坚硬块状中酸性岩浆岩岩组
岩组2	坚硬块状基性-超基性岩浆岩岩组
岩组3	冰川、冰水、冲洪积、泥石流堆积松散-半胶结土类
岩组4	较软弱-中厚层状砂质泥岩、粉砂岩为主的岩组
岩组5	较软-较硬薄层状砂质板岩、变质砂岩、变质粉砂岩为主的岩组
岩组6	较软弱层状千枚岩、片岩、砂质泥岩为主的岩组
岩组7	坚硬的中厚层状石英岩、大理岩为主的岩组

不是相互独立的,彼此间存在一定的关系,如果不加以处理,各评价指标的权重可能存在相互叠加的情况,导致评价结果出现错误。因而为了降低评价指标相互影响造成的误差,本文利用 Arcgis 中的波段集统计工具,对各评价指标进行相关性检验。当

相关性系数 >0.3 时,可以认为相关性较大,各评价指标相关系数见表2。由表2可知,距道路距离与高程相关性为0.37,距道路距离与距水系距离为0.31,因此,将距道路距离指标剔除。筛选后各评价指标证据权重见表3。

表2 评价指标相关系数

Table 2 The correlation coefficients of assessment index

指标因素	高程	坡度	坡向	曲率	工程地质岩组	距断裂距离	距水系距离	距道路距离	斜坡结构
高程	1								
坡度	0.14	1							
坡向	0.11	0.07	1						
曲率	0.03	0.01	0.00	1					
工程地质岩组	-0.28	0.09	0.04	0.00	1				
距断裂距离	0.20	0.02	0.03	0.00	-0.06	1			
距水系距离	0.23	0.03	-0.04	0.00	-0.14	0.15	1		
距道路距离	0.37	0.14	0.11	0.00	-0.23	0.26	0.31	1	
斜坡结构	-0.05	-0.16	0.16	0.00	0.09	-0.03	-0.24	-0.11	1

表3 各评价指标证据权重

Table 3 The weighted of evidence values of assessment index

评价指标	取值	证据权重	评价指标	取值	证据权重
高程	2 490~2 700	6.267	距断裂距离	0~200	-0.446
	2 700~2 900	-3.375		200~300	0.474
	2 900~3 100	-1.502		300~400	-2.404
	3 100~3 200	-4.761		400~700	0.252
	3 200以上	-0.361		700~800	0.01
坡度	0~10	0.387	距水系距离	800~900	0.292
	10~15	1.574		>900	0.019
	15~25	-1.951		0~400	2.299
	25~30	0.565		400~500	-0.115
	30~40	0.162		500~800	-5.325
	40~50	-0.972		800~900	-0.034
50以上	-0.154	900~1 600	-0.067		
坡向	-1	-0.008	斜坡结构	顺向坡	0.813
	0-90	-0.543		顺斜坡	-0.471
	90~135	0.154		横向坡	-0.166
	135~180	-1.508		逆向坡	0.863
	180~270	0.268		逆斜坡	-2.572
	270~360	-0.024		土质	0.233
工程地质岩组	岩组1	-1.185	曲率	凸	1.082
	岩组2	-0.005		凹	-1.386
	岩组3	0.696		平	1.786
	岩组4	1.483			
	岩组5	-0.063			
	岩组6	-0.054			
	岩组7	0.166 307			

4 易发性评价结果

4.1 滑坡易发性主控条件分析

根据各指标权重可知,高程、距水系距离和坡度是研究区滑坡易发性最主要的控制条件,主要受滑坡分布规律决定,与河流下切和城镇规划建设沿河谷切坡建房密切相关。另外,根据各权重指数发现,距断裂距离并非研究区易发性最为重要的控制条件,其原因主要是研究区构造活动强烈,断裂极为发育,地震活动频繁。而在本文城镇范围的研究维度下,滑坡灾害沿断裂带发育并不明显,故而不是滑坡易发性最为重要的控制因素。

