

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.231

引用格式: 李强, 蒙明辉, 覃亮, 等. 基于斜坡单元与 AHP - 证据权耦合模型的区域地质灾害危险性评价[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 97 - 107. (Li Q, Meng M H, Qin L, et al. Regional geological hazard risk assessment based on slope unit and AHP - evidence weight coupling model[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 97 - 107.)

# 基于斜坡单元与 AHP - 证据权耦合模型的区域地质灾害危险性评价

李强<sup>1,2,3</sup>, 蒙明辉<sup>1,2,3</sup>, 覃亮<sup>1,2,3\*</sup>, 杨沛璋<sup>2,3</sup>, 廖茂权<sup>2,3</sup>, 蒋清明<sup>2,3</sup>

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610081; 3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 四川 成都 610081)

**摘要:** 危险性评价是我国西南山区防灾减灾的重要手段, 目前大部分评价体系采用的评价模型层次浅显且指标单一, 针对该问题, 提出层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) - 证据权耦合模型, 对马尔康地质灾害危险性展开评价研究。结合 ArcGIS 水文分析和人机交互实现了斜坡单元划分的优化, 将研究区划分为 5 695 个斜坡单元, 选取了年均降雨量、地层岩性、坡度、坡向、距水系距离、距断层距离、距道路距离、斜坡高差 8 个指标因子, 采用 AHP - 证据权耦合模型分别求解指标因子权重值及下属区间对地质灾害事件的贡献度, 得到研究区地质灾害危险性分区图。结果表明, 高危险区和极高危险区分别占研究区总面积的 14.96% 和 8.46%, 主要集中在水系两侧的居民聚集区, 受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 曲线下面积 (area under the curve of the receiver operating characteristic, AUC) 为 0.78, 模型整体预测精度较好。研究成果可为区域地质灾害的危险性评价提供参考, 对于西南山区地质灾害排查的前期工作开展具有指导意义。

**关键词:** 地质灾害; 危险性评价; 层次分析法; 证据权模型; 斜坡单元

**中图分类号:** P681.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095 - 8706(2025)03 - 0097 - 11

## 0 引言

中国西南山区主要位于中国地势的第二阶梯, 紧邻第一阶梯青藏高原, 该区域频繁的地壳活动造就了复杂的地质构造与地层岩组特征, 同时构造应力的集中使得西南山区构造发育、地震频发<sup>[1]</sup>, 该区地质灾害具有分布范围广、成灾复杂、隐蔽突发等特点<sup>[2]</sup>, 使传统地质灾害现场的调查耗费大量人力物力, 大范围推广的可行性较低, 因此开展区域尺度上的地质灾害危险评价研究对于降低经济损失和人员伤亡有着重要意义。20 世纪 80 年代以来, 地质灾害危险性评价方法经历了从定性到定量整合的发展过

程。早期研究以 Varnes<sup>[3]</sup> 提出的“潜在地质灾害发生可能性”概念为基础, 我国学者罗元华等<sup>[4]</sup> 在 90 年代进一步强调自然环境条件和灾害活跃度的核心地位。随着方法学演进, 层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)<sup>[5]</sup> 率先实现了定性定量结合, 但其主观性局限催生了信息量法、证据权模型等数理统计方法, 以及随机森林等机器学习模型。然而在西南高山峡谷等地质条件复杂、灾害类型丰富区域, 这些模型暴露出样本依赖性强、权重解释不足等缺陷<sup>[6]</sup>。

因此, 本文选用适用性较高且客观评价的证据权模型, 并在此基础上, 增加半定性半定量的 AHP 层次分析, 通过专家打分对比引入专家对研究区域地质灾害发育的客观认识, 弥补了证据权模型对指

收稿日期: 2024 - 06 - 06; 修订日期: 2025 - 04 - 26。

**基金项目:** 四川省地质调查研究院“川西地质环境脆弱区大型泥石流生态韧性防控关键技术研究 (编号: SCIGS - CZDZX - 2025005)”、四川省科技厅“四川省三州地区地质灾害防灾减灾科普培训 (编号: 2023JDKP0010)”、科技部国家重点研发计划“地质灾害防治工程生态耐久关键技术装备研发 (编号: 2023YFC3007105 - 06)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 李强 (1980 - ), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。Email: 53507997@qq.com。

**通信作者简介:** 覃亮 (1988 - ), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价方面的研究工作。Email: 569201324@qq.com。

标间权重考虑的不足,使模型评价结果更贴近事实。除了上述评价方法外,评价单元也是影响评价结果的重要因素之一,赵晓燕等<sup>[7]</sup>认为地质灾害危险性评价中较为核心的两个部分是评价尺度的选取和评价方法的确定,现有研究中常用的栅格单元,其离散化某些情况下往往不能体现地质灾害发育特征,因此本文基于 ArcGIS 水文分析模块和人机交互实现研究区域斜坡单元划分的优化,确保评价单元在地形地貌、水文地质等方面的完整性,结合 AHP - 证据权耦合模型建立地质灾害危险性评价体系,实现马尔康研究区斜坡单元尺度下的地质灾害危险性评价。研究旨在为西南山区及类似区域地质灾害危险性评价工作提供参考。

## 1 研究区概况

马尔康市为阿坝州首府,位于四川省盆地西北

部、阿坝藏族羌族自治州中部,属青藏高原向东的延伸部分。马尔康市面积为 6 632.7 km<sup>2</sup>,境内河谷深切,主干河流多峡谷,地形坡度陡,多为 10° ~ 45°<sup>[8]</sup>。研究区内主要为构造侵蚀地貌、山麓斜坡堆积地貌、河流侵蚀堆积地貌。气候特征体现为雨季明显,四季不分明,日照充沛,温差较大,全年平均气温为 8 ~ 9 °C,年降雨量约 753 mm,总体雨量较为贫乏,但降雨量时空分布不均匀,局地暴雨现象时有发生,境内泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害发育。从地质构造来看,马尔康市属于四川西部地槽区,位居 NW 向鲜水河大断裂与 NE 向龙门山华夏系构造带之间的金汤弧形构造带之北侧,发育多条褶皱,构造复合现象频繁出现,地质构造十分复杂(图 1)。研究区受松潘、龙门山地震带影响,低强度地震活动频繁,但灾害性地震相对较少,根据收集数据以及现场调查情况确定了本文研究区域范围。

