

基于I-CF模型的四川德格县滑坡危险性评价与区划

赵伯驹, 李 宁, 幸夫诚, 向 晗

Landslide geological hazard assessment based on the I-CF model of Dege County in Sichuan Province

ZHAO Boju, LI Ning, XING Fucheng, and XIANG Han

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GIS的涪江上游南坝-水晶流域滑坡危险性评价

杨栓成, 王运生

中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 15-22

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

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan-Tibet Railway based on contributing weights model

边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 王栋 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 84-93

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202302030

赵伯驹, 李宁, 幸夫诚, 等. 基于 I-CF 模型的四川德格县滑坡危险性评价与区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 32-42.
ZHAO Boju, LI Ning, XING Fucheng, et al. Landslide geological hazard assessment based on the I-CF model of Dege County in Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 32-42.

基于 I-CF 模型的四川德格县滑坡危险性评价与区划

赵伯驹, 李 宁, 幸夫诚, 向 晗
(西华大学应急管理学院, 四川 成都 610039)

摘要: 文章以德格县为研究区, 以 7 m DEM 进行地形分析处理, 并结合相关调查数据建立了德格县滑坡灾害数据库, 通过选取的地震峰值加速度、断裂带、水系、坡度、坡向、高程、岩性等 7 个指标, 在 GIS 技术支持下, 利用信息量模型(I)、层次分析法模型(AHP)、确定性系数模型(CF)相互耦合对研究区灾害敏感性评价, 再分析得到活动频率因素对研究区全县域进行危险性评价, 将得到的结果分成 4 个区域, 分别为高风险区、较高危险区、中危险区、低风险区, 其中高、较高危险区占总面积 2.23%。其中, 滑坡灾害占总灾害的 42%。评价结果与实际调查结果符合程度较高, 能够为该地域未进行实地调查的地方进行相关滑坡灾害的预测预报, 并对安全防治提供技术支持, 亦可以为其他地区滑坡灾害危险性评价提供理论指导和技术参考。

关键词: 滑坡; GIS; 危险性评价; 确定性系数法; 德格县

中图分类号: P642.24

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)05-0032-11

Landslide geological hazard assessment based on the I-CF model of Dege County in Sichuan Province

ZHAO Boju, LI Ning, XING Fucheng, XIANG Han
(School of Emergency Management, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

Abstract: This study focuses on Dege County as the research area, and carries out terrain analysis and processing with 7m DEM. A landslide hazard database for Dege County is establishing using relevant survey data. With the support of GIS technology, this research employs the information quantity model (I), analytic hierarchy process model (AHP), and deterministic coefficient model (CF) coupling to evaluate the hazard sensitivity within the study area based on seven selected indicators: mic peak acceleration, fault zone, water system, slope, slope direction, elevation, and lithology. Subsequently, an assessment of hazard is conducted for the entire county domain by considering factors related to landslide activity frequency. The results are categorized into four zones: high risk, relatively high risk, moderate risk, and low risk. The high and relatively high-risk zones collectively cover 2.23% of the total area, with landslides accounting for 42% of the overall hazards. The evaluation results align well with the actual survey findings, providing technical support for predicting, forecasting, and implementing safety measures against landslide disasters in areas that without field investigation. Furthermore, it can serve as a

收稿日期: 2023-02-28; **修订日期:** 2023-07-29

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGP2023K010); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0809)

第一作者: 赵伯驹(1998-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评价等方面的研究。E-mail: 2751820864@qq.com

通讯作者: 李 宁(1990-), 男, 河南商丘人, 工学博士, 硕士生导师, 主要从事地震地质灾害调查与评价、地质灾害致灾机制与长期演化效应、地质灾害风险评价与管控等方面的研究工作。E-mail: 790626903@qq.com

theoretical guide and technical reference for the risk assessment of landslide hazard in other regions.

Keywords: landslide; GIS; hazard assessment; certainty factor method; Dege County

0 引言

德格县位于四川省西北部川藏交界处,属于青藏高原东南端,横断山系的沙鲁里山脉北部金沙江峡谷地带^[1]。区内地形复杂,以侵蚀(中)高山和高山峡谷地貌为主,山地占总面积的 81.8% 以上,谷深坡陡,孕灾环境良好。历史上该地区地质灾害频繁(图 1)。2018 年,更庆镇欧普隆村司根龙组发生崩塌,造成一户房屋被毁,并造成该户居民 4 死 1 伤。2021 年 3 月初,德格县更庆镇二完小背后滑坡发生变形破坏,造成房屋变形破坏,

目前该滑坡正处于变形加剧趋势,威胁 20 余户总计约 1 100 人的生命财产安全。

随着社会经济的飞速发展,人类生存空间延伸至山区,人类工程活动强度持续增强,使得德格县地质环境不断恶化,地质灾害对区内人民群众的生命财产安全构成的威胁与损失也日益增加,更加地限制了当地社会经济的可持续发展。为此,研究区的地质灾害防治已经成为当前防灾减灾主要工作。基于当前背景及孕灾现状,对地质灾害进行危险性科学区划,对灾害的综合治理和社会发展规划具有十分重要的现实意义。



图 1 研究区典型灾害点照片
Fig. 1 Photographs of typical hazard sites in the study area

1 研究区概况

德格县地处我国青藏高原东南边缘地带。全境总体地势特点为中间区域较高,呈西北到东南走向。全县海拔最高点为 6 168 m,位于研究区中部的雀儿山地区,最低点海拔为 2 980 m,位于研究区与南部临县交界地区。研究区以中部的雀儿山地区为分割点,分为东北和西南两部分。东北部分地势相对平坦,河谷宽阔,土壤肥沃,属于川西北丘状高原地貌。西南地区多以峡谷为

主,河流湍急,河谷深切,地势的高差悬殊,属于高山峡谷地貌(图 2)。根据相关资料调查,研究区属于泛华夏大陆晚古生代-中生代羌塘-三江构造区^[2],横跨甘孜—理塘结合带和金沙江结合带;其中俄支—竹庆断裂带斜贯研究区东北部;整个地区地层岩性复杂,主要以三叠系地层为主,其分布面积有 9 232.5 km²,占整个沉积岩分布面积的 87.96%^[3],但其多遭受不同程度的区域变质作用,所以有大面积的变质岩地区,因而给滑坡提供了丰富的物源条件。

