

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0152—12

宋进范, 朱杰勇, 顾鹏, 等. 云南绿春崩塌滑坡地质灾害风险评价 [J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 152–163. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.012.

SONG J F, ZHU J Y, GU P, et al. Risk evaluation of collapse and landslide geological hazards in Lüchun County, Yunnan Province [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 152–163. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.012.

## 云南绿春崩塌滑坡地质灾害风险评价

宋进范<sup>1</sup>, 朱杰勇<sup>1\*</sup>, 顾鹏<sup>1</sup>, 向代龙<sup>1</sup>, 陶日洲<sup>2</sup>

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省地质工程勘察有限公司, 昆明 650051

**摘要:** 地质灾害风险评价对防灾减灾具有重要的指导意义, 针对绿春县地质灾害频发、危害较大的问题, 开展地质灾害风险评价, 为绿春县地质灾害的防治规划、风险管控提供科学依据。以云南省绿春县为研究对象, 选取栅格单元作为评价单元, 选择高程、坡度、坡向、断层距离、河流距离、工程地质岩组、地貌类型、曲率与土地利用类型 9 个评价因子, 借助地理信息系统空间分析功能, 采用信息量模型和层次分析法相结合的加权信息量模型开展绿春县崩塌、滑坡地质灾害易发性评价; 选取绿春县月均降雨量作为研究区地质灾害发生的诱发因素, 进行崩塌、滑坡地质灾害危险性评价; 选取人口密度、威胁人口数量、土地利用类型 3 个承灾因子完成易损性评价; 将危险性指数与易损性指数进行乘积运算, 做出崩塌、滑坡地质灾害风险评价。结果表明, 绿春县划分为低、中、高、极高 4 种风险等级, 分别占据县域面积的 12.84%、46.01%、38.28%、2.87%。低风险区主要分布在半坡乡中部、骑马坝乡北部、大兴镇北部及戈奎乡南部; 中风险区主要分布在大黑山镇北部、大水沟乡西部、骑马坝乡中部和南部、戈奎乡中部以及平河镇西南部; 高、极高风险区主要分布在绿春县城周围以及大兴镇、牛孔镇、三猛乡、平河镇、大水沟乡中部一带。本文得出的地质灾害风险评价结果与实际调查结果相比, 具有较好的吻合性。

**关键词:** 地质灾害; 风险评价; 加权信息量模型; 地理信息系统; 绿春县; 云南省

**中图分类号:** P642.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.012

## Risk evaluation of collapse and landslide geological hazards in Lüchun County, Yunnan Province

SONG Jinfan<sup>1</sup>, ZHU Jieyong<sup>1\*</sup>, GU Peng<sup>1</sup>, XIANG Dailong<sup>1</sup>, TAO Rizhou<sup>2</sup>

1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Geological Engineering Survey Co., Ltd., Kunming 650051, China

**Abstract:** Geological hazard risk evaluation plays a significant guiding role in disaster prevention and mitiga-

收稿日期/Received: 2024-08-04; 修订日期/Revised: 2024-11-19; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 云南省自然资源厅项目 (YNH [2021] -055)

第一作者: 宋进范 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境地质与灾害地质研究。E-mail: 1064861954@qq.com

\* 通信作者: 朱杰勇 (1961—), 男, 教授, 主要从事矿产普查与勘探、地质灾害、工程地质与水文地质研究。

E-mail: zhujiyong@kmust.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

tion. Focusing on the issues of frequent and severe geological hazards in Lüchun County, this study conducts a geological hazard risk evaluation to provide scientific support for disaster prevention planning and risk management in Lüchun County. Taking Lüchun County in Yunnan Province as the study area, grid unit is selected as the evaluation unit, and nine evaluation factors are chosen: elevation, slope, aspect, distance to faults, distance to rivers, engineering geological rock groups, geomorphological types, curvature, and land use types. Utilizing the spatial analysis function of geographic information system, the weighted information value model, which combines the information value model and the analytic hierarchy process, is applied to evaluate the susceptibility of collapse and landslide geological hazards in Lüchun County. The monthly average rainfall in Lüchun County is selected as the triggering factor for geological hazard evaluation of landslides and collapses in the study area. Three disaster bearing factors: population density, the number of threatened people, and land use types, are selected to complete the vulnerability evaluation. The hazard index and vulnerability index are multiplied then to produce the risk evaluation of collapse and landslide geological hazards. The results show that Lüchun County can be divided into four risk levels: low, medium, high and extremely high, which accounted for 12.84%, 46.01%, 38.28% and 2.87% of the county area, respectively. The low risk areas are mainly located in the middle of Banpo Township, the north of Qimaba Township, the north of Daxing Town and the south of Gekui Township. The middle risk areas are mainly distributed in the north of Daheishan Town, the west of Dashuigou Township, the middle and south of Qimaba Township, the middle of Gekui Township and the southwest of Pinghe Town. High and extremely high risk areas are mainly distributed around Lüchun County and Daxing Town, Niukong Town, Sanmeng Township, Pinghe Town, and the middle of Dashuigou Township. The results of geological hazards risk evaluation obtained in this paper are in good agreement with the actual investigation.