4.2 天然工况下易发性评价

通过已确定的各指标因素证据权重值,对选定的8个易发性评价因子,利用证据权重计算公式(式3)进行叠加,得到康定城区在天然工况下易发性评价指数,取值范围在-2.18~1.728,归一化后,取值范围0~1。利用自然间断法将易发性划分为4类,分别为低易发区(0~0.319)、中易发区(0.320~0.493)、高易发区(0.494~0.681)和极高易发区(0.682~1)(图4)。其中极高易发区主要位于康定市炉城镇以及研究区北侧三道桥村一带,共包含斜坡单元28个,面积约6.54 km²,包含滑坡14处;高易发区主要位于雅拉河、折多河与瓦斯沟河谷两侧,共包含斜坡单元72个,面积约16.7 km²,包含滑坡12处;中易发区与低易发区,主要分布与沟道两侧,人类工程活动较弱地区,共包含斜坡单元119个,面积约35.11 km²,包含滑坡5处。

各等级下滑坡数、斜坡单元面积和滑坡比率统计见表4。由表4可知,随着易发性等级由低到高,相对应的滑坡发生的比例由6.45%升至45.16%,滑坡比率由0.24升至4.03,在理论上符合等级划分的标准。同时,有83.8%的滑坡发生于极高易发性和高易发性区域,采用历史滑坡点位于较高易发区域内的比例表征精度,可认为该模型精度达83.8%。

为了进一步验证评价模型的精度,本文采用受试工作者特征曲线(ROC)将所有斜坡单元易发性指数由高到低等分为100个区间,从最大的区间开始,逐一统计滑坡易发性面积百分比与实际滑坡面积百分比累计曲线(图5),该曲线与横轴构成的面积(AUC)是衡量模型准确率的指标,取值范围