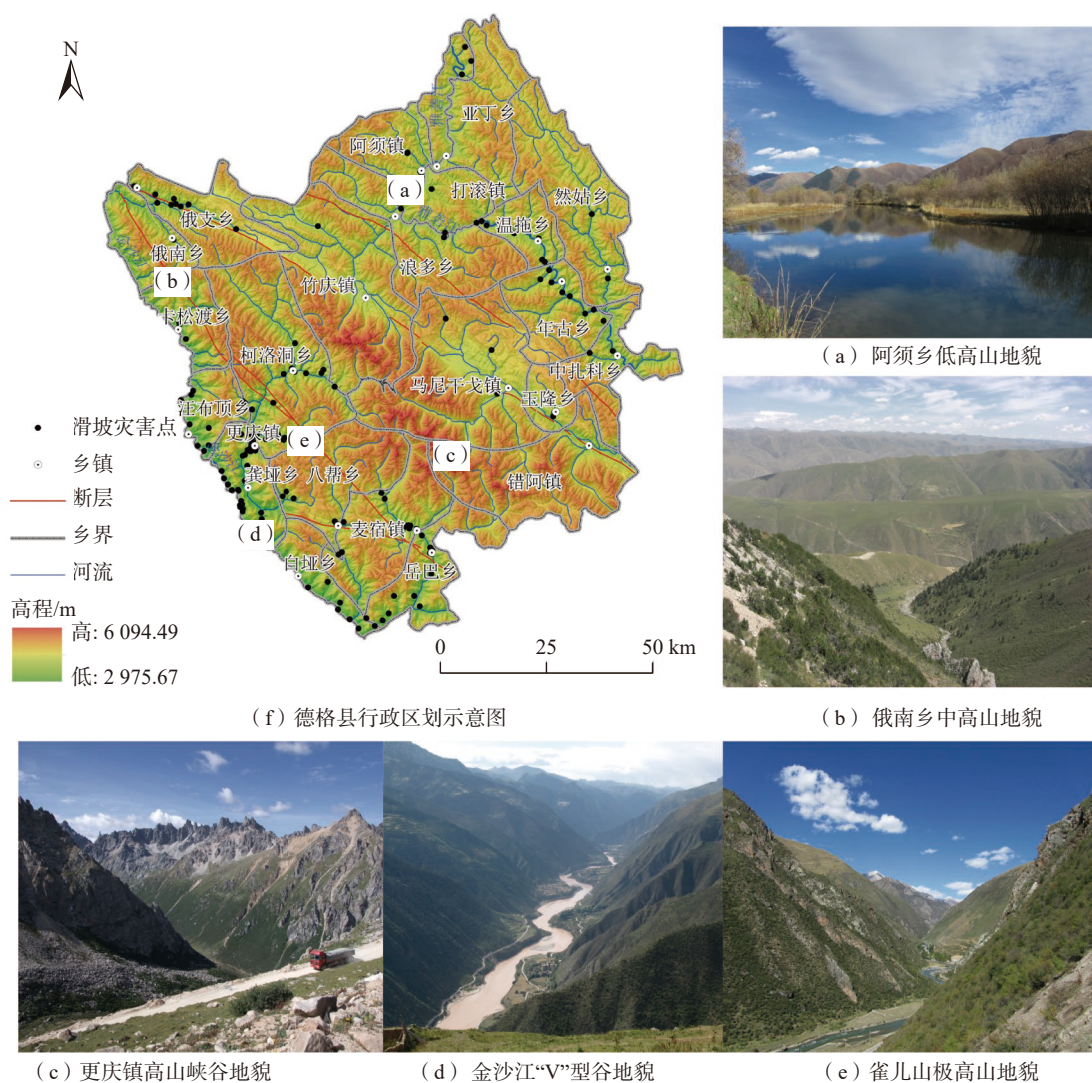


图 2 研究区地理概况图

Fig. 2 Geographic overview map of the study area

2 数据获取及研究方法

2.1 数据获取

本文所用数据主要包括高分一号(GF1)高精度遥感影像和 DEM 数据。利用这些数据,在踏勘建立遥感解译标志的基础上,对德格县全区地质灾害的类别、形态特征、分布情况、规模大小和危害程度等进行了 1:50 000 地质灾害遥感解译,解译面积 11 439 km²,并通过野外调查对解译的部分点进行复核。经过遥感解译及现场复核,最终发现地质灾害隐患点一共 388 处,详情见图 3 和表 1。

从四川省测绘地理信息局、四川省地震局和国家气象科学数据中心等相关机构收集了 1:50 000 地形数据图、1:10 000 地质数据图和地震烈度数据以及甘孜州年均降雨量数据。从 1:50 000 地形图可提取出

等高线和水系矢量数据;利用 GIS 工具从 1:10 000 地质数据图提取出断裂带和岩性矢量数据;从甘孜州年均降雨量数据中提取其县域年均降雨量分布矢量数据。具体使用数据见表 2。

2.2 评价方法

本文涉及采用的方法是层次分析法和信息量法(I-AHP)的结合与确定性系数法和信息量法(I-CF)的结合。目前此类方法在滑坡敏感性评价方面有着广泛地运用。其中层次分析法是通过已有的专业知识进行判定、评估地质灾害现象,以最终得到权重^[4-8]。确定性系数法其本质上是一个概率函数,其优势在于确定性系数是可以根据已有灾害点与孕灾因子之间的关系确定地质灾害与孕灾因子的相关性大小。信息量法在地质灾害危险性评价领域,通常是使用常规的数学统计方法来量化许多影响地质环境稳定性的各个因素^[9-11]。故