**Keywords:** geological hazards; risk evaluation; weighted information model; GIS; Lüchun County; Yunnan Province

## 0 引言

地质灾害是地质因素(地质构造、地形地貌)、引发条件(降雨、地震、人类工程活动)耦合作用和承灾对象(人员、财产、环境设施)遭遇的结果<sup>[1]</sup>。地质灾害风险评价是一门将自然属性与社会属性结合在一起的交叉学科,主要针对风险区域内地质灾害发生的概率及其潜在影响进行定量分析和评估,并旨在通过实施相应保护措施来降低这些风险发生的可能性<sup>[2]</sup>。

20世纪80年代开始,地质灾害风险评估研究迅速发展,评价模型和评价方法不断创新。目前,地质灾害的评价方法主要分为定性和定量2类。常用的定性方法有专家打分法、层次分析法等<sup>[3]</sup>。Saleem等<sup>[4]</sup>在巴基斯坦的喜马拉雅滑坡频发地带采用层次分析法对滑坡的评价因子进行权重分配,得出该地的滑坡风险等级。定量方法主要有信息量模型<sup>[5]</sup>、支持向量机模型<sup>[6]</sup>、频率比模型<sup>[7]</sup>、随机森林模型<sup>[8]</sup>等。Novellino等<sup>[9]</sup>基于遥感数据集

及机器学习模型对缓慢移动的大规模运动的滑坡进行危险性评价,并基于建筑物及人口数据开展了缓慢移动的滑坡风险评价;丁明涛等<sup>[10]</sup>基于GIS及信息量模型开展了芦山地震灾区的滑坡灾害风险评价。由于崩塌滑坡地质灾害影响因素众多,单一的评价模型已较难满足地质灾害评价的精度。因此将定量的信息量模型和定性的层次分析法进行耦合,以提高地质灾害评价的精度。焦伟之等<sup>[11]</sup>采用层次分析法、信息量模型及加权信息量模型对大新镇开展地质灾害易发性评价,结果表明加权信息量模型的精度最高,具有较好的准确性。

绿春县县域均属红河水系,受沟谷深切割影响,山高坡陡,地质构造复杂,人类活动频繁,地质灾害防治形势较为严峻。笔者以云南省绿春县为研究对象,基于研究区的孕灾地质环境分析,选取高程、坡度、坡向、地貌类型、河流距离、断层距离、曲率、工程地质岩组、土地利用类型等9个影响研究区崩塌、滑坡地质灾害产生的评价因子,基于GIS平台,通过加权信息量模型对研究区崩塌、

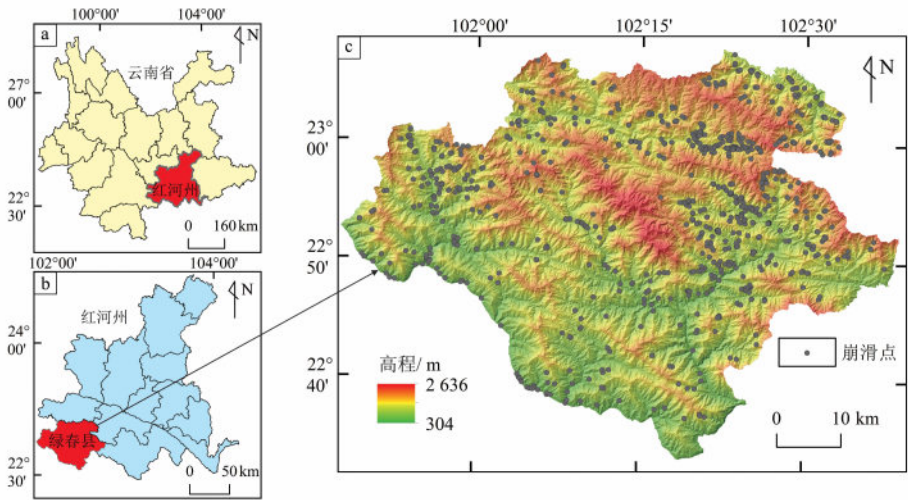
滑坡地质灾害开展风险评价,为绿春县地质灾害防治规划提供理论支撑。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

绿春县隶属于云南省红河州,地理坐标为

101°47′~102°39′ E, 22°33′~23°08′ N, 县境东西最大横距 85 km, 南北最大纵距 60 km。绿春县东部与元阳县、金平县接壤,北部与红河县相接,西南部与江城县隔李仙江相望,西北部与墨江县相连,东南部与越南社会主义共和国相交,为典型的山区边境县(图 1)。



a. 云南省; b. 红河州; c. 绿春地质灾害点。

图 1 绿春县地理位置和地质灾害分布图

Fig. 1 Geographical location and distribution of geological hazards in Lüchun County

绿春县坐落于云南高原的南部边缘,境内山地大多为条带状,受构造的影响,区内河流以及山脉大都呈北西、北西西向延伸。区内最高海拔 2 637 m, 最低海拔 320 m。研究区内基本地貌单元主要有 4 种: 分别是溶蚀地貌、侵蚀堆积地貌、构造剥蚀地貌及构造侵蚀地貌。绿春县县域内出露地层不齐全, 以下志留统水管组 ( $S_1s$ ) 和上三叠统歪古日组 ( $T_3w$ ) 分布最广, 其次是下泥盆统大中寨组 ( $D_1d$ )、中侏罗统花开左组 ( $J_2h$ )、上侏罗统坝注路组 ( $J_3b$ ) 及各期侵入岩浆岩。县域内的新构造运动表现极为活跃, 其主要特征是大规模的间歇性上升运动。在地貌上除典型的“V”型深切谷、悬崖绝壁、瀑布、活动冲沟等幼年期地貌景观外, 尚有沿分水岭和主要河流两侧发育的古夷平面和台地, 此外沿现代河谷两侧还经常发育Ⅱ、Ⅲ级阶地和洪积扇。绿春县县域主要构造为北西、北西西向构造, 但构造从总体看有向北西变窄、向南东变宽的趋势。绿春县县域内地层以碎屑岩为主,

