doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.007

# 湖南省斜坡地质灾害危险性区划研究

彭祖武',罗斌斌'\*,刘峻峰',王青霞2,肖 婷3,易立文4,段政彬!

PENG Zu-Wu<sup>1</sup>, LUO Bin-Bin<sup>1\*</sup>, LIU Jun-Feng<sup>1</sup>, WANG Qing-Xia<sup>2</sup>, XIAO Ting<sup>3</sup>, YI Li-Wen<sup>4</sup>, DUAN Zheng-Bin<sup>1</sup>

1. 湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410014; 2. 湖南省气象台, 湖南 长沙 410118;

3. 中南大学, 湖南 长沙 410083; 4. 湖南师范大学, 湖南 长沙 410081

1. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410014, Hunan, China; 2. Hunan Meteorological Observatory,

Changsha 410118, Hunan, China; 3. Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

4. Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan, China

**摘要:**湖南省位于云贵高原向江南丘陵过渡地带,以构造侵蚀山地丘陵地貌为主,地质环境复杂,随着近年来强降雨增多,地质灾 害呈高发态势。本文利用湖南省 2013—2022 年近十年地质灾害点数据,选取发育因子(斜坡地质灾害点发育密度)、基础因子 (地形起伏度指数、地形湿度指数、岩土(体)完整程度、岩土(体)坚硬程度、含水岩层富水性)、引发因子(暴雨强度指数、人类工 程活动敏感度指数)三大类共 8 项指标,采用层次分析法-信息量法综合确定评价因子权重,将湖南省地质灾害危险性等级划分 为极高、高、中和低危险区。研究发现,湖南省地质灾害孕灾环境主要受区内地质、地貌和气象条件的综合影响(具体表现为所 选因子中,岩土(体)坚硬程度、地形起伏度指数、暴雨强度指数对斜坡地质灾害危险性评价的贡献度突出)。研究结果对指导全 省防灾减灾具有一定意义,可作为具有类似地质环境条件的地区进行区域性斜坡地质灾害危险性研究的参考。 关键词:斜坡地质灾害;危险性区划;验证分析;湖南省

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0317-11

# Peng Z W, Luo B B, Liu J F, Wang Q X, Xiao T, Yi L W and Duan Z B. 2025. Research on the Risk Zoning of Slope Geological Hazards in Hunan Province. *South China Geology*, 41(2): 317–327.

Abstract: Hunan Province is situated in the transitional zone between the Yunnan-Guizhou Plateau and the Jiangnan Hilly Region, dominated by tectonically eroded mountainous and hilly landforms. Geological environment is highly complex, and with the increasing frequency of intense rainfall events in recent years, geo-hazards have demonstrated a significantly rising trend. This study analyzed a decade-long dataset (2013–2022) of geological hazard sites in Hunan Province, selecting eight evaluation indicators categorized into three groups: developmental factors (slope hazard density), fundamental factors (terrain relief index, topographic wetness index, integrity degree of rock/soil mass, hardness degree of rock/soil mass, and aquifer water richness), and triggering factors (rainstorm intensity index and human engineering activity sensitivity

收稿日期: 2024-11-25;修回日期: 2025-02-05

基金项目:湖南省地质院科研项目(编号:HNGSTP202406)、地质灾害与降雨致灾因素分析项目(湘财资环指〔2024〕14号)、湖南省近十年地质灾害成因调查项目(湘财资环指〔2023〕10号)

第一作者:彭祖武(1986—),男,高级工程师,从事水工环地质、灾害地质研究, E-mail: 616317808@qq.com

通讯作者:罗斌斌(1995—),男,硕士,从事地质灾害研究, E-mail: imbinbinluo@qq.com

index). The Analytic Hierarchy Process (AHP) integrated with the Information Value (IV) method was applied to determine comprehensive weights for hazard assessment, classifying geological hazard danger into four levels: extremely high, high, moderate, and low risk. The results revealed the predisposing environment of geo-hazards in Hunan Province are predominantly governed by the synergistic interactions of geological, geomorphic and meteorological conditions, which is specifically manifested in the prominent contributions of the selected factors—hardness degree of rock/soil mass, terrain relief index, and rainstorm intensity index—to the risk assessment of slope geological hazards. These findings provide scientific support for regional disaster prevention and mitigation, while the methodology offers a reference for similar geological environments in other provinces.