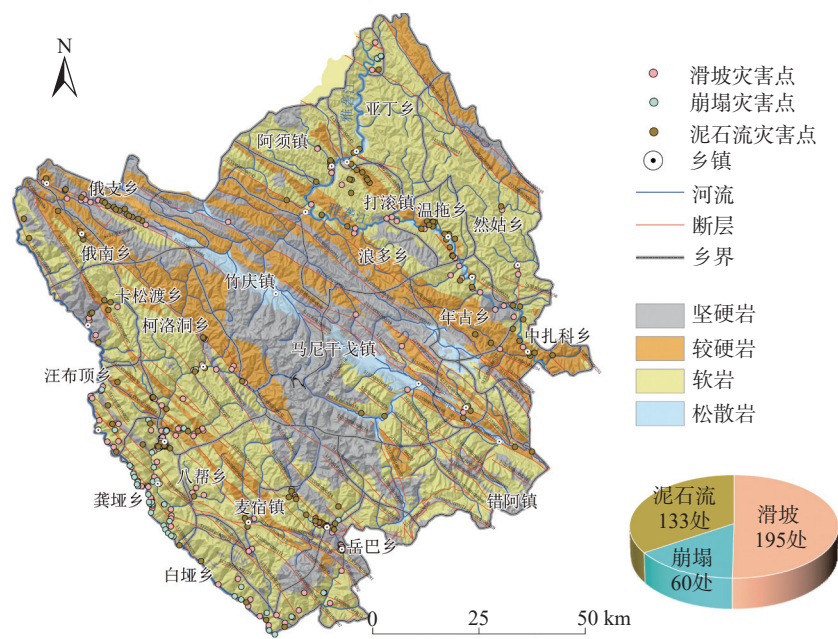


图3 研究区灾害分布图

Fig. 3 Distribution map of landslide hazards in the study area

表 1 地质灾害隐患点分布表

Table 1 Distribution table of geological hazards hidden danger points

序号	乡镇	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处	合计	面积/ km ²	每百平方公里 灾害数/处
1	阿须镇	5	1	6	12	365.19	3.29
2	八帮乡	8	1	4	13	562.71	2.31
3	白垭乡	8	6	4	18	200.69	8.97
4	错阿镇	0	0	2	2	498.33	0.40
5	打滚镇	3	3	4	10	461.77	2.17
6	俄南乡	3	0	6	9	299.07	3.01
7	俄支乡	8	0	16	24	439.17	5.46
8	更庆镇	58	13	14	85	427.51	19.88
9	龚垭乡	10	9	2	21	267.66	7.85
10	卡松渡乡	4	1	7	12	299.67	4.00
11	柯洛洞乡	8	2	5	15	963.76	1.56
12	浪多乡	3	0	4	7	619.74	1.13
13	马尼干戈镇	3	0	2	5	1 075.43	0.46
14	麦宿镇	11	1	16	28	584.16	4.79
15	年古乡	10	0	3	13	397.21	3.27
16	然姑乡	3	0	1	4	481.87	0.83
17	汪布顶乡	25	21	4	50	226.63	22.06
18	温拖乡	7	0	12	19	274.14	6.93
19	亚丁乡	0	1	6	7	607.54	1.15
20	玉隆乡	2	0	3	5	202.83	2.47
21	岳巴乡	11	1	1	13	605.36	2.15
22	中扎科乡	4	0	11	15	447.74	3.35
23	竹庆镇	1	0	0	1	1 131.09	0.09

表 2 使用数据详情表

Table 2 Data utilization details table

数据名称	数据精度(比例尺)
高分一号(GF1)高精度遥感影像	0.5 m
德格县DEM	7 m
德格县地形数据图	1 : 50 000
德格县地质数据图	1 : 10 000
甘孜州年均降雨量数据	—
地震峰值加速度分布图	—

本文将以上两种组合方法比较,能较好地选择最适合研究区滑坡风险实际分布,将主观上的分析和客观上的现实有机结合起来。由于泥石流灾害在评价上不适合运用信息量模型,故选取 255 处滑崩灾害作为样本点进行上述方法建模。

3 危险性评价

3.1 评价单元划分

本研究区总面积为 11 439 km²,每处灾害点都被视为一个独立的评价单元,但全图图幅无法对每个评价单元都进行清晰表达。为克服这种情况,文章采用已有数据进行分析,并利用 ArcGIS 软件处理数据栅格化。使用栅格数据当评价单元的原因是栅格数据可以满足评价的准确性要求,并在大数据量的条件下,栅格数据通过 GIS 技术支持运算速度有明显的提升。加之必须充分反映灾害点的地理位置情况,故选择用 7 m×7 m 的区域作为一个基础单元,将研究区栅格划分为 16 909 列,

18 076 行。

3.2 指标因素的选取及分级

导致滑坡发生的因素是多方面的,将其视作一个复杂的非线性系统,其中每个子系统每个因素都作为一个指标,再根据研究区滑坡的发育特点、充分考虑地质环境条件、运用指标体系方法,再根据各特点选择并组合具有代表性的指标,构成了研究区滑坡灾害敏感性指标体系^[12-13],保证其能全面反映地质灾害危险性的基本情况,亦可应用于实际评价中;结合大量材料^[14-17],选取地震动峰值加速度、断裂带距离、水系、坡度、坡

向、高程、岩性 7 个指标对研究区县域进行滑坡地质灾害的敏感性评价,然后将各个指标进行分级,具体如下:

(1) 地震动峰值加速度:根据目前已有的地震动参数的区域(GB 18306—2015)划分,可知研究区的地震动峰值加速度分级有:0.1 g、0.15 g、0.2 g 和 0.3 g,见图 4(a)。

(2) 断裂带的距离:经调查研究区有 38 条断裂构造,其中 168 处地质灾害隐患点与断裂构造有关,占总数的 43.3%。选取了 4 个典型的大型断裂带,利用 ArcGIS 工具建立了矢量数据,并将其划分为 4 个区