在区内广泛分布, 多为软、硬岩组, 且多互层分布, 区内风化作用强烈, 浅表层岩石多全-强风化, 少见中风化岩层出露, 该区域工程地质性质较差。陡坡垦殖、切坡建房、道路建设、开矿采石等是目前主要的人类工程活动。绿春县县域内不良地质作用主要有 3 种: 岩体风化、溶蚀作用以及沟谷侵蚀。根据调查结果统计, 绿春县共有崩塌、滑坡地质灾害点 841 处, 具有点多面广、整体分布不均、局部集中等特点, 地质灾害规模以小型为主。

1.2 研究区数据来源

高程、坡度、坡向以及曲率等数据通过阿拉斯加卫星设备 (ASF) 下载的 12.5 m DEM 提取<sup>[12]</sup>; 岩性、断层数据来源于全国地质资料馆 1:20 万地质图<sup>[13]</sup>; 土地利用类型数据来源于欧洲航天局 (ESA)<sup>[14]</sup>10 m 分辨率土地利用数据; 降雨量数据来源于云南省绿春县气象局; 崩塌、滑坡灾害点数据来源于云南省地质工程勘察有限公司实测数据。

## 2 地质灾害易发性评价

### 2.1 评价单元

易发性评价中应用较多的评价单元一般有地貌单元、栅格单元与行政单元等<sup>[15]</sup>。地貌单元不论是人为划分还是GIS软件生成,都易对后续处理结果产生较大误差影响。行政单元划分将整体地质单元切割为若干部分,未能考虑各评价因子在不同单元内地质环境的差异性。栅格单元通常为尺寸相同的方形网格,相比于其他评价单元,栅格单元评价结果的可视化效果更好。同时栅格单元在处理数据时具备显著的优势,计算速度快,处理图层数据方便、快捷。因此,本文选用栅格单元作为评价单元。研究区使用的DEM数据比例尺为1:5万,栅格单元的大小为25 m×25 m。

### 2.2 评价因子选取与分级

根据对研究区崩塌、滑坡地质灾害形成机制及孕灾环境因素的分析,综合考虑地质构造、水文、地形地貌、人类工程活动及地层岩性等5个方面<sup>[16]</sup>,选取坡度、坡向、高程、曲率、地貌类型、工程地质岩组、河流距离、断层距离、土地利用类型9个因子,在ArcGIS平台中完成因子分级处理(图2)。

不同的地形地貌(高程、坡度、坡向、曲率、地貌类型)导致不同类型和不同规模的地质灾害发生;地质构造、地层岩性(断层距离、工程地质岩组)是控制斜坡稳定的内在因素;水文因素(河流距离)往往改变斜坡的应力形态、恶化岩体的力学强度;不合理的人类工程活动(土地利用类型)可能诱发或加剧地质灾害。

### 2.3 评价方法建立

#### (1) 信息量模型

信息量(information value, IV)模型是信息论和统计模型相互融合与演变过程中产生的一种评价方法<sup>[17]</sup>,现已被众多专家学者应用于地质灾害研究。信息量模型是通过计算各评价指标信息量值,并以此作为地质灾害易发程度的定量衡量指标。具体来说,评价指标的信息量值越大,意味着该区域内地质灾害的发育可能性越高<sup>[18]</sup>。各个评价指标的信息量计算公式如下:

$$I = I(X_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中: $I(X_i, H)$ 为单个评价因子 $X_i$ 对地质灾害 $H$ 的信息量值; $N$ 代表研究区内地质灾害的总数; $N_i$ 是二级因子 $X_i$ 内的灾害数; $S$ 表示评价单元栅格的总数; $S_i$ 代表二级因子 $X_i$ 所占的单元栅格数。

#### (2) 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种解决评价问题的多层次权重解析方法,也是一种可以与定量分析结合的系统分析和评价方法<sup>[19]</sup>。AHP的基本思想为两两因子的相互比较<sup>[20]</sup>,通过两两评价因子的重要程度对比并赋值,将各因素进行量化构造判断矩阵,随后进行一致性检验,若检验结果中 $CR < 0.1$ ,说明检验通过。计算公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

式中: $CR$ 为一致性比率; $CI$ 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征值; $n$ 为矩阵阶数; $RI$ 为随机一致性指标。