Key words: slope geohazards; risk zoning; validation analysis; Hunan Province

湖南省以山地丘陵地貌为主,广泛分布花岗 岩、变质砂岩、泥岩夹粉砂岩等易崩易滑岩组,且 处于东南季风和西南季风相互作用的地带,季风 气候特征明显,降水分布不均、年际变化大、汛期 时间长,加之人类工程活动强烈等因素,导致全省 汛期地质灾害多发,"十三五"期间发灾数量多年 居于全国前三(湖南省自然资源厅,2020,2021)。 据 2013—2022 年近十年地质灾害月报数据统计, 全省共发生滑坡、崩塌、泥石流等三种斜坡地质 灾害 19347 起,其中滑坡 17180 起、崩塌 1780 起、 泥石流 387 起,数量占比依次为 88.80%、9.2%、 2.0%,涉及 14 个地市州,121 个县市区。地质灾 害俨然已成为制约湖南省区域经济发展和生态安 全的关键问题之一。

前人对区域地质灾害风险评价已有了系统的 研究成果(Xu C et al., 2012; Dobbelaere et al., 2021; Sun X P et al., 2021; Xu S H et al., 2021), 主要集 中在以下三个方面:1)基于斜坡单元的评价方法 创新,例如马敏等(2024)提出了一种基于随机森 林赋权信息量的滑坡灾害易发性评价方法,评价 精度有所提高;陈刚等(2024)提出地貌-斜坡结构 划分法,相较于水文分析法优化了重庆市涪陵区 的斜坡单元划分,通过形状指数、灾害面积分布等 指标验证了其合理性; 吴家宝等(2025)以福建武 平十方镇为例优化了多尺度分割方法,引入形状 指数、地形起伏度等指标,解决了平坦地区划分误 差问题。2)多模型耦合与算法优化,比如赵晓燕 等(2021)采用层次分析法(AHP)与熵权法组合赋 权,结合斜坡单元划分,构建了云南东川区9因子 评价体系;宋渊等(2022)采用加权信息量法 (AHP-信息量融合)与 ISODATA 聚类算法,构建 了湖北兴山县 11 因子评价体系;陈宾等(2024)利 用 PSO-BP 神经网络模型预测滑坡体积,结合建 筑密度、人口密度等指标对湖南湘乡市进行了地 质灾害易损性评价。3)区域地质灾害风险评价实 践,桂忠强等(2018)采用信息量模型与 GIS 分析 技术,选取坡度、岩性等因子,将陕西洛南县划分 出地质灾害高、中、低三类危险区,并验证了灾害 点分布与分区的相关性,如高危险区集中于断层 附近及人类活动密集区;封建民等(2021)结合信 息量模型与 GIS 分析技术,选取地形起伏度、岩 性等6个因子,验证了陕西略阳县震后灾害与地 形、水系的强相关性,发现76.5%灾害发生于坡 度 15°~40°的地区, 松散岩组区灾害占比 33%; 李 崇博等(2024)针对新疆霍城北部山区,基于 AHP-信息量模型划分出 236 个斜坡单元, 完成了危险 性-易损性叠加风险评价,得出极高风险区占比 4.1%, 高风险区集中分布于沟谷道路沿线的结论, 验证了模型准确性;武杨(2024)基于斜坡单元划 分,采用综合指数法评估了江西赣西慈化镇地质 灾害易发程度,并叠加降雨工况计算了危险性,完 成了风险等级划分,为"隐患点+风险区双控"体系 建设提供了依据。