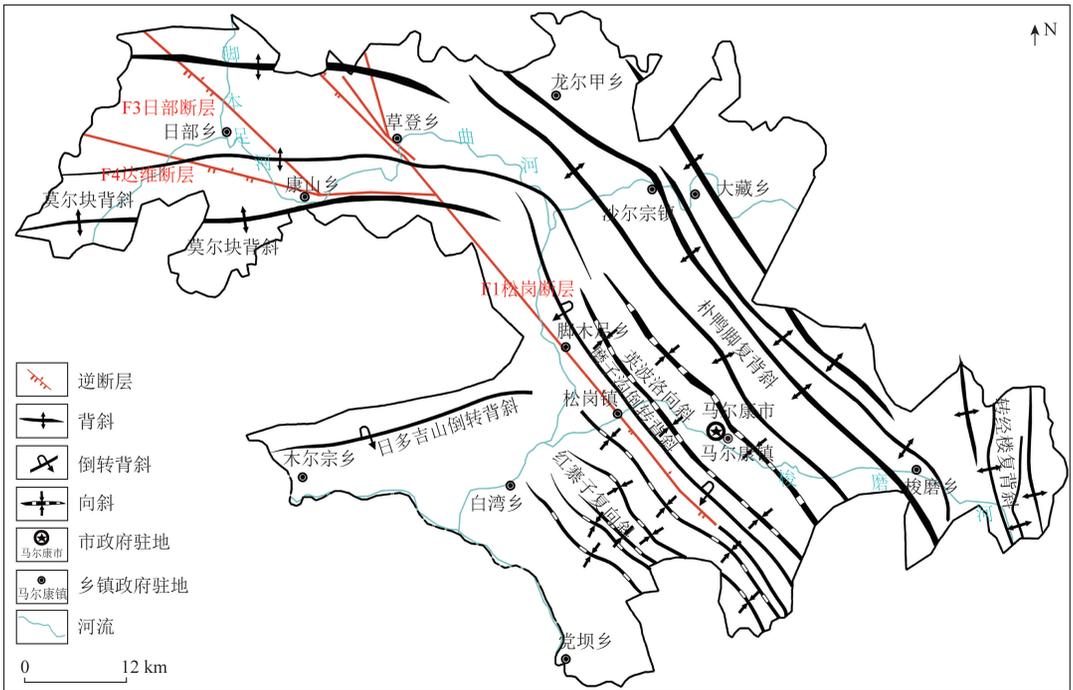


图 1 研究区构造简图  
Fig.1 Structural sketch of the study area

## 2 数据来源及处理

### 2.1 数据源

为支撑后续地质灾害危险性评价研究工作,本文收集整理了相关数据,主要包括既有地质灾害点数据、数字高程数据(digital elevation model, DEM)、

光学遥感影像、合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)形变监测成果、断层分布、地层岩性、年均降雨量(表 1),其中光学遥感影像数据和 InSAR 形变监测结果主要用于地质灾害的识别解译以及复核,为之后的地质灾害危险性评价提供样本数据,而其余数据则是作为指标图层用于地质灾害危险性评价的分析。

表 1 数据来源信息

Tab.1 Data source information

数据类型	数据源	时间	分辨率/m
既有地质灾害	四川省地质灾害信息系统	截至 2023 年 2 月	-
数字高程模型	SRTM DEM	-	30
年均降雨量	中科院山地所	1991—2020 年	30
地层岩性	四川省地质调查院	2008 年	1:25 万
光学遥感影像	天地图	2023 年	1.2
InSAR 形变监测	自然资源部门	2023 年	-

注:“-”代表该项内容不存在或未知。

## 2.2 地质灾害解译

研究区内既有地质灾害共有 311 处,包括滑坡 137 处、崩塌 25 处、泥石流 149 处。本文通过收集整理的光学遥感影像和 InSAR 形变监测结果,对马尔康市研究区内地质灾害展开综合解译和研判,确定地质灾害 72 处,包括滑坡 24 处、崩塌 18 处、泥石流 30 处。而后开展了野外实地调查踏勘,根据现场调查资料对解译结果中漏识和误识的灾害进行复核,最终确定地质灾害点总数 365 处,包括滑坡灾害 158 处、崩塌灾害 43 处、泥石流灾害 164 处,其分布情况见图 2。

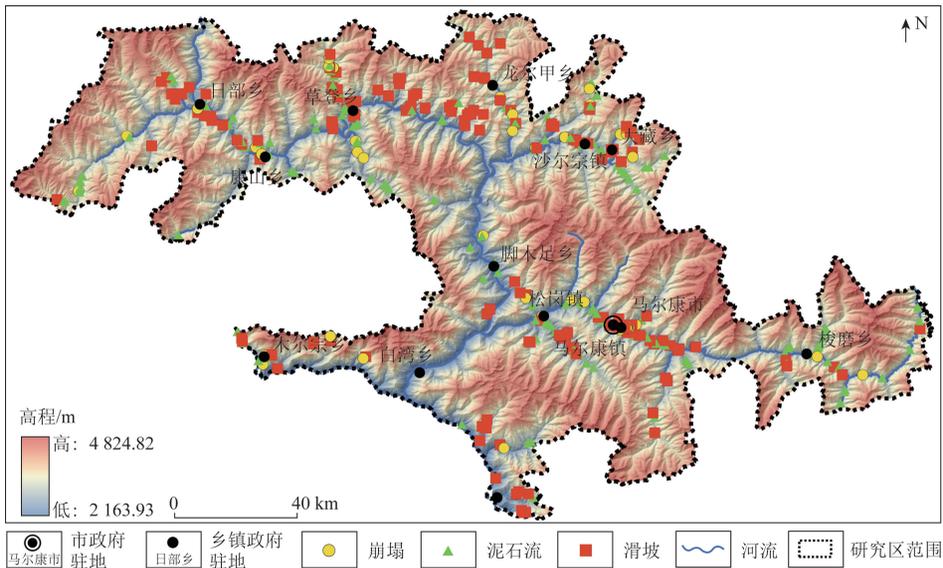


图 2 研究区地质灾害分布

Fig.2 Distribution of geological hazards in the study area

## 2.3 地质灾害分布特征及成因分析

对地质灾害分布情况进行统计分析(表 2),可见马尔康市地质灾害主要集中在马尔康镇、草登乡、龙尔甲乡、松岗镇,其中马尔康镇 62 处,草登乡 61 处,马尔康镇和草登乡地质灾害数量分别占到了总量的 16.99% 和 16.71%,点密度达到了  $9.20 \times 10^{-2}$  处/ $\text{km}^2$ 、 $10.34 \times 10^{-2}$  处/ $\text{km}^2$ 。从灾害类型来看:滑坡数量达到 158 处(占总量的 43.3%),主要分布于马尔康镇和龙尔甲乡;崩塌 43 处,分布规律不明显;泥石流 164 处,占总量的 44.9%,主要分布于草登乡。由此看出无论是地质灾害总量或是各类型的分布,马尔康镇和草登乡地质灾害的数量和密度都是最大,初步分析主要是由于马尔康镇人口分布密集,人类工程活动频繁,且为高山地貌区,构造侵蚀严重,同时由于地震影响,山坡岩体结构存在不同程度的震裂损伤,较易形成地质灾害危险源,上述影响均为地质灾害提供了良好的孕灾条件。