#### (3) 加权信息量模型

信息量模型只计算出各评价指标的信息量值,没有对评价指标进行权重分配及关联分析,而层次分析法通过两两对比的形式对评价指标分配权重。为提高评价结果的准确性,将层次分析法与信息量模型结合起来构建加权信息量模型,各评价因子的信息量值与权重相乘即为加权信息量值<sup>[21]</sup>。

$$I_n = \sum_{i=1}^n \omega_i I_i \quad (4)$$

式中: $I_n$ 为一级评价指标的总信息量值; $I_i$ 为各二级评价指标的信息量值; $\omega_i$ 为各评价指标的权重。

基于信息量值及权重进行计算,得出 $CR = 0.064 < 0.1$ ,表明一致性检验通过,可将所得数据应用于地理信息系统后续的栅格单元计算中(表1)。

### 2.4 易发性评价结果

计算出各评价因子的加权信息量值,由数据叠





表 1 加权信息量  
Table 1 Weighted information

评价因子	分级	$S_i/S$	$N_i/N$	信息量	权重
高程/m	300 ~ 1 000	0.215 8	0.150 0	-0.363 7	0.103 9
	1 000 ~ 1 500	0.413 2	0.550 0	0.286 0	
	1 500 ~ 2 000	0.316 5	0.296 4	-0.065 6	
	2 000 ~ 2 700	0.054 5	0.003 6	-2.725 4	
地貌类型	侵蚀堆积河谷	0.051 7	0.058 3	0.120 0	0.041 7
	构造侵蚀高中山	0.210 9	0.135 7	-0.440 9	
	构造侵蚀低山	0.205 5	0.231 0	0.116 8	
	溶蚀、侵蚀中山	0.091 3	0.036 9	-0.905 6	
	构造侵蚀低中山	0.274 4	0.301 2	0.093 1	
	构造剥蚀高中山	0.078 8	0.064 3	-0.204 1	
	构造剥蚀低中山	0.087 3	0.172 6	0.681 4	
坡度/ (°)	0 ~ 15	0.086 3	0.100 2	0.149 6	0.231 6
	15 ~ 25	0.238 0	0.337 7	0.349 8	
	25 ~ 35	0.425 9	0.408 1	-0.042 6	
	35 ~ 45	0.235 8	0.151 6	-0.441 9	
	45 ~ 90	0.014 0	0.002 4	-1.770 7	
断层距离/m	0 ~ 50	0.034 1	0.047 6	0.333 5	0.143 0
	50 ~ 100	0.033 3	0.050 0	0.405 8	
	100 ~ 300	0.124 2	0.202 4	0.488 3	
	300 ~ 500	0.108 0	0.123 8	0.136 9	
	500 ~ 1 000	0.200 1	0.225 0	0.117 1	
	1 000 ~ 3 000	0.324 5	0.223 8	-0.371 6	
	>3 000	0.175 7	0.127 4	-0.321 7	
工程地质岩组	薄-厚层较硬砂岩岩组	0.310 8	0.214 3	-0.371 7	0.152 0
	薄-中厚层泥化夹层较软砂岩岩组	0.366 6	0.269 0	-0.309 4	
	薄-中厚层软硬相间砂页岩组	0.269 6	0.396 4	0.385 6	
	较厚较硬变质岩岩组	0.012 5	0.066 7	1.674 7	
	松散岩类砂类土岩组	0.002 5	0.001 2	-0.722 7	
	碎裂状较软斑岩强风化岩组	0.010 7	0.021 4	0.691 2	
	碎裂状较软花岗岩强风化岩组	0.011 3	0.011 9	0.049 9	
	碎裂状较软辉绿岩强风化岩组	0.001 2	0.003 6	1.051 6	
	碎裂状较软正长岩强风化岩组	0.000 1	0.000 0	0.000 0	
	中厚-厚层硬灰岩岩组	0.014 7	0.015 5	0.051 7	
河流距离/m	0 ~ 50	0.159 1	0.047 6	-1.206 5	0.108 2
	50 ~ 100	0.150 6	0.121 4	-0.215 3	
	100 ~ 300	0.454 5	0.548 8	0.188 6	
	300 ~ 500	0.184 8	0.228 6	0.212 7	
	500 ~ 1 000	0.050 3	0.053 6	0.062 7	
	>1 000	0.000 7	0.000 0	0.000 0	

续表 1  
Continued table 1

评价因子	分级	$S_i/S$	$N_i/N$	信息量	权重
坡向	平面	0.000 3	0.000 0	0.000 0	0.045 4
	北	0.067 7	0.065 6	-0.030 6	
	东北	0.117 5	0.112 2	-0.046 1	
	东	0.112 6	0.107 4	-0.047 6	
	东南	0.117 2	0.121 7	0.037 9	
	南	0.152 0	0.179 0	0.163 5	
	西南	0.136 5	0.151 6	0.104 6	
	西	0.122 3	0.119 3	-0.024 9	
	西北	0.108 8	0.095 5	-0.131 0	
	北	0.065 0	0.047 7	-0.309 3	
曲率	凹形坡	0.470 0	0.266 7	-0.566 8	0.065 2
	平面坡	0.004 0	0.001 2	-1.212 9	
	凸性坡	0.526 0	0.732 1	0.330 8	
土地利用	林地	0.851 3	0.625 4	-0.308 3	0.109 1
	灌木	0.000 1	0.000 0	0.000 0	
	草地	0.105 4	0.117 7	0.110 2	
	耕地	0.024 2	0.029 7	0.207 1	
	建筑用地	0.002 7	0.079 7	3.382 0	
	裸地/稀疏植被区	0.014 3	0.147 4	2.335 7	
	开阔水域	0.002 0	0.000 0	0.000 0	