综上所述,现有研究大多集中于县域尺度的 地质灾害易发性分析,或仅限于单一因素下的危 险性评估(辛鹏等,2012;卜祥航,2016),缺乏在孕 灾地质背景下的全面易发性分析,且未能充分结 合诱发条件和易损性因素,构建出完整的丘陵山 区地质灾害风险评估框架(何寒舟和丁一,2024)。 此外,目前以省级为研究范围的地质灾害危险区 划研究较少。因此,本文以湖南省为研究范围,以 近十年地质灾害点(图1)为研究对象,选取发育 因子(斜坡地质灾害点发育密度)、基础因子(地形 起伏度指数、地形湿度指数、岩土(体)完整程度、 岩土(体)坚硬程度、含水岩层富水性)、引发因子 (暴雨强度指数、人类工程活动敏感度指数)等三 大类共 8 项指标,通过层次分析法(AHP)-信息量 法进行湖南省斜坡地质灾害危险性区划研究,最 后对全省危险性区划结果进行验证分析。本研究 成果对指导全省防灾减灾具有一定意义,同时可 为类似地质环境条件的地区进行区域性斜坡地质 灾害危险性研究提供参考。

# 1评价因子选取与分级

根据已有数据和可操作性,结合湖南省地质



Fig. 1 Distribution map of slope-related geological hazard sites in Hunan Province (2013-2022)

灾害点数据来源于全省地质灾害月报

灾害的发育情况和文献对比,本文选取发育因子 (斜坡地质灾害点发育密度)、基础因子(地形起伏 度指数、地形湿度指数、岩土(体)完整程度、岩土 (体)坚硬程度、含水岩层富水性)、引发因子(暴 雨强度指数、人类工程活动敏感度指数)三大类 共8个因子(表1)作为评价指标。

其中,需要说明的是:

(1)含水岩层富水性共10类,各类划分标准见表2。

(2)暴雨强度指数是通过暴雨持续时间、最大1小时降雨量、最大日降雨量和过程累积雨量 乘以相应的权重系数得到的综合因子。通过调查 历史气象数据、灾情数据和最新的承灾体信息,发 现暴雨持续时间、最大1小时降雨量、最大日降 雨量和过程累积雨量为暴雨地质灾害的主要致灾 因子;暴雨持续时间、最大日降雨量和累积雨量都 在湘西北表现出明显的高值中心,最大1小时降 雨量的高值中心在岳阳和怀化南部。暴雨强度指 数在张家界、湘西州、常德、益阳西部、怀化北 部、岳阳等地较高,表明上述地区的暴雨强度较 强,造成暴雨灾害的可能性较大。

(3)切坡建房因子按<0.11(强度低)、[0.11,</li>
0.23)(强度较低)、[0.23, 0.36)(强度中等)、[0.36,
0.58)(强度较高)、≥0.58(强度高)分为5类。

(4)交通基础设施建设因子按<0.07(强度</li>
低)、[0.07, 0.16)(强度较低)、[0.16, 0.30)(强度中
等)、[0.30, 0.57)(强度较高)、≥0.57(强度高)分
5类。此外,基于湖南省 2013—2022 年斜坡地质

一级因子	二级	因子	数据来源				
发育因子	斜坡地质灾害点	发育密度(图2a)	湖南省2013—2022年度灾情统计月报				
	地形起伏度	指数(图2b)	湖南省30米分辨率DEM数字高程模型				
	地形湿度打	皆数(图2c)	湖南省30米分辨率DEM数字高程模型				
基础因子	岩土(体)完整	整程度(图2d)	湖南省地质调查所新编1:25万区域地质图断裂数据				
	岩土(体)坚硬	更程度(图2e)	湖南省1:25万工程地质图(草图)				
	含水岩层富	水性(图2f)	湖南省1:50万水文地质图				
	暴雨强度打	皆数(图2g)	湖南省气象台				
引发因子	人类工程活动 敏感度指数(图2h)	切坡建房	原湖南省国土资源厅"山丘区农村居民建房地质灾害 防治技术研究(编号2018-07)"基金项目				
		交通基础设施建设	openstreetmap网站发布的湖南省2022年开源路网数据				
		矿山开采	湖南省矿山地质环境调查评价项目(2017年)				