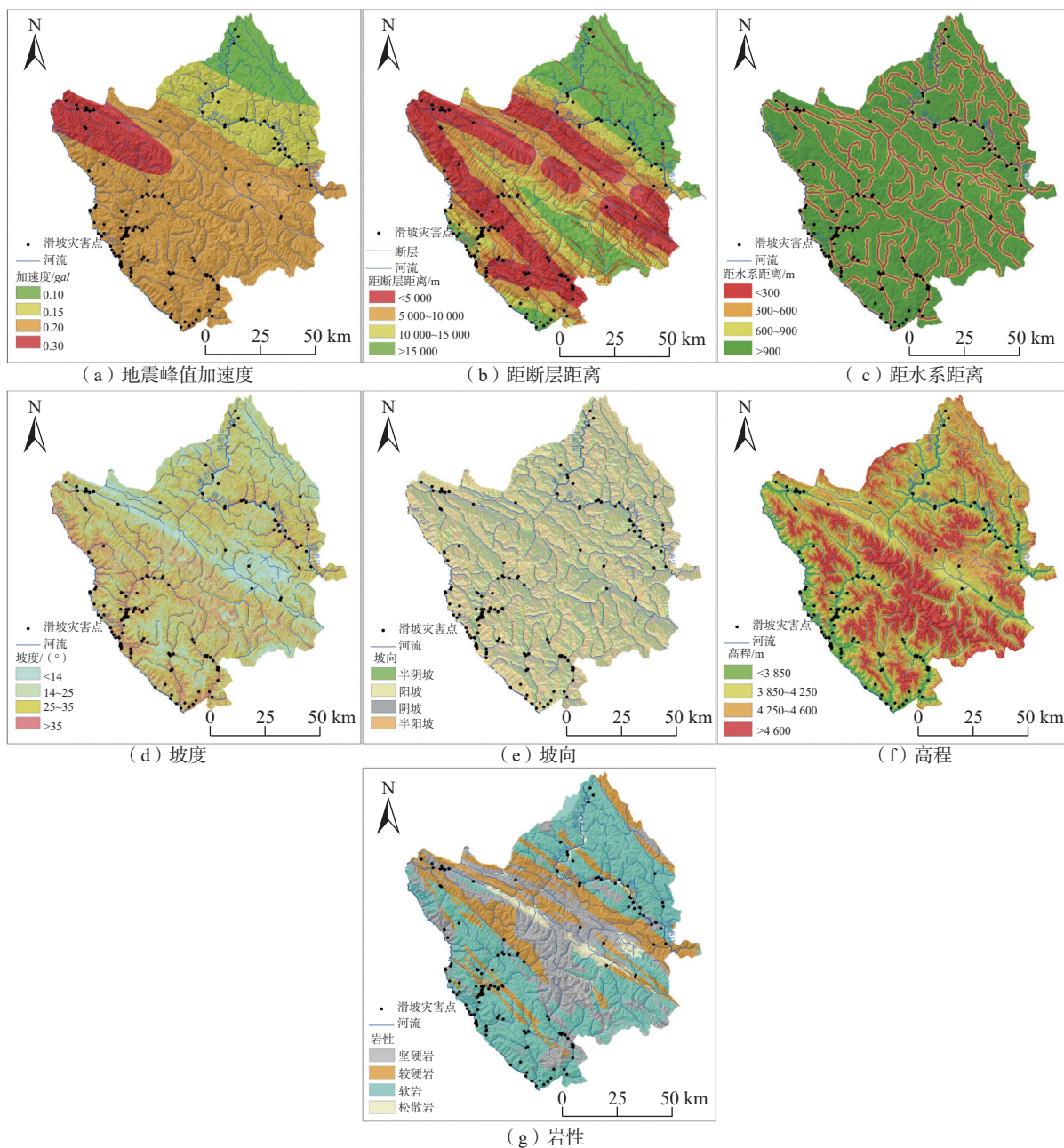


图 4 敏感性指标分级图

Fig. 4 Classification chart of sensitivity indicators.

域 (<5 000 m, 5 000 ~ 10 000 m, 10 000 ~ 15 000 m, >15 000 m), 见图 4(b)。

(3) 水系: 经解译数据, 研究区水资源丰富; 利用 ArcGIS 对水系矢量化数据建立多环缓冲区分析, 分为 4 个区域: <300 m、300 ~ 600 m、600 ~ 900 m 和 >900 m, 见图 4(c)。

(4) 坡度: 通过将研究区的 DEM 数据进行坡度分析发现, 大多数的滑坡分布在 14° ~ 35°, 这与区内地形地貌特征关系密切, 本文将坡度等距分成 4 类, 分别为: <14°、14 ~ 25°、25 ~ 35°和>35°, 见图 4(d)。

(5) 坡向: 通过利用 ArcGIS 对研究区的 DEM 数据进行坡向分析, 分成 4 类, 分别为: 阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡, 见图 4(e)。

(6) 高程: 据调查高程大于 5 000 m 的区域极少, 绝大多数地区的高程在 3 800 ~ 4 600 m。所以根据其 DEM 数据等距划分成 4 类, 分别为: < 3 800 m、3 800 ~ 4 200 m、4 200 ~ 4 600 m、>4 600 m, 见图 4(f)。

(7) 岩性: 研究区具有多种岩石(土)工程地质特征, 在其分布上相当复杂。故本文通过现有的 1 : 50 000

地质图, 将其中的岩性按力学强度进行分类, 共 4 类, 分别为: 坚硬岩、较硬岩、较软岩, 松散岩, 见图 4(g)。

3.3 指标敏感性分级量化及权重

(1) 指标敏感性分级量化: 根据信息量模型的应用, 先通过 ArcGIS 软件将之前提到的指标的矢量数据进行栅格化, 再照已有的分级进行重分类, 最后利用提取分析工具进行信息提取, 并结合已有的实地考察整理统计得到的研究区的滑坡灾害数量及其分布进行统计, 将分级统计的数据代入公式:

$$I(X_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}$$

(1)

式中: N ——研究区域内滑坡灾害分布的总的数量;
 S ——研究区总面积/km²;
 N_i ——分布在指标 X_i 内滑坡灾害数量;
 S_i ——研究区域内有指标 X_i 的区域面积/km²。