加分析得到易发性指数，利用自然间断点法对易发性指数进行分类，分为低、中、高、极高易发 4 个区划等级，得到绿春县地质灾害易发性评价图（图 3）。

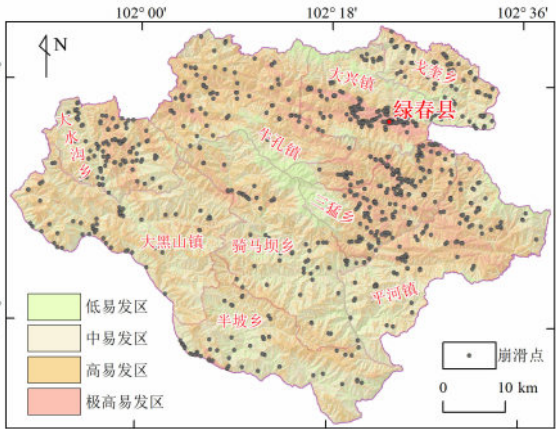


图 3 绿春县易发性评价图  
Fig. 3 Susceptibility evaluation of Lüchun County

绿春县易发性评价结果（表 2）表明，研究区内的极高易发区面积为 374.02 km<sup>2</sup>，占总面积的

12.10%；高易发区面积为 1 228.90 km<sup>2</sup>，占总面积的 39.76%；中易发区面积为 1 103.21 km<sup>2</sup>，占总面积的 35.69%；低易发区面积为 384.90 km<sup>2</sup>，占总面积的 12.45%。极高易发区主要分布在研究区的东北部，三猛乡、大兴镇、平河镇等地区分布最广，高、中易发区在各乡镇中都有分布，低易发区主要分布在高海拔区域。计算各易发等级分区面积，并统计分区内的灾点数量，得出灾点密度。由表 2 可以看出，易发性等级越高，区内的灾点数目越多，灾点密度越大，这表明易发性评价结果与研究区实际情况相匹配，能够应用于绿春县崩滑地质灾害易发性评价研究。

表 2 易发性评价结果统计 Table 2 Susceptibility evaluation statistics of Lüchun County				
易发性等级	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	灾点占比/%	灾害密度/(处·km <sup>-2</sup> )
低	384.90	12.45	2.39	0.052 0
中	1 103.21	35.69	15.85	0.120 6
高	1 228.90	39.76	32.06	0.218 9
极高	374.02	12.10	49.70	1.115 0



本文以受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线进一步检验加权信息量模型易发性评价结果的准确性 (图 4)。ROC 曲线的线下面积 (area under curve, AUC) 能反映评价结果的准确性。AUC 值在 0.50 ~ 1.00 之间, AUC 值越大, 模型评价结果越准确<sup>[22]</sup>。

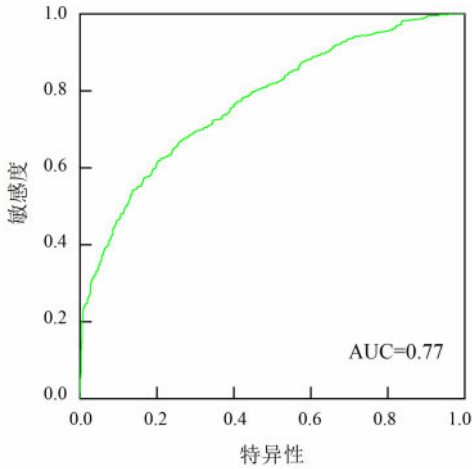


图 4 ROC 曲线图  
Fig. 4 ROC curve

由图 4 可知, 基于加权信息量模型得到的 AUC 值为 0.77, 在 0.70 ~ 0.80 范围内, 本次易发性评价结果较为合理。

3 地质灾害危险性评价

地质灾害危险性评价是在易发性评价的基础上, 进一步分析并评估引发条件 (地震、降雨、人类工程活动) 诱发地质灾害的危险程度<sup>[23]</sup>。绿春县的降雨时间集中且降雨量较大, 降雨是引发区内崩塌、滑坡地质灾害产生的重要因素。因此, 在易发性评价基础上, 选取月均降雨量作为研究区地质灾害发生的诱发因素, 构建地质灾害危险性评价体系。收集绿春县 2009—2018 年月均降雨数据, 通过数据处理和叠加分析, 在地质灾害易发性评价基础上叠加月均降雨量进行危险性评价, 根据得到的地质灾害危险性指数进行分类, 将研究区划分为极高、高、中、低危险 4 个区划等级, 得到绿春县地质灾害危险性评价图 (图 5)。

绿春县危险性评价结果 (表 3) 表明, 区内高危险区和中危险区的面积占比最高, 分别是

1 174.20 km<sup>2</sup>, 1 110.89 km<sup>2</sup>, 它们占研究区总面积的 37.99%, 35.94%; 极高危险区的面积为 416.78 km<sup>2</sup>, 占总面积的 13.48%; 低危险区的面积为 389.16 km<sup>2</sup>, 仅占总面积的 12.59%。极高、高危险区主要分布在绿春县城及周围乡镇周边, 这部分区域植被覆盖率低, 人类活动强烈, 地质灾害发生时造成危害较大, 中危险区在各乡镇均有分布, 低危险区主要分布在高海拔区域, 人类活动少, 建筑密度低。