0.5~1,其值越大,评价精度越高。本次评价模型AUC值为0.778,具有较好的评价精度。

4.3 工程治理后易发性评价

目前评价区域内已治理滑坡灾害31处,在野外调查发现,部分治理工程完好,滑坡所在边坡变

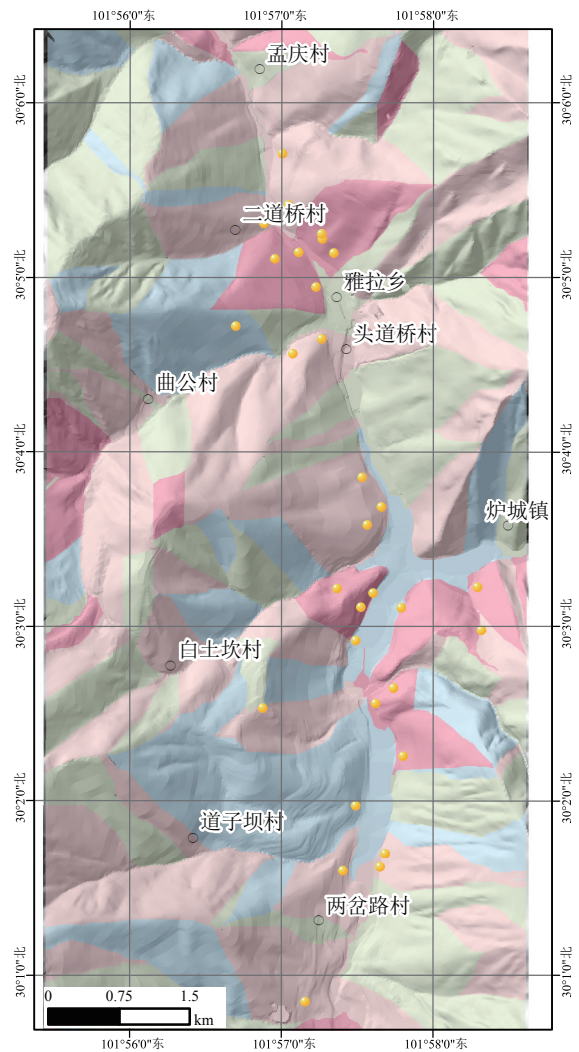


图4 天然工况研究区易发性分布图

Fig. 4 The susceptibility map of natural conditions for landslides

表4 天然工况斜坡单元统计表

Table 4 The statistical table of natural condition of slope unit

易发性等级	发生滑坡数	斜坡单元面积/m ²	占总滑坡的比例/%	占斜坡单元的比例/%	滑坡比率
低	2	15.89	6.45	27.24	0.24
中	3	19.21	9.68	32.93	0.29
高	12	16.7	38.71	28.62	1.35
极高	14	6.54	45.16	11.21	4.03

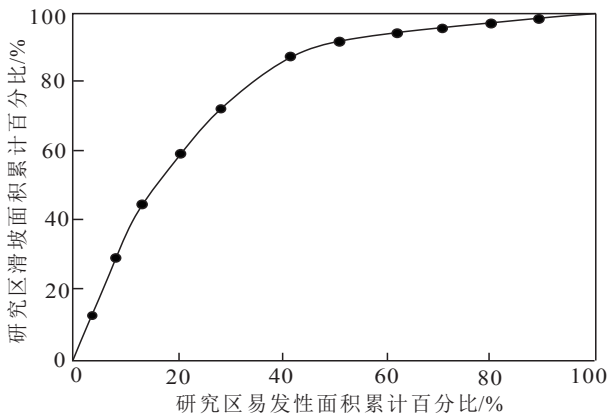


图5 滑坡易发性结果评价曲线

Fig. 5 The evaluation curve for landslide susceptibility assessment

形迹象不明显,不考虑工程治理效应的滑坡易发性评价,很难直接服务于城镇尺度的滑坡灾害风险管理。本文采用折减系数法,对天然工况下已治理滑坡所在斜坡单元进行易发性指数折减。

至于折减参数的选取,主要利用《滑坡防治工程勘查规范(GB/T 32864—2016)》中,关于滑坡稳定状态的划分: $F_s < 1.05$ 即为欠稳定至不稳定状态, $F_s \geq 1.15$ 为稳定状态。因此,本文假定研究区滑坡治理前稳定性系数1.05,治理后滑坡稳定性系数为1.15,折减系数取0.91。折减后评价区内滑坡灾害易发性评价图见图6。

极高易发区主要集中于康定市,包含23个斜坡单元,面积为 4.91 km^2 ,包含滑坡6处,主要分布于康定市炉城镇三河交汇处;高易发区包含69个斜坡单元,面积为 21.37 km^2 ,包含滑坡16处,主要位于研究区北侧二道桥村;中易发区和低易发区包含127个斜坡单元,面积为 32.07 km^2 ,包含滑坡9处。工程治理下斜坡单元统计结果见表5。同样,随着易发性的上升,滑坡比率逐渐升高,但极高易发性所占面积由11.21%降至8.42%,滑坡比率由4.03降低至2.3(图7),表明在考虑工程治理情况下,极高易发区面积与滑坡所占面积比例均降低,符合现场调查情况。

4.4 滑坡防治建议

研究区地质条件复杂,人类工程活动强烈,人地关系紧张,滑坡灾害问题突出。建议在城镇规划建设过程中,对于极高和高易发区域,应尽量避免在城镇、交通等基础设施以及民房修建过程中开挖坡脚,必须开挖坡脚地段应进行充分的科学论证,