表 1 湖南省地质灾害危险性评价因子

 Table 1
 Risk assessment factors for geological hazards in Hunan Province

Table 2	Classification criteria	for water a	bundance of	f aquifers in l	Hunan Province
---------	-------------------------	-------------	-------------	-----------------	----------------

含水岩层	富水性	划分标准
扒掛出米了階步	水量贫乏	潜水单井水量<100吨/日,承压水单井水量100~1000吨/日
你敢石关1L际小	水量中等	潜水单井水量100~1000吨/日,承压水单井水量>1000吨/日
好 巨 刻 贻 刀 贻 刻 贻 ♪	水量贫乏	泉流量<0.1升/秒,单井水量<100吨/日
红压农际11际-农际小	水量中等	泉流量0.1~1升/秒,单井水量100~1000吨/日
	水量贫乏	暗河大泉流量<10升/秒
碳酸盐岩类岩溶水	水量中等	暗河大泉流量10~100升/秒
	水量丰富	暗河大泉流量>100升/秒
	水量贫乏	泉流量<0.1升/秒
基岩裂隙水	水量中等	泉流量0.1~1升/秒
	水量丰富	泉流量>1升/秒



# 国本語 (1997年)1997年) Fig. 2 Classification map of evaluation factors for slope geological hazards in Hunan Province

灾害数据,对道路数据与斜坡地质灾害点间的最 短距离进行 K-means 聚类分析(张靖和段富,2013; 孙林等,2022)得到道路与地质灾害点的关联阈值 为 0.35 km。

(5)矿山开采因子按<0.10(强度低)、[0.10,</li>
0.20)(强度较低)、[0.20, 0.31)(强度中等)、[0.31,
0.49)(强度较高)、≥0.49(强度高)分5类。此外,
根据 K-means 聚类分析得到矿山开采活动影响斜
坡地质灾害发育的最优平均缓冲距离为1.684 km。

(6)人类工程活动敏感度指数 *I<sub>工程</sub>=A×I<sub>矿山</sub>+ B×I<sub>切坡</sub>+C×I<sub>交通</sub>*,式中 *I<sub>矿山</sub>、I<sub>切坡</sub>、I<sub>交通</sub>*分别是矿山 开采、切坡建房、交通基础设施建设三种工程活 动强度归一化处理后的指标数值,A、B、C 为权重 系数。湖南省人类工程活动敏感度指数较高的区 域主要位于长株潭中心区域、娄底市、邵阳市、郴 州市、衡阳市、张家界市、怀化市北侧及常德市石 门、临澧、澧县三县交界处等地。

(7)其他评价因子的分级情况见表 3。

# 2 危险性评价

#### 2.1 危险性评价模型

层次分析法(AHP)通过数学统计传达专家经 验判断,增强地质灾害危险性评价的系统性与科 学性,因其操作便捷和多方案择优特性被广泛应 用(蒋树等,2017;冯卫等,2021)。特别是被成功 应用于基础地质条件相似且地理位置相近的江西 省省级尺度的地质灾害危险性评价(刘舫舟,2012)。 信息量法侧重量化地质灾害发育特征与评价因子 的关联度,能精确计算因子信息量值(王磊等, 2021)。采用两者结合的方式对湖南省地质灾害 危险性进行评价,能够有效反映地质灾害的实际 情况(伍敏婷等,2023)。故本文采用 AHP-信息量 法,对湖南省地质灾害危险性进行分析评价。

#### 2.2 危险性评价模型因子分值与权重

首先,运用 AHP 构建了影响地质灾害发生的 层次模型及判断矩阵,并进行权重计算和一致性 检验,通过专家打分法对评价指标进行了分级赋 值,运用公式1计算出每个评价指标因子的权重 值,具体公式如下:

$$W_j = \sum_{j=1}^n \theta_j Q_j \tag{1}$$

式中, *W<sub>i</sub>* 为层次分析法求得的各评价因子的权重 值; θ<sub>j</sub> 为第 *j* 类评价指标的权重; *Q<sub>j</sub>* 为第 *j* 类指标 的赋值; *n* 为评价指标的个数。