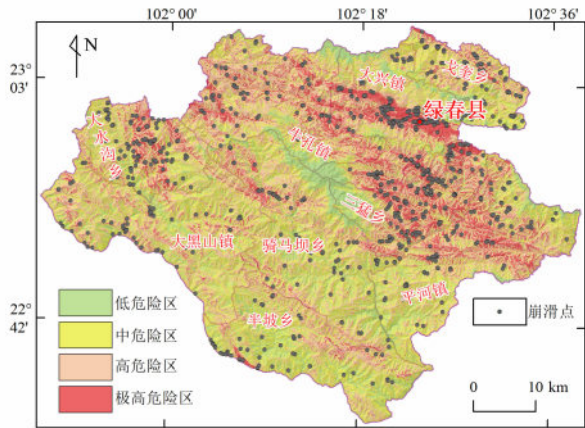


图 5 绿春县危险性评价图  
Fig. 5 Hazard evaluation of Lüchun County

表 3 绿春县危险性评价结果统计  
Table 3 Hazard evaluation statistics of Lüchun County

危险性等级	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	灾点占比/%	灾害密度/(处·km <sup>-2</sup> )
低	389.16	12.59	2.62	0.056 5
中	1 110.89	35.94	15.97	0.120 6
高	1 174.20	37.99	29.92	0.213 8
极高	416.78	13.48	51.49	1.036 5

4 地质灾害易损性评价

易损性评价是一种针对特定危险范围内承灾体可能遭受的地质灾害破坏程度所进行的评估, 它旨在衡量在地质灾害发生时承灾体的受损情况<sup>[24]</sup>。通过对绿春县地质灾害的承载体研究分析, 本次研究选取人口密度、威胁人口数量、土地利用等 3 个评价指标, 构成地质灾害易损性评价指标体系。根据各评价指标的易损性指数进行赋值, 然后进行加权叠加得到地质灾害易损性指数, 利用自然间断点



法分为低易损、中易损、高易损、极高易损 4 个易损区划等级，做出绿春县地质灾害易损性评价图（图 6）。

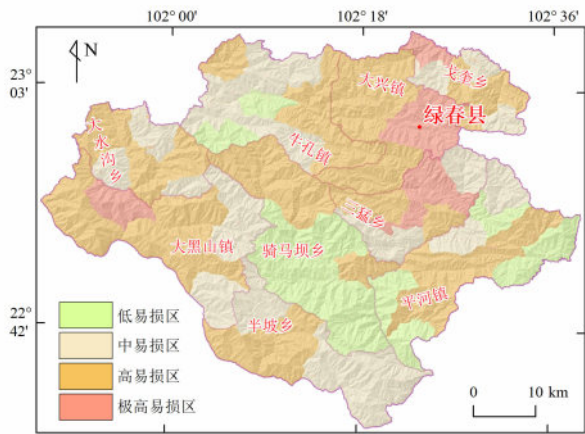


图 6 绿春县易损性评价图  
Fig. 6 Vulnerability evaluation of Lüchun County

绿春县易损性等级面积占比（图 7）表明，低易损区面积占研究区总面积的 16.40%，主要分布在骑马坝乡；中易损区面积占研究区总面积的 28.21%；极高、高易损区面积占研究区总面积的 55.39%，主要分布在城镇人类活动频繁、人口相对密集的区域，该区域崩塌地质灾害发生时，可能会产生更大的损失。

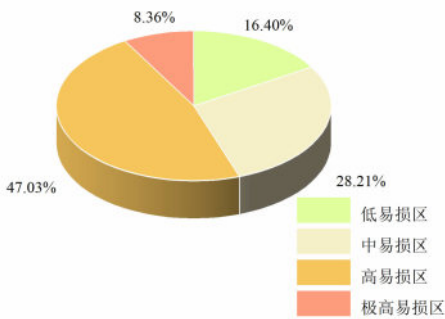


图 7 绿春县易损性等级面积占比  
Fig. 7 Area proportion of vulnerability levels in Lüchun County

5 地质灾害风险评价

地质灾害风险是指地质灾害造成不良后果的可能性，涵盖了地质灾害发生所具有的破坏潜力和后果 2 个方面。地质灾害在具备其自然属性的同时也具备其社会属性，其危险性可以用来反映自然属

性，而其易损性则用来反映社会属性。本文采用联合国提出的自然灾害风险公式进行研究区崩塌地质灾害风险评价，公式如下：

$$F = H \times V \tag{5}$$

式中： $F$  为地质灾害风险指数； $H$  为地质灾害危险性指数； $V$  则为地质灾害易损性指数。

利用 ArcGIS 栅格计算器功能，对危险性指数与易损性指数进行乘积运算，得到地质灾害风险指数。利用自然间断点法对风险指数进行风险等级划分，绘制绿春县崩塌、滑坡地质灾害风险评价图（图 8）。

绿春县风险等级面积占比（图 9）表明，研究区内的极高风险区面积为 88.55 km<sup>2</sup>，占县域面积的 2.87%；高风险区面积为 1 183.35 km<sup>2</sup>，占县域面积的 38.28%；中风险区面积为 1 422.01 km<sup>2</sup>，