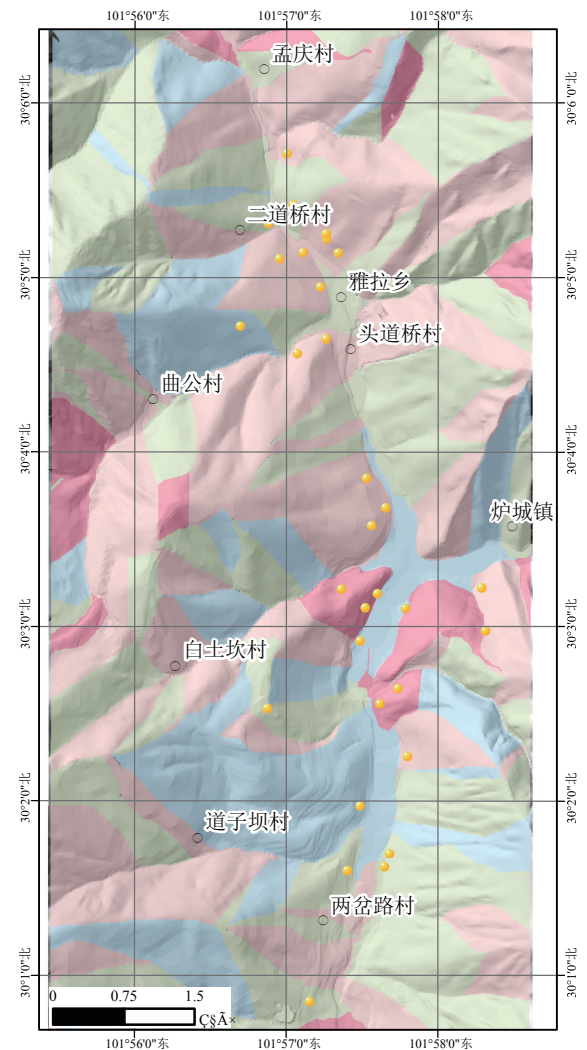


图6 工程治理工况研究区易发性分布图

Fig. 6 The susceptibility map of treatment projects for landslides

在有相应的预案或者工程处理措施后才能修建。此外,针对已进行工程治理的灾害点,目前应加强工程的维护、修缮以及对工程防治效果的检测,并对超过防治频率的灾害进行预警预报。

5 结论

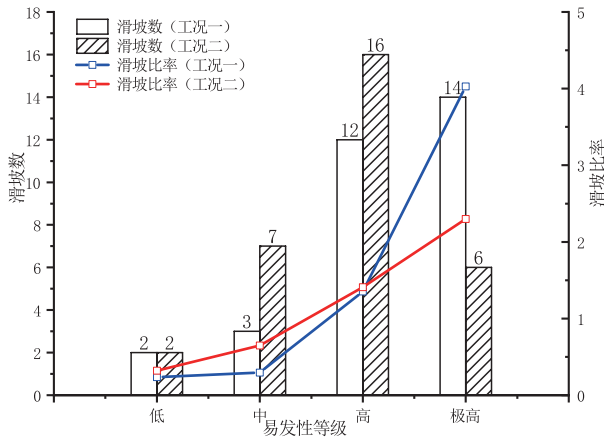
(1)本文以康定市市区为例,选用高程、坡度、坡向、曲率、工程地质岩组、距断裂距离、距水系距离和斜坡结构等8个指标,利用基于斜坡单元的证据权重法,对研究区进行易发性评价,评价精度达83.8%,AUC值达0.778,评价精度较高。

(2)在评价指标二级状态划分过程中,利用证据权重变化趋势以及滑坡在各指标中的分布特点,对各评价指标进行划分,充分考虑了研究区各评价

表 5 工程治理工况斜坡单元统计表

Table 5 The statistical table of treatment project for slope unit

易发性等级	发生滑坡数	斜坡单元面积/m ²	占总滑坡的比例/%	占斜坡单元的比例/%	滑坡比率
低	2	11.73	6.45	20.11	0.32
中	7	20.34	22.58	34.86	0.65
高	16	21.37	51.61	36.62	1.41
极高	6	4.91	19.35	8.42	2.30



工况 1: 天然工况; 工况 2: 工程治理工况

图 7 各工况下滑坡数与滑坡比率对比图

Fig. 7 Comparison diagram of landslide number and landslide ratio under each working condition