根据以上的公式方法, 再进行归一化得出各个指标的信息量(表 3)。

从表 3 中数据可以得出: 滑坡发生的条件与水系和坡度密切相关, 这是因为在自然条件如降雨或者人为的

表 3 指标分级敏感性量化值

Table 3 Quantitative sensitivity values for indicator classification

指标	指标分级	灾害点个数	分区面积/km ²	信息量	信息量归一化
地震峰值加速度/g	0.10	6	1 131.644 3	-1.317 042 484	0
	0.15	30	1 004.577 4	-0.395 084 795	0.592 148 498
	0.20	207	1 997.801 2	0.239 927 923	1
	0.30	12	7 304.976 9	-0.743 000 070	0.368 691 923
地震断裂带缓冲区/m	[0,5 000)	52	3 625.008 2	-0.440 847 835	0
	[5 000, 10 000)	64	2 940.594 3	-0.023 963 605	0.343 707 09
	[10 000, 15 000)	87	1 803.294 8	0.772 057 694	1
	[15 000,56 037)	52	3 070.102 5	-0.274 702 222	0.136 981 495
水系缓冲区/m	[0,300)	170	1 299.638 0	1.769 477 68	1
	[300,600)	27	1 285.498 2	-0.059 544 488	0.413 680 16
	[600,900)	14	1 239.986 0	-0.680 277 809	0.214 695 004
	[900,6 924)	44	7 613.877 6	-1.350 017 93	0
坡度/(°)	[0,14)	69	5 075.315 7	-0.494 517 212	0
	[14,25)	92	3 495.439 2	0.166 094 562	0.551 272 903
	[25,35)	56	2 024.977 0	0.215 558 335	0.592 549 851
	[35,90)	38	843.267 9	0.703 821 706	1
坡向	阴坡	67	2 730.648 3	0.095 918 567	0.892 332 366
	半阴坡	50	2 961.639 1	-0.277 954 847	0
	阳坡	63	2 824.838 9	0.000 448 382	0.664 471 457
	半阳坡	75	2 921.869 0	0.141 029 635	1
高程/m	[2 980,3 800)	59	1 304.640 5	0.707 374 888	1
	[3 800,4 200)	67	3 609.761 8	-0.183 184 166	0.245 339 931
	[4 200,4 600)	94	4 005.708 5	0.051 339 327	0.444 075 225
	[4 600,6 168)	35	2 518.889 0	-0.472 704 846	0
岩性	坚硬岩	31	2 728.681 9	-0.674 066 445	0.150 627 096
	较硬岩	24	2 558.469 2	-0.865 590 279	0
	较软岩	190	5 679.536 0	0.405 919 554	1
	松散岩	10	472.312 8	-0.051 536 121	0.640 226 396

不合理施工导致斜坡附近的岩石土体变得破碎,导致其水文地质条件发生改变,而水文地质条件的改变对整个斜坡的结构产生影响,使其变得更加的不稳定,而且由于地表河流不断冲刷和切割沿岸斜坡,使沿岸坡度不断增加;加之河水位的变化导致与地下水水位关系发生改变使斜坡内部形成了很大的渗透力,导致斜坡结构发生改变,往不稳定方向发育,进而发生滑坡。

(2)指标的权重(层次分析法):各个指标的滑坡敏感性权重值将通过上述方法中求取。首先将得到的指标数据进行两两比较并进行评分,再结合该研究区的调查经验及成果,最终建立判断矩阵。然后利用 YAAHP 软件求得判断矩阵的最大特征值为 $\lambda_{\max}=7.380\ 2$, 一次性指标 $CI=0.046\ 6$, 通过查表可得 $RI_{(n=7)}=1.36$, 则检验性指标 $CR=0.034\ 3<0.1$, 证明该矩阵符合一致性判断,赋权合理,即可获得 7 个指标的权重(表 4)。

表 4 判断矩阵及权重
Table 4 Decision matrix and weight

	断层	水系	高程	坡度	坡向	岩性	峰值加速度	权重
峰值加速度	1	1/2	1/3	1/2	1	1/2	1/2	0.073 4
距断层距离		1	1	1	2	2	1	0.170 5
距水系距离			1	1	2	2	1/2	0.168 1
坡度				1	4	3	2	0.221 4
坡向					1	1/3	1	0.065 5
高程						1	1/2	0.119 0
岩性							1	0.182 1

(3)指标的权重(确定性系数法):根据上述介绍其具体公式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{pp_a - pp_s}{pp_a(1 - pp_s)}, & pp_a \geq pp_s \\ 0, & pp_a = pp_s \\ \frac{pp_s - pp_a}{pp_s(1 - pp_a)}, & pp_a \leq pp_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: pp_a ——指标 a 中单元存在的灾害点的个数与指标 a 的单元面积的比值;

pp_s ——研究区灾害点个数与研究区面积的比值。

通过 pp_a 与 pp_s 相互比较大小,会得到不同的计算公式。由上述公式得知, CF 值的变化范围在 $-1 \sim 1$ 。其值的变化范围与灾害的发生呈正相关;当计算 CF 值约等于 0 时,则不能确定该指标是否容易发生灾害。再通过 $W=CF_{\max}-CF_{\min}$ 方可得出每个指标所对应的权重。具体结果如表 5 所示。

3.4 敏感性评价模型及结果

将评价指标量化后的数据和各个指标的权重数据进行整理,可获得其每个指标的敏感性量化值及其对应

表 5 CF 值及权重

Table 5 CF values and weights

指标	$CF_{\max}$	$CF_{\min}$	权重
峰值加速度	0.802 7	-0.927 8	1.730 5
距断层距离	0.550 2	-0.361 6	0.911 9
距水系距离	0.848 4	-0.745	1.593 5
坡度	0.516 8	-0.395 5	0.912 3
坡向	0.134 5	-0.246 8	0.381 3
高程	1.077 3	-0.381 9	1.459 3
岩性	0.341 2	-0.584 6	0.925 9

的权重,然后构建其评价模型^[18]:

$$S = \sum A_i X_{ij} \quad (3)$$

式中: S ——滑坡的敏感性数值;

A_i ——指标 i 滑坡敏感性权重;