表 2 研究区地质灾害分布统计

Tab.2 Geological disaster distribution statistics table

乡镇名称	乡镇面积/ $\text{km}^2$	灾害数量/处			灾害点密度 ( $10^{-2}$ 处· $\text{km}^{-2}$ )
		滑坡	崩塌	泥石流	
白湾乡	261.7	1	1	0	0.76
脚木足乡	450.7	4	1	8	2.88
康山乡	632.2	4	2	13	3.01
梭磨乡	1108.9	5	2	20	2.43
木尔宗乡	222.7	8	3	5	7.18
松岗镇	245.59	11	2	17	12.22
大藏乡	408.0	9	3	11	5.64
沙尔宗镇	387.3	12	4	12	7.23
日部乡	978.3	14	3	12	2.96
党坝乡	328.3	12	1	4	5.18
龙尔甲乡	345.4	26	3	9	11.00
马尔康镇	673.8	30	10	22	9.20
草登乡	589.8	22	8	31	10.34
合计	6 632.7	158	43	164	5.50

### 3 地质灾害危险性评价模型

#### 3.1 建模原理

##### 3.1.1 斜坡单元划分

本文基于 ArcGIS 软件中的水文分析模块对马尔康市进行斜坡单元预划分,再通过人机交互完善斜坡单元划分结果,最后根据野外调查的实际情况进行调整校正,形成最终的斜坡单元,其中基于 ArcGIS 的斜坡单元提取包括以下步骤:无洼地 DEM 生成—流向提取—流量提取—河网提取—河流链接—集水区提取—数据矢量化(图 3)。

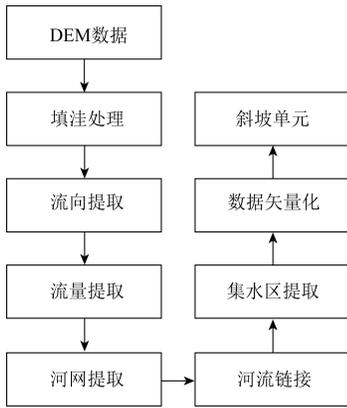


图 3 斜坡单元提取技术路线图

Fig. 3 Slope unit extraction technology roadmap

从初步提取结果来看,斜坡单元存在识别单元过小、跨行政管辖范围等问题,因此本文结合现场调查情况,基于切分、合并、边界调整等 GIS 人机交互的操作实现了斜坡单元划分的优化,提高了同一斜坡单元地形地貌、斜坡结构和地质环境条件等的一致性,最终将研究区划分为 5 695 个斜坡单元,其中斜坡平均面积大于 0.1 km<sup>2</sup>,初步分析主要是因为马尔康市地处川西高原南缘,新构造运动强烈,以高山峡谷地貌为主,区内斜坡海拔高差较大。同时为保证单元完整性,研究遵循以次级分水岭与沟谷为界的划分原则,因此斜坡单元划分面积稍微偏大。

##### 3.1.2 AHP - 证据权耦合模型

AHP 层次分析法属于复杂决策支持方法,用于解决决策过程中涉及多个标准或多个决策方案的复杂问题<sup>[9]</sup>。AHP 通过将复杂的决策问题分解成更小的、更易于分析的部分,然后逐步综合分析结果,以得出最终的决策建议。首先,需要根据研究问题和目标构建层次结构,将决策问题划分为目标层、准则层、决策层。然后,在每一层级中进行成对

比较,采用标度对准则层或决策方案的相对重要性进行评估(表 3),从而构建判别矩阵,并采用特征值法处理判别矩阵,计算出各准则层和决策层的相对权重。同时,进行一致性检验(式 1),以确保判断的一致性和可靠性。若一致性比率(consistency ratio, CR)小于 0.1,则认为判断矩阵的一致性是可接受的。最后,将不同层次的权重进行综合,以得到各个决策方案的总权重。

表 3 指标因子重要性判断标度

Tab. 3 Index factor importance judgment scale

判断标度	含义
1	表示两个因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 相比,它们的重要性相同
3	表示两个因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 相比, <i>a</i> 比 <i>b</i> 稍微重要
5	表示两个因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 相比, <i>a</i> 比 <i>b</i> 比较重要
7	表示两个因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 相比, <i>a</i> 比 <i>b</i> 明显重要
9	表示两个因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 相比, <i>a</i> 比 <i>b</i> 非常重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因子 <i>a</i> 与 <i>b</i> 的重要性之比为 <i>j</i> ,那么因子 <i>b</i> 与 <i>a</i> 的重要性之比为 1/ <i>j</i>

注: *a*、*b* 表示指标因子; *j* 表示判断标度。

一致性指标(consistency index, CI)计算公式为

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

式中:  $\lambda_{max}$  为判断矩阵的特征向量, *n* 为指标因子数量。

一致性比率(CR)计算公式为

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中: *CI* 为一致性指标, *RI* 为随机一致性指标(random consistency index, RI), *RI* 通过表 4 可得。

表 4 随机一致性指标(RI)数值

Tab. 4 Random consistency index (RI) value

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6
<i>RI</i>	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24
<i>n</i>	7	8	9	10	11	
<i>RI</i>	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	

注: *n* 表示指标因子数量。

证据权法是一种数据驱动的方法,通过假定影响因子之间是相互独立的,彼此不受干扰,利用综合的证据,来定量验证先前假设的离散的多元统计方法<sup>[10]</sup>。近年来,证据权法被大量运用于区域地质灾害评价中,通过贝叶斯维度综合各种证据层来预测某种事件发生的概率,可分别计算每个指标因子下属不同分级对区域地质灾害危险性的权重。为与 AHP 层次分析法中所计算的指标层因子权重区分开,本文将之称为指标因子的下属层间贡献度。

正贡献度和负贡献度计算公式为

$$w_i^+ = \ln \frac{P\{F|L\}}{P\{F|\bar{L}\}} = \ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3 + Npix_4}}, \quad (3)$$

$$w_i^- = \ln \frac{P\{\bar{F}|L\}}{P\{\bar{F}|\bar{L}\}} = \ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3 + Npix_4}} \quad (4)$$

式中:  $w_i^+$  和  $w_i^-$  分别表示当前影响因子级别区域内和区域外发生灾害的概率,为正向贡献度和负贡献度;  $P\{F|L\}/P\{F|\bar{L}\}$  和  $P\{\bar{F}|L\}/P\{\bar{F}|\bar{L}\}$  分别代表地质灾害发生的充分率和必要率;  $Npix_1$  和  $Npix_2$  分别表示该影响因子级别区域内和区域外发生灾害的数量;  $Npix_3$  和  $Npix_4$  分别表示该影响因子级别区域内和区域外未发生地质灾害的数量。