接着采用信息量法(公式 2)计算得到了各因 子内部类别间的信息量大小(按分值 1—10 分量 化),具体公式如下:

$$I_j = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}$$
(2)

式中: *I<sub>i</sub>* 为调查区某因素信息量, *N<sub>i</sub>* 为分布在因素 *X<sub>i</sub>* 内的灾害点数, *N* 为调查区灾害点总数, *S<sub>i</sub>* 为调 查区内因素 *X<sub>i</sub>* 的栅格面积, *S* 为调查区总栅格面积。

由于公式(2)不能直接求解各因子间量化的 权重值,需再利用公式3信息量增益模型进行计 算。随机变量X信息量增益(Infomatian Gain)定 义为系统的总熵减去X的条件熵:

$$IG(X) = H(Y) - H(Y|X)$$
(3)

在其他条件不变的前提下,把特征 X 去掉,系 统信息量减少。IG 越大,蕴涵的信息越丰富,这 个特征就越重要。而式中涉及到的总熵 H(X)和 条件熵 H(Y/X)按公式(4)、公式(5)计算:

$$H(X) = -\sum_{x} P(X_i) \log_2 P(X_i)$$
(4)  

$$H(Y|X) = \sum_{x} p_x H(Y|X = x)$$
  

$$= -\sum_{x} p(x, y) \log_2 [p(y|x)]$$
  

$$= \sum_{x,y} p(x, y) \log_2 \left(\frac{p(x)}{p(x, y)}\right)$$
(5)

其中p(x,y)为随机变量x取值为y的概率。

分析中利用计算所得分值及权重进行初次计 算,根据计算结果邀请专家基于经验与区内认识给 与评判,再结合专家评判意见优化分值与权重后二 次计算,对二次计算结果与专家经验与认识进行比 对,以此往复,最后得到优化后的分值与权重(表 3)。

结果显示,湖南省孕灾条件受影响程度大小 依次为岩土(体)坚硬程度(权重 0.30)、地形起伏 度指数(0.25)、暴雨强度指数(0.15)、岩土(体)完 整程度(0.10)、含水岩层富水性(0.07)、斜坡地质 灾害点密度(0.05)、人类工程活动敏感度指数