X_{ij} ——指标 i 的某一类别 j 的敏感性量化值。

利用式(3),再通过 ArcGIS 空间分析工具进行加权叠加分析,得到滑坡敏感性指数。其指数的大小与敏感性的大小呈正相关。将得到的结果在 ArcGIS 中进行区划,利用栅格重分类工具,采取工具中的自然断点法将未分级的研究区滑坡敏感性的区划图进行分级,分为高敏感区、较高敏感区、中敏感区和低敏感区。具体结果见图 5。

由图 5 结果可知,两个模型的低敏感性、较高敏感性,高敏感性结果总体趋势大致相同,但使用 I-AHP 模型的评价结果相对于 I-CF 模型的评价结果在中敏感性区域的比例较大。主要突出在东北地方的河道、打滚镇、阿须镇一带,这跟调查结果的实际情况略有不一致。不一致的原因主要是权重计算的主观性过大,过于突出断层和坡度的权重,而现实情况是断层、坡度指标的敏感度并不是导致德格县灾害的主要原因,也侧面反映出了 I-AHP 模型的局限性。I-CF 模型在拥有详细灾害分布的情况下,客观地展示了各指标对灾害敏感性的贡献程度,有效地弥补了 I-AHP 模型的不足。

ROC 是通过验证和比较两种模型的精度是滑坡敏感性分区的重要步骤,故本文将通过 ROC 曲线进行验证。ROC 曲线敏感度为纵坐标, I-特异性为横坐标。AUC 取值范围在 $0 \sim 1$, AUC 值越大代表其效果越好,通常认为 $AUC>0.7$, 表示分类预测能力较强^[19-21]。将已知的灾害点中随机抽选 70 个灾害点作为状态变量的值,再用 GIS 软件随机生成 30 个非灾害点;通过 SPSS 软件对两种模型的结果进行验证,得出层次分析法-信息量模型(I-AHP)的预测精度为 0.799,确定性系数法-信息量模型(I-CF)的预测精度为 0.835。可知 I-CF 模型

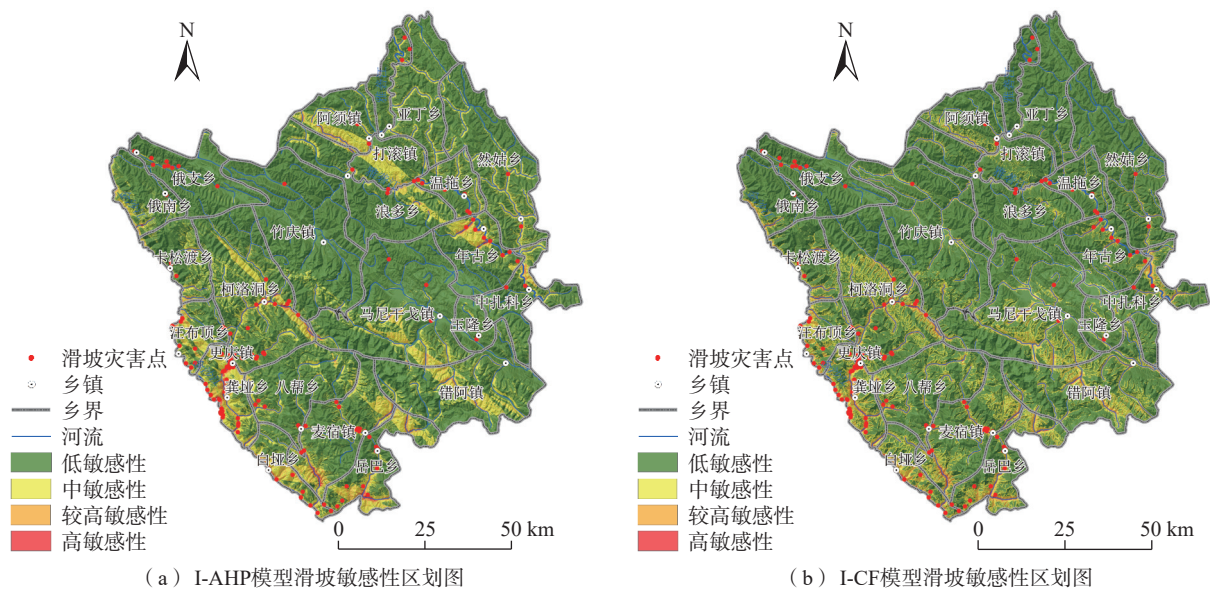


图 5 研究区滑坡敏感性区划图

Fig. 5 Sensitivity zoning map of landslides in the study area

对滑坡分布更敏感, 预测结果更可靠, 进行滑坡灾害敏感性评价更好, 具体结果见图 6。

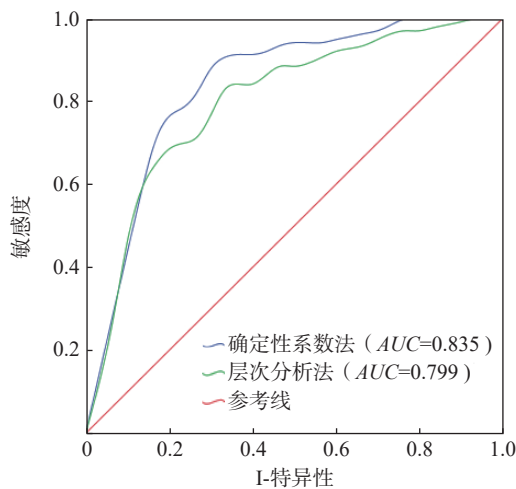


图 6 ROC 曲线图

Fig. 6 ROC curve

3.5 危险性评价模型及结果

滑坡的危险性主要反映的是斜坡发生滑坡时的自然属性特征。关于这方面的评价方法国内外学者普遍认为滑坡灾害的发生是由时间概率和空间概率两大因素造成的。降雨形成的地表水可以控制和影响侵蚀后的岩石和土体, 使其内部含水量发生变化, 内部结构并往不稳定的方向发展, 加之降雨具有明显的时间频率特征, 故将降雨量作为时间概率指标。然后根据公式将其归一化, 得出其结果见图 7。