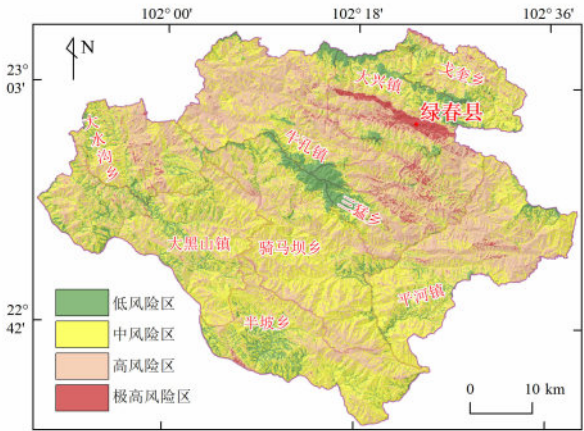


图 8 绿春县风险评价图  
Fig. 8 Risk evaluation of Lüchun County

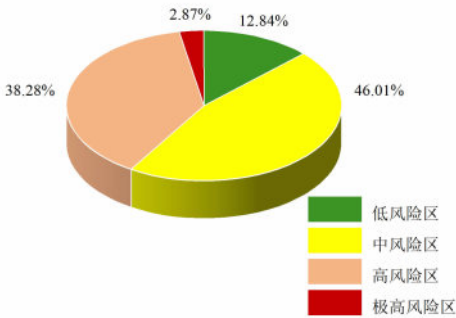


图 9 绿春县风险等级面积占比  
Fig. 9 Area proportion of risk levels in Lüchun County

占县域面积的 46.01%；低风险区面积为 396.99 km<sup>2</sup>，占县域面积的 12.84%。极高、高风险区主要分布在绿春县城周围以及大兴镇、牛孔镇、三猛乡、平河镇、大水沟乡中部一带；中风险区主要分布在大黑山镇北部、大水沟乡西部、骑马坝乡中部和南部、戈奎乡中部以及平河镇西南部；低风险区主要分布在半坡乡中部、骑马坝乡北部、大兴镇北部及戈奎乡的南部。

6 结论

(1) 选取坡度、坡向、高程、曲率、地貌类型、工程地质岩组、河流距离、断层距离、土地利用类型等 9 个评价因子，构建地质灾害易发性评价体系，根据自然间断点分级法将绿春县划分为低易发区 (12.45%)、中易发区 (35.69%)、高易发区 (39.76%)、极高易发区 (12.10%)。采用 ROC 曲线进行模型精度检验，AUC 值为 77.00%，评价结果较为合理。

(2) 以月均降雨量作为区内地质灾害发生的诱发因素，结合地质灾害易发性评价进行危险性评价，将绿春县划分为低危险区 (12.59%)、中危险区 (35.94%)、高危险区 (37.99%)、极高危险区 (13.48%)。

(3) 选取人口密度、威胁人口数量、土地利用 3 个地质灾害易损性评价指标，开展地质灾害易损性评价及分区研究。结果显示，极高以及高易损区主要分布在城镇人类活动频繁、人口相对密集的区域。

(4) 极高、高、中、低风险区分别占研究区总面积的 2.87%、38.28%、46.01%、12.84%，极高、高风险区主要分布在绿春县城周边。基于绿春县风险评价结果，建议对极高、高风险区加强监测预警，严格管控人类工程活动，中、低风险区在工程建设中做好边坡支护防护措施。

参考文献：

[1] 刘传正，陈春利. 中国地质灾害成因分析 [J]. 地质论评, 2020, 66 (5): 1334–1348.  
LIU C Z, CHEN C L. Research on the origins of geological disasters in China [J]. Geological Review, 2020, 66 (5): 1334–1348.  
[2] 齐信，唐川，陈州丰，等. 地质灾害风险评价研究

[J]. 自然灾害学报, 2012, 21 (5): 33–40.  
QI X, TANG C, CHEN Z F, et al. Research of geo-hazards risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21 (5): 33–40.  
[3] 安雪莲，密长林，孙德亮，等. 基于不同评价单元的三峡库区滑坡易发性对比：以重庆市云阳县为例 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2024, 54 (5): 1629–1644.  
AN X L, MI C L, SUN D L, et al. Comparison of landslide susceptibility in Three Gorges Reservoir area based on different evaluation units: take Yunyang County in Chongqing as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (5): 1629–1644.  
[4] SALEEM J, AHMAD S S, BUTT A. Hazard risk assessment of landslide-prone sub-Himalayan region by employing geospatial modeling approach [J]. Natural Hazards, 2020, 102 (3): 1497–1514.  
[5] 张俊，殷坤龙，王佳佳，等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (2): 284–296.  
ZHANG J, YIN K L, WANG J J, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou district of Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 284–296.  
[6] 孙才，铁永波，宁志杰，等. 基于频率比-支持向量机耦合模型的四川省喜德县滑坡易发性评价 [J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44 (3): 547–559.  
SUN C, TIE Y B, NING Z J, et al. Landslide susceptibility mapping in Xide County, Sichuan Province based on frequency ratio-support vector machine coupling model [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44 (3): 547–559.  
[7] 李文彦，王喜乐. 频率比与信息量模型在黄土沟壑区滑坡易发性评价中的应用与比较 [J]. 自然灾害学报, 2020, 29 (4): 213–220.  
LI W Y, WANG X L. Application and comparison of frequency ratio and information value model for evaluating landslide susceptibility of Loess Gully region [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29 (4): 213–220.  
[8] 郑迎凯，陈建国，王成彬，等. 确定性系数与随机森林模型在云南芒市滑坡易发性评价中的应用 [J]. 地质科技通报, 2020, 39 (6): 131–144.  
ZHENG Y K, CHEN J G, WANG C B, et al. Application of certainty factor and random forests model in landslide susceptibility evaluation in Mangshi City, Yunnan Province [J]. Bulletin of Geological Science and Tech-