当  $w_i^+ > 0$  或  $w_i^- < 0$  时,灾害与影响因子之间呈正相关;当  $w_i^+ < 0$  或  $w_i^- > 0$  时,灾害与影响因子之间呈负相关;当  $w_i^+ = 0$  或  $w_i^- = 0$  时,灾害与影响因子之间没有相关关系。

为表示证据因子对于灾害发生和不发生的区分能力,可通过总贡献度  $C_i$ ,其计算公式为

$$C_i = w_i^+ - w_i^- \quad (5)$$

若该值为正,证明二级因子有利于灾害的发生,若为负值,证明二级因子不利于灾害的发生;若为0,则代表该二级因子与灾害的发生无关。

证据权法为客观的数理统计方法,但在其数理统计分析的过程中并未考虑到指标因子本身对于地质灾害易发或危险性的影响。因此,本文通过层次分析法中调查问卷或专家评分的方式给指标因子权重赋值,以求耦合模型评价结果可反应不同指标因子对地质灾害影响的差异性。

### 3.1.3 精度检验

本文采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)曲线下面积(area under the curve of the receiver operating characteristic, AUC)对评价模型进行精度检验。ROC是反应连续变量敏感性和特异性的综合指标,由于绘制该曲线不需要确定分类阈值,从而避免了过多的人为因素对模型精度验证的干扰,近年来被广泛用于验证地质灾害危险评估的准确性<sup>[11]</sup>,主要通过绘制敏感性和特异性曲线揭示两者关系。AUC是用于定量度量模型好坏的常用指标,其值为[0.5,1.0],越接近1.0说明模型精度越高,低于0.5则说明模型不具备预测能力。其中真阳性率(true positive rate, TPR)(敏感度)和假阳性率(false positive rate,

FPR)(特异性)的计算公式如下

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FN} \quad (7)$$

式中:  $TP$  为真阳性的数量,即模型正确预测阳性类别的数量;  $FP$  为假阳性的数量,即模型错误预测阴性类别的数量;  $FN$  为假阴性的数量,即模型错误预测阴性类别的数量;  $TN$  为真阴性数量,即模型正确预测阴性类别的数量。

### 3.2 评价因子的选取及分级

本文在所收集研究区数据和目前相关研究进展的基础上<sup>[12-14]</sup>,结合地质灾害的分布特征,对研究区内地质灾害的孕灾条件以及触发因素展开初步分析。从地质灾害发育的地形条件、水文条件、地震条件、地质条件和人类工程活动5个方面综合考虑提出8个指标因子,包括坡度、坡向、斜坡高差、年均降雨量、距水系距离、距断层距离、地层岩性、距道路距离,各指标因子详细分级标准见表5。

表5 研究区各指标因子分级

Tab.5 Index factor grading in the study area

指标因子	分级数量	分级标准
坡度/(°)	8	[0°,5°]; (5°,10°); (10°,15°); (15°,20°); (20°,25°); (25°,30°); (30°,35°); (35°,90°]
地形条件 坡向/(°)	8	北(337.5°,22.5°); 北东(22.5°,67.5°); 东(67.5°,112.5°); 南东(112.5°,157.5°); 南(157.5°,202.5°); 南西(202.5°,247.5°); 西(247.5°,292.5°); 北西(292.5°,337.5°]
斜坡高差/m	7	[0,200]; (200,400); (400,600); (600,800); (800,1000]; (1000,1200]; (1200,1400]; >1400
水文条件 年均降雨量/mm	5	[635,655]; (655,675]; (675,695]; (695,715]; >715
水文条件 距水系距离/km	8	[0,2]; (2,4]; (4,6]; (6,8]; (8,10]; (10,12]; (12,14]; >14
地震条件 距断层距离/km	8	[0,3]; (3,6]; (6,9]; (9,12]; (12,15]; (15,18]; (18,21]; >21
地质条件 地层岩性	5	三叠纪似斑状二长花岗岩; 三叠纪花岗岩; 三叠纪花岗岩闪长岩; 上三叠统厚层状变砂岩板岩; 中—上三叠统变砂岩板岩夹灰岩
工程活动 距道路距离/km	8	[0,1]; (1,2]; (2,3]; (3,4]; (4,5]; (5,6]; (6,7]; >7

### 3.3 因子共线性诊断

本文旨在通过 AHP 揭示研究区不同指标因子对地质灾害发育的差异化影响,并基于证据权模型实现指标因子下属不同层级对地质灾害事件贡献的量化评价,而证据权模型中的指标因子之间若存在多重共线性,将增大模型的方差系数。相关性越大则模型越容易产生误差,模型评价精度也就越低。因此,为保证评价指标因子之间的相互独立性,需对所提取的因子进行共线性诊断<sup>[15]</sup>,得到地质灾害危险性评价指标因子间的皮尔逊相关系数  $R$ (图 4)。其取值范围为  $(-1, 1)$ : 当两个指标因子之间的相关性持续增强时,相关系数  $R$  趋于  $-1$  和  $1$ ; 当  $R > 0$  时,表明因子之间呈正相关,一个因子随另一个因子的增大而增大; 当  $R < 0$  时,情况则相反;  $R = 0$  意味着两个指标因子间不存在相关关系; 当  $|R| < 0.3$  时,两因子间的相关性极弱,可认为无相关性存在; 当  $0.3 < |R| < 0.5$  时,两因子之间存在低相关性; 当  $0.5 < |R| < 0.8$  时,两因子间存在中度相关性; 当  $|R| > 0.8$  时,两因子之间存在高相关性<sup>[13]</sup>。

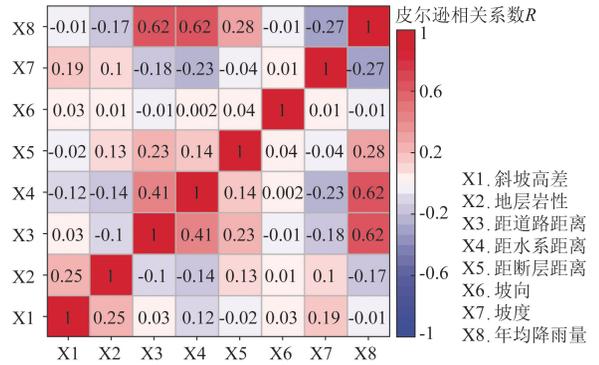


图 4 研究区危险性评价指标因子的皮尔逊相关系数  $R$  矩阵热图  
**Fig. 4 Pearson correlation coefficient  $R$  matrix heat map for the risk assessment index factor in the study area**