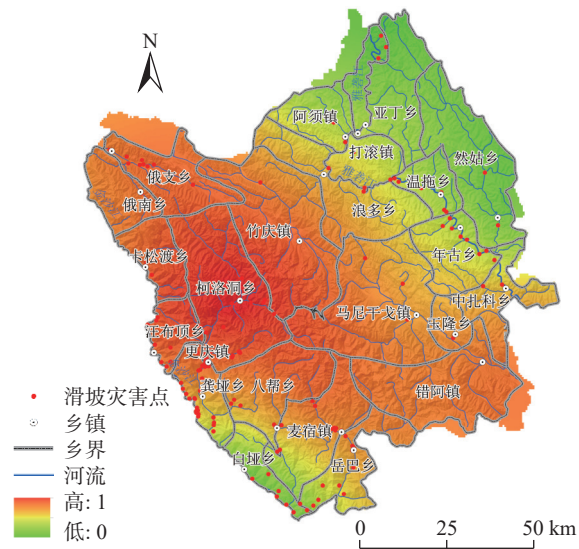


图 7 研究区滑坡活动频率图

Fig. 7 Frequency map of landslide activity in the study area

将得到的研究区滑坡活动频率结果与之前得到的滑坡敏感性结果数据进行汇总, 即可构建该区域危险性评价模型:

$$R = \sum A_i X_i \tag{4}$$

式中: R ——滑坡危险性数值;
 A_i ——指标 i 对于滑坡危险性的权重;
 X_i ——其危险性评价的指标 i 的量化值。

按照之前的方法, 通过 ArcGIS 软件对该区域的滑坡危险性进行加权分析, 利用 3.4 节所得到的数据结果, 再通过专家的经验对两大概率因素进行赋权, 空间

概率因素为 0.6, 时间概率因素为 0.4。

则计算模型可以表达为:

$$R = 0.6X_1 + 0.4X_2 \tag{5}$$

式中: X_1 ——研究区滑坡敏感性结果的归一化值;

X_2 ——研究区滑坡活动频率归一化值。

上文中提到通过 ArcGIS 的空间分析功能, 将计算模型带入后, 对两个因素进行空间叠加分析, 最终得到研究区的滑坡灾害危险性数值, 其数值可以直观反映该区域发生滑坡的相对危险程度, 值越高其危险性越大, 将得到的数值利用 ArcGIS 软件的重分类工具, 自然断点法分为高危险区、较高危险区、中危险区和低危险区, 具体成果图见图 8。

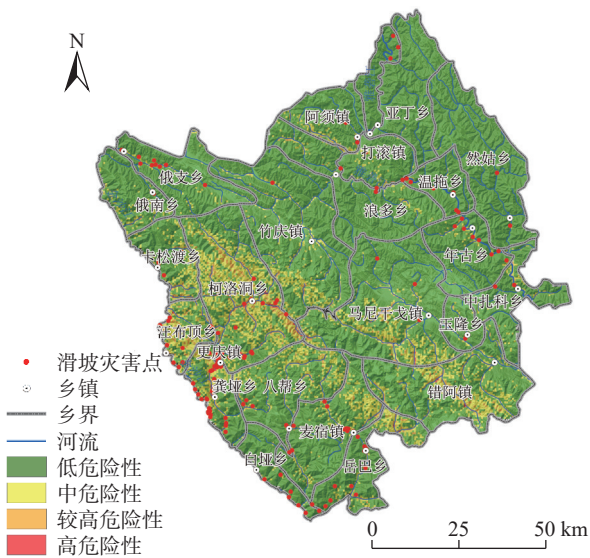


图 8 研究区滑坡危险性区划图
Fig. 8 Landslide risk zoning map of the study area

从图 8 可以看出: 低危险区主要分布在中部竹庆镇一带和东北部的打滚镇、然故乡一带; 中、较高危险区主要分布在更庆镇、科洛洞乡和错阿乡所在地区及其周边地区, 这部分区域靠近水系和断裂带且岩性的力学强度相对稍差; 高危险区分布在金沙江沿岸及支流沟谷两侧的地区和西南部的一些高山峡谷中。通过对比发现研究区地质灾害危险性评价结果总体上与敏感性评价结果相近, 主要原因是德格县的降雨量分布规律与敏感性评价结果相近, 即是北东低, 南西高, 以金沙江流域一带为暴雨集中区, 而该区亦是地质灾害高敏感区。具体数据如表 6 所示。

4 结论与讨论

(1) 本文以甘孜州德格县为研究区, 基于高清遥感

表 6 各危险区栅格统计表

Table 6 Grid statistics for various hazardous zones

危险性等级	面积/km ²	面积比例/%	灾害数量/个	灾害密度/(个·km ⁻²)
低	9 525.590 645	83.27	95	0.010 0
中	1 646.354 741	14.39	56	0.034 0
较高	251.629 077	2.20	49	0.194 7
高	15.425 537	0.13	55	3.565 5

影像解译及现场复核, 共获得地质灾害隐患点 388 处; 其中在更庆镇和汪布顶乡地质灾害最为发育; 主要原因是这些区域更靠近金沙江沿岸及其支流沟谷两侧和西南部部分高山峡谷地区。

(2) 将得到的数据经过筛选建立滑坡敏感性评价体系, 通过 I-AHP ($AUC=0.799$) 模型与 I-CF ($AUC=0.835$) 模型经过比较得出 I-CF 模型更适合于德格县的滑坡灾害敏感性评价, 也为后续的危险性评价提供了有效的支撑。

(3) 评价结果显示全县低危险区域面积约 9 525 km² 所占比例为 83.27%, 高、较高危险区域面积约为 266 km² 占研究区面积的 2.33%, 其中, 较高-高危险区主要分布在金沙江沿岸及其支流沟谷两侧和西南部部分高山峡谷地区, 这与实际情况相符。虽然经过多年建设, 这些地区的防灾减灾水平已有大幅提升, 但受限于基础条件, 地质灾害仍频发多发, 时刻威胁着当地居民的生产生活。因此在进一步完善防治措施及监测预警等工程手段的基础上, 更要加强该区内人们防灾减灾知识的培训, 以提高其防灾意识和应急避险能力, 进而提升该地区综合防灾减灾水平。

致谢: 特别感谢四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队为文章提供的相关数据。其贡献对我们研究的顺利进行有极大的帮助, 他们的付出和支持是本研究顺利完成的关键。