### 表 3 湖南省斜坡地质灾害危险性评价因子分级、分值及权重

#### Table 3 Classification, scores, and weights of evaluation factors for slope geological

#### hazard risk assessment in Hunan Province

因子类型	分级方法	分级	分值	权重			
		<0.03	2				
创地地传索宝占		[0.03, 0.06)	4				
斜坡地质火舌点 发育密度(起/km <sup>2</sup> )	自然断点法	[0.06, 0.11)	6	0.05			
		[0.11, 0.22)	8				
		≥0.22	10				
		<20	2				
		[20, 200)					
地形起伏度指数(m)	柴宗新(1983)方案	[200, 500)	6	0.25			
		[500, 1500)	8				
		≥1500	10				
		<8.55	8				
山平坦南比松		[8.55, 10.83]	10				
地形湿度指数	自然断点法	[10.83, 13.75)	4	0.03			
		[13.75, 17.98]	6				
		≥1/.98	2				
		<0.10	2				
岩土(体)完整程度	白板水口上小	[0.10, 0.22)	4	0.10			
(断裂线密度)(条/km <sup>2</sup> )	目然断点法	[0.22, 0.33)	6	0.10			
		[0.33, 0.47]	8				
		≥0.4/ 	10				
	工程地质条件分类	第四余忪取石矢石组(Ⅰ矢) 白亚云士近亥孙兴 孤兴笙叹研云兹叹研兴兴组(Ⅱ米)	2				
		口王王自见示伊石、砌石寺至陕王汉至陕石石组(II天) 白亚五十近系令(本)泥兕 五兕 泥五兕竿旋泥兕兕舶(V米)	4				
		口主主日廷赤首(天)化石、贝石、化八石寺状砌石石组(▼天) 泥分至件四系孙史 硭硷卦史笙収研至妨収研史史组(Ⅱ米)	10				
- ⇒+(休)		$ \overline{\mathcal{L}}_{\mathrm{LL}} = \overline{\mathcal{L}}_{\mathrm{LL}} + \overline{\mathcal{L}}_{\mathrm{LL}} + \overline{\mathcal{L}}_{\mathrm{LL}} = \overline{\mathcal{L}}_{\mathrm{LL}} + \overline{\mathcal{L}}_$	4				
见一个子 见何程度 <sup>①</sup>		表面上你多求百(人)死石、灰石、死风石守衣物石石垣(m天) 書白口至主図系碳酸卦尝収種至菘収種尝组(【米)	2	0.30			
王岐臣反		青白口至志留系板岩 砂岩 硅质岩等枢硬石至校区硬岩岩(Ⅱ类)	4				
		青白口至主的系令(本)泥岩、泥灰岩、呈灰岩石岩(工头)	4				
		云母板岩、炭质板岩(Ⅳ类)等软弱岩岩组	8				
		火成岩坚硬至较坚硬岩组(Ⅳ类)	8				
		水量贫乏的松散岩类孔隙水含水岩层(【类)	2				
		水量中等的松散岩类孔隙水含水岩层(1类)	2				
		水量贫乏的红层裂隙孔隙-裂隙水含水岩层(Ⅲ类)	6				
		水量中等的红层裂隙孔隙-裂隙水含水岩层(Ⅳ类)	8				
		水量贫乏的碳酸盐岩类岩溶水含水岩层(Ⅳ类)	8				
含水岩层富水性	岩层及富水性分类	水量中等的碳酸盐岩类岩溶水含水岩层(Ⅱ类)	4	0.07			
		水量丰富的碳酸盐岩类岩溶水含水岩层( I 类)	2				
		水量贫乏的基岩裂隙水含水岩层(Ⅲ类)	6				
		水量中等的基岩裂隙水含水岩层(Ⅳ类)	8				
		水量丰富的基岩裂隙水含水岩层(V类)	10				
	·	低(<0.26)	2				
暴雨	自然断点法	较低[0.26, 0.41)	4				
		中等[0.41, 0.53)	6	0.15			
归反旧奴		较高[0.53, 0.68)	8				
		高(≥0.68)	10				
		低(<0.22)	2				
丨米工珀江斗		较低[0.22, 0.40)	6				
八尖 上 柱 佰 功	自然断点法	中等[0.40, 0.58)	8	0.05			
敏感度指数		较高[0.58, 0.78)					
		高(≥0.78)	10				

<sup>10</sup>注:因子"岩土(体)坚硬程度"和"含水岩层富水性"的分类是依据其与2013—2022年历史斜坡地质灾害点空间位置的相关性而定.

(0.05)、地形湿度指数(0.03)。其中岩土(体)坚硬 程度、地形起伏度指数、暴雨强度指数对斜坡地 质灾害发育的贡献度突出,占比超一半,剩余5项 贡献度次之,表明湖南省孕灾条件主要受地质、地 貌和气象条件的综合影响。

#### 2.3 危险性评价结果

根据优化后的因子分值与权重计算全省斜坡 地质灾害危险性指数,采用四分法(危险性极高、 高、中、低)分类。利用 ArcGIS 自带的"几何间 断"分类法和解明礼等(2021)的"历史地质灾害累 计比例分段法"进行对比,结果是采用"几何间 断"分类法更符合全省情况(图 3),即危险性极高 区(危险指数≥7.21)、危险性高区(6.22≤危险指 数<7.21)、危险性中区(4.63≤危险指数<6.22)、 危险性低区(危险指数<4.63)。