从指标因子的相关系数矩阵热图来看,本文所选取的危险性评价因子均未存在两两高相关性的因子组合,满足危险性评价模型对数据的独立性要求,不存在较强的共线性,可用于本文所建耦合模型的危险性分析评价。经上述因子共线性诊断分析后,确定以斜坡高差、地层岩性、距道路距离、距水系距离、距断层距离、坡向、坡度、年均降雨量作为危险性评价体系的指标层因子(图 5)。

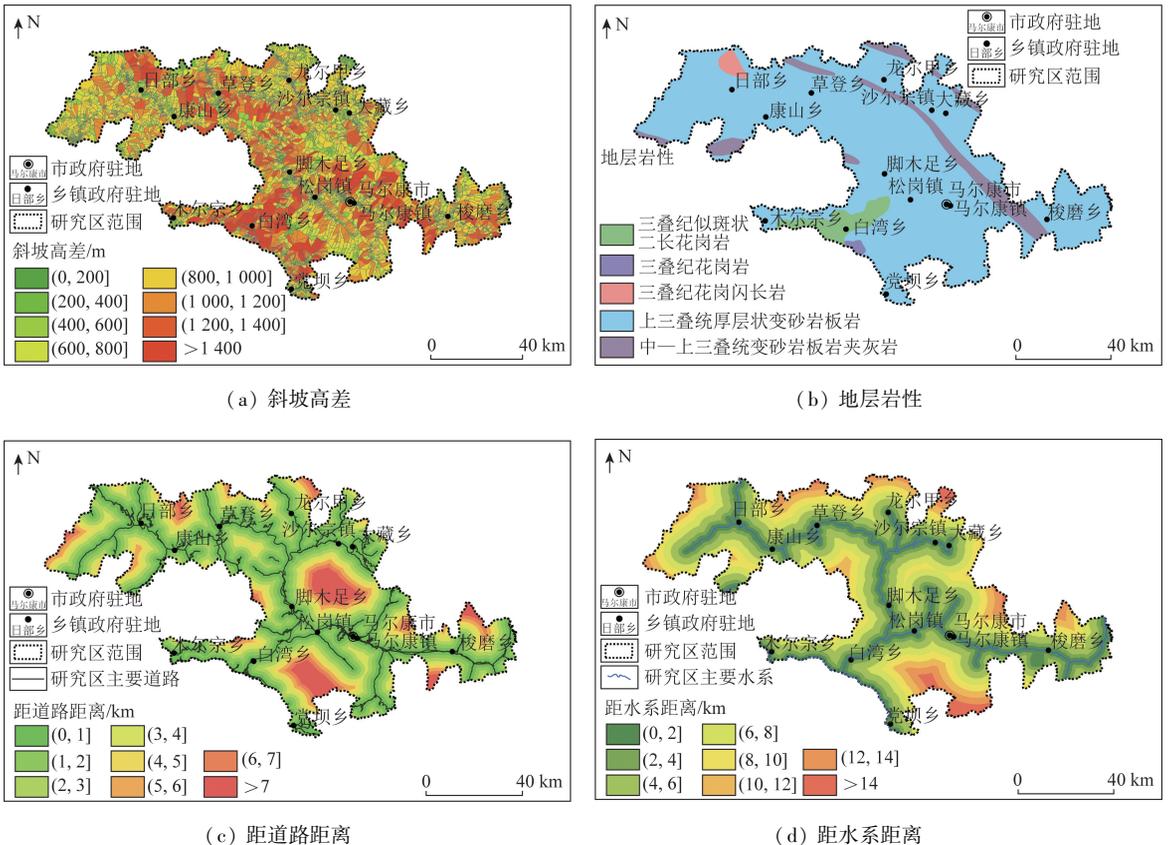


图 5-1 研究区地质灾害危险性评价指标因子图层

Fig. 5-1 Geological hazard risk assessment index factor layer in the study area

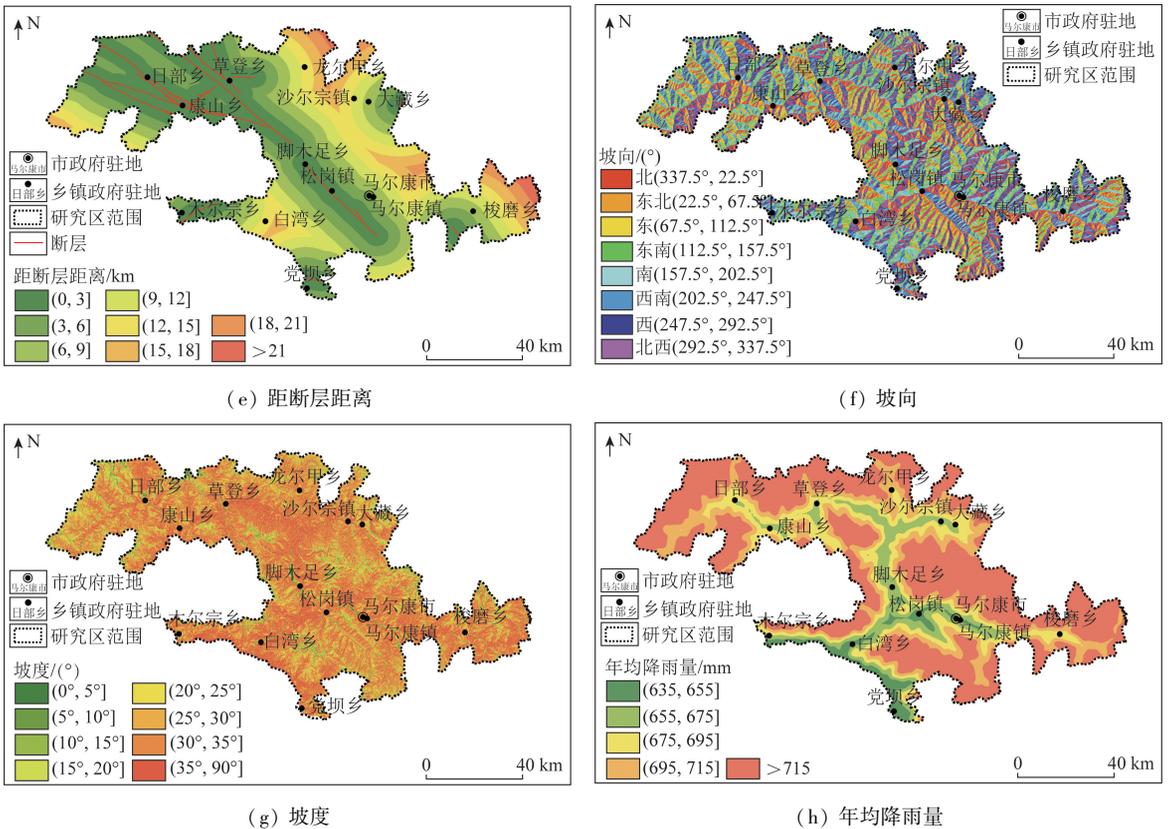


图 5-2 研究区地质灾害危险性评价指标因子图层

Fig. 5-2 Geological hazard risk assessment index factor layer in the study area

## 4 地质灾害危险性评价结果

### 4.1 指标层因子权重计算

根据专家经验和调查问卷分析研判不同指标因子对研究区地质灾害的影响,构建层次分析法判别矩阵(表 6)。

表 6 研究区层次分析法判别矩阵

Tab.6 AHP discriminant matrix in the study area

因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1	1/3	1	2	2	3	1/2	1/6
X2	3	1	3	3	2	5	3	1/4
X3	1	1/3	1	2	1/2	3	1/2	1/6
X4	1/2	1/3	1/2	1	1/3	2	1/4	1/8
X5	1/2	1/2	2	3	1	2	1/4	1/7
X6	1/3	1/5	1/3	1/2	1/2	1	1/5	1/9
X7	2	1/3	2	4	4	5	1	1/5
X8	6	4	6	8	7	9	5	1

注: X1 表示斜坡高差; X2 表示地层岩性; X3 表示距道路距离; X4 表示距水系距离; X5 表示距断层距离; X6 表示坡向; X7 表示坡度; X8 表示年均降雨量。

经计算,得到上述判断矩阵最大特征值  $\lambda_{max} = 8.49$ ,并根据最大特征值计算得到判断矩阵对应的

特征向量,通过归一化处理得到各个指标因子的权重值。依据式(1)和式(2)对权重计算结果进行一致性检验,经计算  $CI = 0.07$ ,经查表  $RI = 1.41$ ,最终计算得到  $CR = 0.05 < 0.1$ ,权重计算通过一致性检验。最终通过 AHP 层次分析法确定所选取指标因子对地质灾害危险性影响的权重值(表 7)。

表 7 研究区指标因子权重

Tab.7 Index factor weight value in the study area

因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
权重	0.07	0.14	0.06	0.04	0.10	0.03	0.14	0.42

注: X1 表示斜坡高差; X2 表示地层岩性; X3 表示距道路距离; X4 表示距水系距离; X5 表示距断层距离; X6 表示坡向; X7 表示坡度; X8 表示年均降雨量。

### 4.2 方案层区间贡献度计算

基于危险性评价模型中证据权法的计算公式(式(3)、(4)、(5)),分别计算各个指标因子下属不同分级的正负贡献度,并相减得到总贡献度  $C_i$ (表 8)。

对研究区指标因子下属不同层级区间的灾害分布情况以及对应计算得到的  $C_i$  值展开分析,得到以下结论。在一定坡度范围内,坡度对于地质灾