参考文献 (References):

[1] 李鹏岳, 唐业旗, 陈亮. 某厚层堆积体滑坡稳定性分析 [J]. 工程建设与设计, 2012 (8): 148 - 150. [LI Pengyue, TANG Yeqi, CHEN Liang. Study on the stability of accumulation landslide [J]. Construction & Design for Project, 2012 (8): 148 - 150. (in Chinese with English abstract)]
[2] 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分 [J]. 地质通报, 2002, 21(11): 701 - 707. [PAN Guitang, LI Xingzhen, WANG Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet

- Plateau and its adjacent regions [J]. *Regional Geology of China*, 2002, 21(11): 701–707. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 萧瑞良. 德格县生态承载力综合评价研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2013. [XIAO Ruiliang. Dege County comprehensive assessment of ecological carrying capacity [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李萍, 叶辉, 谈树成. 基于层次分析法的永德县地质灾害易发性评价 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 394–399. [LI Ping, YE Hui, TAN Shucheng. Evaluation of geological hazards in Yongde County based on analytic hierarchy process [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 394–399. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(3): 183–192. [ZHANG Xiaodong, LIU Xiangnan, ZHAO Zhipeng, et al. Geological disaster hazard assessment in Yanchi County based on AHP [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(3): 183–192. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘宇恒, 邓辉, 熊倩莹. 基于层次分析法的茂县斜坡地质灾害易发性评价 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(5): 31–35. [LIU Yuheng, DENG Hui, XIONG Qianying. AHP-based evaluation of slope geo-hazard susceptibility of Maoxian County, Sichuan, China [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(5): 31–35. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李微, 洪托, 徐世光, 等. 基于 I 法与 CF 法的榕江县地质灾害易发性评价 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2022, 33(3): 42–48. [LI Wei, HONG Tuo, XU Shiguang, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility based on i method and cf method [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2022, 33(3): 42–48. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 乔德京, 王念秦, 郭有金, 等. 加权确定性系数模型的滑坡易发性评价 [J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(2): 259–267. [QIAO Dejing, WANG Nianqin, GUO Youjin, et al. Landslide susceptibility assessment based on weighted certainty factor model [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(2): 259–267. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价 [J]. *地球与环境*, 2020, 48(4): 471–479. [CHEN Lihua, LI Lifeng, WU Fu, et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model [J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(4): 471–479. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 周天伦, 曾超, 范晨, 等. 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 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 137–150. [ZHOU Tianlun, ZENG Chao, FAN Chen, et al. Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 137–150. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 谈树成, 赵晓燕, 李永平, 等. 基于 GIS 与信息量模型的地质灾害危险性评价——以云南省丘北县为例 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 67–76. [TAN Shucheng, ZHAO Xiaoyan, LI Yongping, et al. Risk assessment on the geological disasters based on GIS and information content model: Taking Qiubei County, Yunnan Province as an example [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2018, 54(1): 67–76. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. [LI Yifei, LIU Yanguo, LIANG Liping, et al. Assessment on hazard of geological disasters in alpine and canyon landforms of qinghai-tibet plateau: A case study of Yajiang County [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 364–370. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 韩用顺, 孙湘艳, 刘通, 等. 基于证据权-投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价 [J]. *山地学报*, 2021, 39(5): 672–686. [HAN Yongshun, SUN Xiangyan, LIU Tong, et al. Susceptibility evaluation of geological hazards based on evidence weight-projection pursuit model in southeast Tibet, China [J]. *Mountain Research*, 2021, 39(5): 672–686. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 沈迪, 郭进京, 陈俊合. 甘肃定西地区地质灾害危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 134–142. [SHEN Di, GUO Jinjing, CHEN Junhe. Risk assessment of geological hazards in Dingxi Region of Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 134–142. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张欣, 王运生, 梁瑞锋. 基于 GIS 的小江断裂中北段滑坡灾害危险性评价 [J]. *地质与勘探*, 2018, 54(3): 623–633. [ZHANG Xin, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng. Assessment of landslide hazard in the middle and northern Xiaojiang fault zone based on GIS [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(3): 623–633. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李益敏, 袁静, 蒋德明, 等. 基于 GIS 的高山峡谷区滑坡灾害危险性评价——以泸水市为例 [J]. *水土保持研*

- 究, 2021, 28(3): 355–363. [LI Yimin, YUAN Jing, JIANG Deming, et al. GIS-based risk assessment of landslide disaster in high mountain valley: Taking Lushui City as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 355–363. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 凌炳, 余敏. 滑坡灾害坡度坡向敏感性分析研究——以云南大关县为例 [J]. 城市地质, 2015, 10(3): 66–68. [LING Bing, YU Min. Sensitivity factors of slope gradient and slope direction of landslides in Daguan County, Yunnan [J]. Urban Geology, 2015, 10(3): 66–68. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王帅永, 唐川, 方群生, 等. 研究强震区滑坡敏感性评价——以汶川县为例 [J]. 地震研究, 2016, 39(2): 279–287. [WANG Shuaiyong, TANG Chuan, FANG Qunsheng, et al. Research on landslide susceptibility assessment in strong seismic zone: Taking Wenchuan Country as an example [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(2): 279–287. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 周鑫. 金沙江上游茂顶河段滑坡成因机制及敏感性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019. [ZHOU Xin. The mechanism analysis and susceptibility mapping of the landslides along the Maoding River at the upstream of the Jinsha River [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 沈玲玲, 刘连友, 许冲, 等. 基于多模型的滑坡易发性评价——以甘肃岷县地震滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 19–28. [SHEN Lingling, LIU Lianyou, XU Chong, et al. Multi-models based landslide susceptibility evaluation: Illustrated with landslides triggered by Minxian earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 19–28. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价 [J]. 地球科学, 2011, 36(6): 1155–1164. [XU Chong, DAI Fuchu, XU Xiwei. Earthquake triggered landslide susceptibility evaluation based on GIS platform and weight-of-evidence modeling [J]. Earth Science, 2011, 36(6): 1155–1164. (in Chinese with English abstract)]