指标特点及其与灾害的关系,使划分依据更具合理性和层次性。

(3)利用折减系数法,对研究区已有治理工程的滑坡及其所在斜坡进行了初步评价,结果表明,在不考虑治理工程情况下,极高易发区主要位于康定市炉城镇以及二道桥村一带,高易发区位于雅拉河、折多河与瓦斯沟河谷两侧;考虑治理工程后,极高易发区位于炉城镇三河交汇处,高易发区位于二道桥村一带,评价结果与现场调查基本一致。

(4)在城镇规划建设中,针对极高和高易发区域,在城镇、交通等基础设施以及民房修建过程中应尽量避免开挖坡脚,必须开挖坡脚地段应进行充分的科学论证,在有相应的预案或者工程处理措施后才能修建。此外,针对已进行工程治理的灾害点,目前应加强工程的维护、修缮以及对工程防治效果的检测,并对超过防治频率的灾害进行预警预报。

References

Agterberg F P, Cheng Q, 2002. Conditional Independence Test for Weights-of-Evidence Modeling[J]. *Natural Resources Research*, 11 (4) : 249 – 255 .

Chen X Y, Li M H, Wang D W, et al., 2019. Quantitative evaluation of geohazards susceptibility based on GIS and information value model for Emeishan City, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (4) : 100 – 112 (in Chinese with English abstract).

Fan Q, Ju N P, Xiang X Q, et al., 2015. Application of weights of evidence method in landslide susceptibility zoning—a case study on Tongzi river basin in Guizhou[J]. *Journal of Catastrophology*, 30 (1) : 124 – 129 (in Chinese with English abstract).

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

Huang R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26 (3) : 433 – 454 (in Chinese with English abstract).

Jiang Y, Yin J P, 1992. Xikou landslide-debris flow , Huaying Mountain[J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 3 (2) : 51 – 58 (in Chinese with English abstract).

Kumar R, Anbalagan R, 2019. Landslide susceptibility mapping of the Tehri reservoir rim area using the weights of evidence method[J]. *Journal of Earth System Science*, 128 (6) : 153 .

Li Y, Meng H, Dong Y, et al., 2004. Main types and characteristics of geo-hazard in china-based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15 (2) : 32 – 37 (in Chinese with English abstract).

Mohammady M, Pourghasemi H R, Amiri M, 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran) : a comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms[J]. *Natural Hazards*, 99 (2) : 951 – 971 .

Segoni S, Tofani V, Lagomarsino D, et al., 2016. Landslide susceptibility of the Prato-Pistoia-Lucca provinces, Tuscany, Italy[J]. *Journal of Maps*, 12 (sup1) : 401 – 406 .

Tang R, 2007. Research on monitoring technology with the application to landslide control—taking Danba landslide for example[D]. Chengdu University of technology.

Tian S J, Zhang S S, Tang Q S, et al., 2019. Comparative study of landslide susceptibility assessment based on different evaluation units[J]. *Journal of Natural Disasters*, 28 (6) : 137 – 145 (in Chinese with English abstract).

Wang D W, Ding J, Wei L W, et al., 2006. Risk assessment of geological hazards in Kangding county town western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26 (2) : 92 – 95 (in Chinese with English abstract).

Chinese with English abstract).

Wang J J, Yin K L, Xiao L L, 2014. 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*, 33 (4) : 797 – 808 (in Chinese with English abstract).

Wang J F, Li S H, Yan L, et al., 2002. Preliminary Analysis on the May_{1st} Landslide at Wulong[J]. *Engineering Science*, 4 (4) : 22 – 28 (in Chinese with English abstract).

Wang Y L, Ding J, Wang D W, 2006. Assessment of the vulnerability of social economy by geological hazards in Kangding county town western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26 (2) : 88 – 91 (in Chinese with English abstract).