表 8 研究区各指标因子下属层级贡献度

Tab. 8 Contribution of the subordinate levels of each index factor in the study area

因子	证据层	$C_i$ 值	证据层	$C_i$ 值
坡度/(°)	[0°, 5°]	-	(20°, 25°)	0.14
	(5°, 10°)	1.10	(25°, 30°)	-0.17
	(10°, 15°)	3.09	(30°, 35°)	-0.71
	(15°, 20°)	2.17	(35°, 90°)	-1.28
坡向	北	-0.83	南	0.24
	北东	0.24	南西	0.23
	东	0.30	西	-0.15
	南东	-0.02	北西	-0.79
斜坡高差/ m	[0, 200]	2.68	(800, 1 000]	-1.17
	(200, 400]	0.31	(1 000, 1 200]	-2.34
	(400, 600]	-0.23	(1 200, 1 400]	-3.45
	(600, 800]	-0.92	> 1 400	-4.18
年均降雨 量/mm	[635, 655]	0.70	(695, 715]	-0.49
	(655, 675]	1.04	> 715	-2.41
	(675, 695]	0.57	-	-
距水系距 离/km	[0, 2]	0.62	(8, 10]	-1.67
	(2, 4]	-0.09	(10, 12]	-1.99
	(4, 6]	-0.35	(12, 14]	-2.34
	(6, 8]	-0.47	> 14	-2.87
距断层距 离/km	[0, 3]	0.49	(12, 15]	-0.64
	(3, 6]	-0.41	(15, 18]	-0.16
	(6, 9]	0.31	(18, 21]	-2.09
	(9, 12]	-0.12	> 21	-0.61
地层岩性	三叠纪似斑 状二长花岗 岩	-1.39	三叠纪花岗 岩	-
	三叠纪花岗 闪长岩	-	中—上三叠 统变砂岩板 岩夹灰岩	-0.38
	上三叠统厚 层状变砂岩 板岩	0.7	-	-
距道路距 离/km	[0, 1]	2.24	(4, 5]	-2.73
	(1, 2]	-1.64	(5, 6]	-2.84
	(2, 3]	-1.16	(6, 7]	-3.02
	(3, 4]	-2.51	> 7	-3.61

注：“-”表示灾害不发育。

害的发生有着明显的正向促进作用,且随着坡度的增加而增加;从坡向来看,坡向为北东、东、南西、南方向的  $C_i$  值为正,表明地质灾害所发生的斜坡单元坡向多朝向北东或南西侧,初步推断主要是由于地形地貌受 NW—SE 走向构造断层和水系的影响控制;斜坡高差为单元斜坡最高海拔和最低海拔之差,与常规认识高差越大、地形越陡峭、地质灾害越发育的认知不同,反而表现为对地质灾害事件的反向抑制,超过 400 m 后  $C_i$  值为负,并随着斜坡高差的增大而持续降低,斜坡高差越低地质灾害数

量反而越大,初步推断是由于斜坡高差越低,地形相对开阔平坦,人类的工程活动越强烈,反而导致地质灾害发育;研究区域年均降雨量为 635 ~ 806 mm,从计算结果来看,降雨量在一定范围内对地质灾害的发生有着正向促进作用;距水系、道路、断层距离 3 个指标因子与地质灾害事件发生均存在负相关关系,一定范围内,上述影响因子对地质灾害的发生有着正向促进作用( $C_i$  值为正),而当超出一定范围后, $C_i$  值逐渐降低,甚至为负,体现出对地质灾害发生的抑制作用,其中距道路距离因子相关性最大,随距离变化  $C_i$  值变化最明显;研究区域地质灾害在上三叠统厚层状变砂岩板岩的  $C_i$  值为正值,其余地层为负值,说明变砂岩板岩最易发生地质灾害,在其余岩性强度较高的花岗岩中基本不发育。