图 3 湖南省斜坡地质灾害危险性评价结果分区 Fig. 3 Risk zoning of slope geohazard assessment results of Hunan Province

全省斜坡地质灾害危险性极高区主要位于湘 西雪峰山东段及其西段北侧、沅麻盆地、武陵山、 壶瓶山、天龙山-龙山地区,湘中南岳、紫云山及 株洲、湘潭部分地区,湘东北幕阜山、连云山、九 岭山地区,湘东南茶永盆地至郴州市区一线及万 洋山-诸广山西侧地区,合计占全省面积的14.73%; 上述地区以山地丘陵地貌为主,地形切割相对强 烈,地质构造发育,岩性以泥质板岩、浅变质砂 岩、泥岩、泥质粉砂岩、花岗岩等易崩易滑岩组为 主,短时强降雨天气较多。

危险性高区主要围绕危险性极高区周边及永 州阳明山、南岭山区、衡阳盆地、长平盆地、永州 与衡阳、邵阳交界区域及湘乡-宁乡一带,合计占 全省面积的 35.83%;上述地区以山地丘陵地貌为 主、地形切割较为强烈,地质构造发育,地层以泥 质板岩、浅变质砂岩、泥岩、泥质粉砂岩、花岗岩 等易崩易滑岩组居多,大部分区域降雨较为丰富。

危险性中区主要分布于娄邵盆地、永州盆地 等区域,合计占全省面积的 34.86%;上述地区以 中高丘陵地貌居多、地形切割较为强烈,地质构造 较为复杂,地层以碳酸盐岩、碳酸盐岩夹碎屑岩等 岩组居多,泥页岩、泥灰岩等软弱夹层或薄层状结 构较为发育。

危险性低区主要分布于洞庭湖平原及湘江下 游干流沿岸的长沙市、湘潭市的地势低平地带,合 计占全省面积的 14.58%;上述地区以低丘与平原 地貌为主,地势较为平坦。

# 3 结果验证分析

#### 3.1 与全省地质灾害防治已有认识的比较

湖南省地质灾害高易发区、中易发区、低易 发区占全省面积比 19.1%、26.1%、46.1%(湖南省 自然资源厅, 2021), 与本文的结果具有可对应性, 即高易发区对应危险性极高区、中易发区对应危 险性高区、低易发区对应危险性中、低区, 说明本 文采用上述方法进行危险性区划的结果较为合理。 3.2 与斜坡地质灾害点数据对照验证

将廖玉芳等(2011)统计的 1905—2008 年降 雨型地质灾害数据及李明波等(2018)统计的全 省 2013—2017 年 1:5 万地质灾害详查降雨型滑 坡数据叠加到本文得出的分区图(图 4)上进行验 证分析,可以看出所有已知地质灾害点大部分分 布于极高和高危险区。

将三种不同来源的地质灾害数据投影至本文 危险性分区图中,分别提取不同危险等级区内的



图 4 例附有地质火苦历史数据与厄应性方区(本义) 查加图
 Fig. 4 Overlay map of historical data and risk zoning (this study) of geological hazards in hunan province
 a 图中点的数据来自 1905—2008 年 2361 起降雨型地质灾害(廖玉芳等, 2011); b 图中点的数据来自
 2013—2017 年 5294 起降雨型滑坡(李明波等, 2018)

	表 4	湖南	省地	质	灾害	点数排	居与危	己险性	生分区对	照验证	
1 0	 						•				

Table 4 Comparative validation of geological hazard point data and hazard zonation in Hunan province