- nology, 2020, 39 (6): 131–144.
- [9] NOVELLINO A, CESARANO M, CAPPELLETTI P, et al. Slow-moving landslide risk assessment combining machine learning and InSAR techniques [J]. Catena, 2021, 203: 105317.
- [10] 丁明涛, 庙成. 基于 GIS 的芦山地震灾区滑坡灾害风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23 (4): 81–90.  
DING M T, MIAO C. GIS-based risk assessment of landslide hazards in Lushan earthquake-stricken areas [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 81–90.
- [11] 焦伟之, 张明, 谢鑫鹏, 等. 基于 GIS 与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价: 以大新镇为例 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29 (4): 119–128.  
JIAO W Z, ZHANG M, XIE X P, et al. Susceptibility evaluation of urban geological disaster based on GIS and weighted information value model: a case study of Daxin Town [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29 (4): 119–128.
- [12] 阿拉斯加卫星设备. ALOS PALSAR 数据集 [DB/OL]. [2023–08–06]. <https://search.asf.alaska.edu/>.  
Alaska Satellite Facility. ALOS PALSAR data set [DB/OL]. [2023–08–06]. <https://search.asf.alaska.edu/>.
- [13] 全国地质资料馆. 地质图数据集 [DB/OL]. [2023–08–27]. <http://www.ngac.org.cn/>.  
National Geological Data Museum. Geological Map data set [DB/OL]. [2023–08–27]. <http://www.ngac.org.cn/>.
- [14] 欧洲航天局. ESA WorldCover 10 m 2020 数据集 [DB/OL]. [2023–11–26]. <https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/>.  
European Space Agency. ESA WorldCover 10 m 2020 data set [DB/OL]. [2023–11–26]. <https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/>.
- [15] 罗荣, 张世涛, 牟东川, 等. 基于 GIS 的云南省永善县滑坡地质灾害风险性评价 [J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35 (1): 7–13.  
LUO R, ZHANG S T, MOU D C, et al. Risk assessment of landslide geological hazards in Yongshan County, Yunnan Province based on GIS [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35 (1): 7–13.
- [16] 严明, 谢婉丽, 何亚南, 等. 基于极值降雨假设法的城镇地质灾害风险性评价耦合模型研究: 以安康市岚皋县官元镇为例 [J]. 灾害学, 2023, 38 (4): 219–227.  
YAN M, XIE W L, HE Y N, et al. Research on the coupling model of urban geological hazard risk assess-
- ment based on the assumption of extreme rainfall: a case study of Guanyuan Town, Langao County, Ankang City [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38 (4): 219–227.
- [17] 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 L H, LI L F, WU F, 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.
- [18] 王鑫, 王鲜, 郝业, 等. 基于加权信息量法与综合指数法的西安市蒋村街道地质灾害易发性评价对比 [J]. 世界地质, 2023, 42 (2): 399–408.  
WANG X, WANG X, HAO Y, et al. Comparison between weighted information and comprehensive index methods on geological disaster susceptibility evaluation at Jiangcun street, Xi'an City [J]. World Geology, 2023, 42 (2): 399–408.
- [19] 刘祥龙, 张文君, 陈朝亮, 等. 内江市景观格局对地质灾害易发性的影响分析 [J]. 测绘科学, 2021, 46 (5): 118–125.  
LIU X L, ZHANG W J, CHEN C L, et al. Analysis of the influence of landscape pattern on geological disaster susceptibility [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46 (5): 118–125.
- [20] 李燕婷, 朱海莉, 陈少华. 层次分析法的黄河上游滑坡易发性评价 [J]. 测绘科学, 2016, 41 (8): 67–70, 75.  
LI Y T, ZHU H L, CHEN S H, et al. Landslide hazard assessment in the upper reaches of Yellow River based on AHP method [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41 (8): 67–70, 75.
- [21] 王成楠, 宋勇, 赵影, 等. 基于加权信息量法和逻辑回归信息量法的定南县地质灾害易发性评价 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (6): 569–580.  
WANG C N, SONG Y, ZHAO Y, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility in Dingnan County based on weighted information method and logistic regression information method [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2022, 45 (6): 569–580.
- [22] 王雪冬, 张超彪, 王翠, 等. 基于 Logistic 回归与随机森林的和龙市地质灾害易发性评价 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2022, 52 (6): 1957–1970.

WANG X D, ZHANG C B, WANG C, et al. Geological disaster susceptibility in Helong City based on logistic regression and random forest [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (6): 1957-1970.

- [23] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论 [J]. 地质通报, 2009, 28 (8): 995-1005.

WU S R, SHI J S, ZHANG C S, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (8): 995-1005.

- [24] ZHANG S, LI C, ZHANG L M, et al. Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using bayesian network [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105436.