### 4.3 模型结果及精度评价

前文根据证据权相关计算公式,获得了指标因子下属不同区间对于地质灾害事件的贡献度,在 AHP 计算出的因子权重的基础上,通过 ArcGIS 软件实现了不同因子贡献度  $C_i$  值的加权叠加,最终得到了马尔康市研究区 AHP—证据权耦合模型的危险性评价结果。本文采用自然断点法将上述评价结果进行危险性分区,将评价结果分为极低危险区[-1.695 1, -0.986 4)、低危险区[-0.986 4, -0.437 0)、中危险区[-0.437 0, 0.105 7)、高危险区[0.105 7, 0.502 2)、极高危险区[0.502 2, 0.982 9)(分区括号内数值表示  $C_i$  值)。高和极高危险区面积占研究区面积的 23.42%,其区域内发育地质灾害数量占总数的 76.15%,可初步证明危险性评价结果与地质灾害分布情况相吻合,研究区地质灾害危险性分区见图 6。同时,根据现场调查和所收集资料来看,马尔康区域构造活动强烈,地震活动强烈,第四系松散堆积层较厚,加上人类工程活动的影响,使得马尔康市土质滑坡发育,其分布与前文所划分的高和极高风险区高度重合,主要集中在各乡镇的高和极高风险区,由此可见,地质灾害受人类工程活动影响较大。马尔康市崩塌绝大部分为岩质崩塌,主要发育于三叠系板岩、千枚岩和变质砂岩,其分布主要与地层岩性、斜坡高差等因素有关。从启动条件来看,泥石流的发育主要与降雨和物源有关,其中草登乡泥石流发育数量最多,其较高的年均降雨量或为主要原因,同时灾害分布与高及以上危险性区分布吻合度较高。由危险

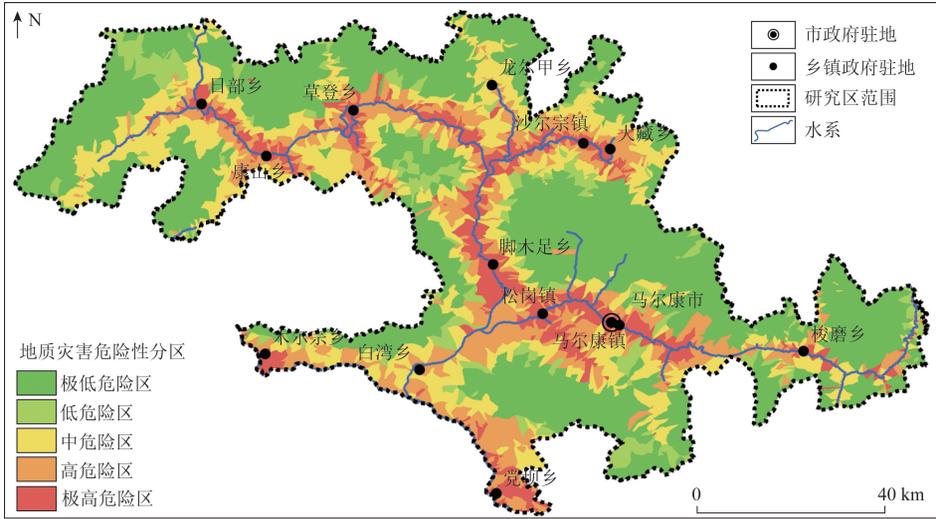


图6 研究区地质灾害危险性分区

Fig. 6 Geological hazard risk zoning map of the study area

性分区图可知,高和极高危险区主要集中在研究区主要水系的两侧,也就是居民聚集区,初步推断是由于建筑、道路以及浇灌等人类工程活动对边坡稳定性产生较大的负面影响,而海拔较高、人类工程活动相对较小的区域地质灾害高危险性范围反而相对较小。

本文通过 ArcGIS 平台在地质灾害危险性分区的结果上叠加地质灾害数据,可得到不同危险性分区的地质灾害占比(分区地质灾害数量比地质灾害总数量)、分区面积占比(分区面积占研究区总面积)及频率比(地质灾害占比与分区面积占比的比值)(表9)。

表9 研究区各危险区划频率比

Tab.9 Frequency ratio for each danger zone in the study area

危险区划	滑坡占比/%	面积占比/%	频率比
极低危险区	1.36	46.55	0.03
低危险区	3.52	8.09	0.44
中危险区	18.97	21.94	0.86
高危险区	24.12	14.96	1.61
极高危险区	52.03	8.46	6.15

结合危险性评价结果,从表9中可明显看出,随着危险程度增大,频率比也随之增大,并且高危险区和极高危险区频率比均大于1,符合研究区地质灾害发育的客观情况。同时为进一步评价本文所建立模型的精度,以收集整理的地质灾害样本数据为基础,提取斜坡单元对应的危险性评价价值,以“1”和“0”代表地质灾害事件的状态值,通过

Origin 绘制 ROC 曲线对模型计算结果进行检验(图7)。

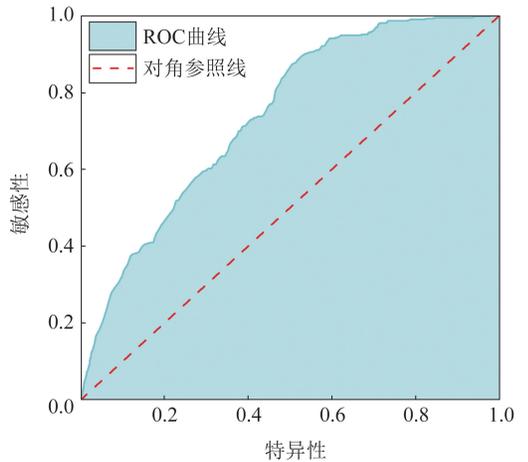


图7 研究区地质灾害危险性 ROC 曲线

Fig.7 Geological hazard risk ROC curve in the study area

从图中可以看到,ROC 曲线下方 AUC 面积为 0.78,表明 AHP-证据权耦合模型对研究区地质灾害危险性预测精度达到 0.78,模型整体预测精度较好。

### 5 结论

(1)在既有地质灾害数据库的基础上,分析光学遥感影像上地形地貌和变形迹象特征,对马尔康市研究区地质灾害展开了综合研判和解译,根据现场调查资料对解译结果进行复核,最终确定地质灾害点总数 365 处,其中滑坡 158 处,崩塌 43 处,泥

石流 164 处。并基于 ArcGIS 平台对研究区地质灾害空间分布情况进行了统计分析,发现受人类工程活动影响,地质灾害主要集中在居民城镇区和主要道路的两侧边坡。

(2)在 ArcGIS 水文分析的基础上,结合人机交互手段,实现了斜坡单元划分的优化,使得同一斜坡单元地形地貌、斜坡结构和地质环境条件等基本一致,将研究区划分为 5 695 个斜坡单元。