Wei L W, Wang D W, Ding J, et al., 2006. Risk assessment of geological hazards in Kangding county town western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26 (2) : 81 – 87 (in Chinese with English abstract).

Xiao T, Segoni S, Chen L, et al., 2020. A step beyond landslide susceptibility maps: a simple method to investigate and explain the different outcomes obtained by different approaches[J]. *Landslides*, 17 (3) : 627 – 640.

Xu C, Dai F C, Yao X, et al., 2009. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28 (S2) : 3978 – 3985 (in Chinese with English abstract).

Yin Y P, 2001. A brief introduction to “5.1” landslide in Wulong, Chongqing[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 12 (2) : 101 (in Chinese with English abstract).

Yin Y P, 2013. On strengthening the prevention and control of geological disasters in the process of Urbanization[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 24 (4) : 5 – 8 (in Chinese with English abstract).

Zhang M S, Xue Q, Jia J, et al., 2019. Method and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous town[J]. *Northwestern Geology*, 52 (2) : 125 – 135 (in Chinese with English abstract).

Zhao L J, Chen D H, Li H, et al., 2017. A method to assess landslide susceptibility by using logistic regression model for Guozigou region, Xinjiang[J]. *Mountain Research*, 35 (2) : 203 – 211 (in Chinese with English abstract).

Zheng W M, Ba R J, Liu Y J, et al., 2012. Risk evaluation of urban seismogeology and geological hazards in Kangding, western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32 (3) : 75 – 78 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈绪钰, 李明辉, 王德伟, 等, 2019. 基于 GIS 和信息量法的四川峨眉山市地质灾害易发性定量评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (4) : 100 – 112.

范强, 巨能攀, 向喜琼, 等, 2015. 证据权法在滑坡易发性分区中的应用——以贵州桐梓河流域为例[J]. *灾害学*, 30 (1) : 124 – 129.

黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 26 (3) : 433 – 454.

姜云, 尹金平, 1992. 华蓥山溪口滑坡—碎屑流[J]. *地质灾害与环境保护*, 3 (2) : 51 – 58.

李媛, 孟晖, 董颖, 等, 2004. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 15 (2) : 32 – 37.

唐然, 2007. 监测技术及其在滑坡防治过程中的应用研究——以丹巴县城建设街后山滑坡为例[D]. 成都理工大学.

田述军, 张珊珊, 唐青松, 等, 2019. 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*, 28 (6) : 137 – 145.

王德伟, 丁俊, 魏伦武, 等, 2006. 四川康定城地质灾害易发分区评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 26 (2) : 92 – 95.

王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽, 2014. 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*, 33 (4) : 797 – 808.

王建锋, 李世海, 燕琳, 等, 2002. 重庆武隆“五一”滑坡成因分析[J]. *中国工程科学*, 4 (4) : 22 – 28.

王永利, 丁俊, 王德伟, 等, 2006. 四川康定城地质灾害社会经济易损性分区评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 26 (2) : 88 – 91.

魏伦武, 王德伟, 丁俊, 等, 2006. 四川康定城地质灾害危险性分区评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 26 (2) : 81 – 87.

许冲, 戴福初, 姚鑫, 等, 2009. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 28 (S2) : 3978 – 3985.

殷跃平, 2001. 重庆武隆“5.1”滑坡简介[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 12 (2) : 101.

殷跃平, 2013. 加强城镇化进程中地质灾害防治工作的思考[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 24 (4) : 5 – 8.

张茂省, 薛强, 贾俊, 等, 2019. 山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践[J]. *西北地质*, 52 (2) : 125 – 135.

赵良军, 陈冬花, 李虎, 等, 2017. 基于二元逻辑回归模型的新疆果子沟滑坡风险区划[J]. *山地学报*, 35 (2) : 203 – 211.

郑万模, 巴仁基, 刘宇杰, 等, 2012. 四川康定城市地震地质及地质灾害风险评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 32 (3) : 75 – 78.