(3)采用 AHP - 证据权耦合模型分别求解指标因子权重值及下属区间对地质灾害事件的贡献度,经空间叠加后得到地质灾害危险性分区图。通过自然断点法将马尔康市研究区分为地质灾害极低危险区(面积占比 46.55%)、低危险区(面积占比 8.09%)、中危险区(面积占比 21.94%)、高危险区(面积占比 14.96%)、极高危险区(面积占比 8.46%),并采用 ROC 曲线和频率比模型评价展开验证,AUC 达到 0.78,模型整体预测精度较好,该评价结果可为类似区域地质灾害危险性评价工作提供借鉴。

(4)研究采用 AHP - 证据权耦合模型对地质灾害危险性展开分析,采用了主客观结合的方法,其中 AHP 的权重可能受专家主观经验影响存在一定误差,建议后期采用信息熵、随机森林等客观的数理统计或机器学习方法与证据权进行耦合,展开对比分析。此外,研究将滑坡、崩塌、泥石流视为地质灾害,采用相同评价指标体系,但从灾害发育特征来看,滑坡、崩塌、泥石流的关键指标因子应不同,后续研究可 3 种地质灾害的发育特征分别提出评价指标体系,并进行危险性评价。

**参考文献 (References):**

[1] 许强,张一凡,陈伟.西南山区城镇地质灾害易损性评价方法——以四川省丹巴县城为例[J].地质通报,2010,29(5):729-738.  
Xu Q,Zhang Y F,Chen W. Vulnerability assessment of geo-hazards in southwest mountainous area; Aanba County, Sichuan, China as an example[J]. Geological Bulletin of China,2010,29(5):729-738.

[2] 许强,朱星,李为乐,等.“天-空-地”协同滑坡监测技术发展[J].测绘学报,2022,51(7):1416-1436.  
Xu Q,Zhu X,Li W L,et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(7):1416-1436.

[3] Varnes D J. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice[M]. Paris:UNESCO,1984.

[4] 罗元华,张梁,张业成.地质灾害风险评估方法[M].北京:地质出版社,1998.  
Luo Y H,Zhang L,Zhang Y C. Geological Disaster Risk Assessment Method[M]. Beijing:Geology Press,1998.

[5] 赵焕臣,和金生,许树柏.层次分析法在科技管理中的应用[J].科学学与科学技术管理,1985(6):23-25.  
Zhao H C,He J S,Xu S B. Application of analytic hierarchy process in science and technology management[J]. Science and Science and Technology Management,1985(6):23-25.

[6] 易靖松,王峰,程英建,等.高山峡谷区地质灾害危险性评价——以四川省阿坝县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):134-142.  
Yi J S,Wang F,Cheng Y J,et al. Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County,Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2022,33(3):134-142.

[7] 赵晓燕,谈树成,李永平.基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价[J].云南大学学报:自然科学版,2021,43(2):299-305.  
Zhao X Y,Tan S C,Li Y P. Risk assessment of geological hazards in Dongchuan District based on the methods of slope unit and combination weighting[J]. Journal of Yunnan University(Natural Science Edition),2021,43(2):299-305.

[8] 赵雪慧.马尔康市地质灾害易发性多模型综合评价[D].成都:成都理工大学,2020.  
Zhao X H. Multi-model Comprehensive Assessment of Susceptibility to Geological Disaster in Maerkang City[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2020.

[9] 胡现振,付少杰,迟宏庆,等.基于层次分析-信息量耦合模型的地质灾害风险评价——以河北省武安市为例[J].中国地质调查,2023,10(5):109-117.  
Hu X Z,Fu S J,Chi H Q,et al. Geological hazard risk assessment based on AHP - information coupling model: A case study of Wu'an City in Hebei Province[J]. Geological Survey of China,2023,10(5):109-117.

[10] 罗璟.“8·3”鲁甸地震斜坡动力响应及巨型岩质滑坡堵江机制研究[D].成都:成都理工大学,2020.  
Luo J. Slope Dynamic Response and Formation Mechanism of Large-scale Rockslide Dam in the “8·3” Ludian Earthquake[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2020.

[11] 罗路广,裴向军,崔圣华,等.九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(11):2306-2319.  
Luo L G,Pei X J,Cui S H,et al. Combined selection of susceptibility assessment factors for Jiuzhaigou earthquake-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2021,40(11):2306-2319.

[12] 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 X D, Liu X N, Zhao Z P, et al. Geological disaster hazard assessment in Yanchi County based on AHP[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2019, 31(3):183-192.

[13] 管新邦. 云南省滑坡地质灾害危险性评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.

Guan X B. Study on Risk Assessment of Landslide in Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.

[14] 李阔,杨景,唐川. 地质灾害危险性评价研究——以四川省青川县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007(2):54-57, 121.

Li K, Yang J, Tang C. Risk assessment on geological hazards in Qingchuan County of Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007(2):54-57, 121.

[15] 黄双飞. 基于多尺度地理加权回归的滑坡易发性评价[D]. 长沙: 中南大学, 2022.

Huang S F. Landslide Susceptibility Assessment Based on Multi-scale Geographically Weighted Regression[D]. Changsha: Central South University, 2022.

## Regional geological hazard risk assessment based on slope unit and AHP - evidence weight coupling model

LI Qiang<sup>1,2,3</sup>, MENG Minghui<sup>1,2,3</sup>, QIN Liang<sup>1,2,3</sup>, YANG Peizhang<sup>2,3</sup>,  
LIAO Maoquan<sup>2,3</sup>, JIANG Qingming<sup>2,3</sup>

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu Sichuan 610081, China; 2. Sichuan Hua Di Building Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China; 3. Sichuan Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu Sichuan 610081, China)

**Abstract:** Risk assessment is an important means of disaster prevention and mitigation in mountainous areas in the southwestern China. However, most current evaluation systems use models of shallow level and with single indicator. To address this problem, the authors in this paper proposed the AHP - evidence weight coupling model to conduct risk assessment of geological hazard in Maerkang. ArcGIS hydrological analysis and human - computer interaction were combined to optimize the division of slope units. The study area was divided into 5 695 slope units, and 8 index factors were selected, including rainfall, stratigraphic lithology, slope gradient, slope aspect, distance from water system, distance from fault, and distance from road. AHP - evidence weight coupling model was used to respectively solve the index factor weight value and the contribution of the subordinate intervals to geological hazard events, and the geological hazard risk zoning map of the study area was obtained. The results show that high - risk areas and extremely high - risk areas account for 14.96% and 8.46% of the total area respectively, and these areas are mainly concentrated in residential areas on both sides of the water system. The AUC is 0.78, and the model evaluation accuracy is good. The research results could provide references for the risk assessment of regional geological hazards and have guiding significance for the preliminary work of geological hazard investigation in the southwestern mountainous areas.

**Keywords:** geological hazard; risk assessment; AHP (analytic hierarchy process); evidence weight model; slope unit

(责任编辑: 刘丹)