数据来源	危险性 分区	灾害点 数量(起)	灾害点数量 占比(%)	分区面积 (万km <sup>2</sup> )	灾害点密度 (起/100 km <sup>2</sup> )
	低	1 1 2 4	5.81	3.09	3.64
	中	5957	30.79	7.38	8.07
湖南省目然负源厅2013—2022年斜坡地质 家宝占日报数据 应刍调查数据(木文)	高	8077	41.75	7.59	10.64
大百点/Jik 妖庙、应志两直妖庙(个人)	极高	4189	21.65	3.12	13.43
	合计	19347	100	21.18	/
	低	139	5.89	3.09	0.45
	中	755	31.98	7.38	1.02
湖南省气象局(廖玉芳等,2011)统计的 1905—2008年降雨刑地质灾害数据	高	966	40.91	7.59	1.27
1705-2000平库南至地质人首数加	极高	501	21.22	3.12	1.61
	合计	2361	100	21.18	/
	低	347	6.55	3.09	1.12
	中	1 777	33.57	7.38	2.41
湖南省事务中心(李明波等,2018)统计的全省 2013 2017年1:5万地质灾害洋森降雨刑滑博数据	高	2179	41.16	7.59	2.87
2015—2017年1.5万地灰八百叶亘件附至用极数胎	极高	991	18.72	3.12	3.18
	合计	5 2 9 4	100	21.18	/

灾害点数量与占比、灾害点密度等数据进行对比 (表 4),可以得出:无论是哪一种数据,灾害点数 量占比比例基本一致,危险性低区灾害点数量占 比一般在 10%以下,危险性中区占比在 30% 左 右,危险性高区占比在 40% 左右,危险性极高区 占比在 20% 左右。同时,每 100 km<sup>2</sup> 灾害点密度 大小表现为危险性极高区>危险性高区>危险性中 区>危险性低区,不同数据源灾害点密度比值也较 为接近。

综上所述,不同地质灾害数据源在本文相同

等级危险性分区范围内的灾害点数量占比、灾害 点密度比值基本一致,说明本研究符合实际情况, 可以作为湖南省斜坡地质灾害气象风险预警分区 的参考基础。

# 4 结论

(1)本文选取了发育因子(斜坡地质灾害点发 育密度)、基础因子(地形起伏度指数、地形湿度 指数、岩土(体)完整程度、岩土(体)坚硬程度、含 水岩层富水性)、引发因子(暴雨强度指数、人类 工程活动敏感度指数)等三大类共 8 项指标,采 用 AHP-信息量法和专家经验对评价指标进行赋 权打分,并基于研究构建的斜坡地质灾害危险性 评价模型进行湖南省斜坡地质灾害危险性评价, 得出的危险性区划图经对比基本符合实际情况。

(2)湖南省地质灾害孕灾条件主要受区内地 质条件、地貌条件和气象条件的综合影响,具体表 现为所选因子中,岩土(体)坚硬程度、地形起伏度 指数、暴雨强度指数对斜坡地质灾害危险性评价 结果的贡献度突出。

(3)湖南省斜坡地质灾害危险性极高区主要 位于湘西雪峰山东段及其西段北侧、沅麻盆地、 武陵山、壶瓶山、天龙山-龙山地区,湘中南岳、紫 云山及株洲、湘潭部分地区,湘东北幕阜山、连云 山、九岭山地区,湘东南茶永盆地至郴州市区一线 及万洋山-诸广山西侧地区;危险性高区主要围绕 危险性极高区周边及永州阳明山、南岭山区、衡 阳盆地、长平盆地、永州与衡阳、邵阳交界区域及 湘乡-宁乡一带,上述区域在湖南省斜坡地质灾害 防治工作中建议重点关注。

#### 参考文献:

- 卜祥航. 2016. 基于不同降雨频率的地质灾害危险性评价 方法研究 [D]. 成都理工大学博士学位论文.
- 柴宗新. 1983. 按相对高度划分地貌基本形态的建议 [M]. 北京:科学出版社,90-97.
- 陈 宾,魏 娜,张联志,李颖懿,刘 宁,屈添强.2024.基于斜坡单 元灾害强度的滑坡易损性评价——以湖南省湘乡市 为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报,35(2):137-145.

- 陈 刚,程光军,彭双庆,张 伟,王丽萍.2024.一种基于地貌— 斜坡结构划分斜坡单元的区域滑坡易发性评价研究 [J]. 地质论评,70(S1):231-235.
- 封建民,杨 波,谢瑞莲,祝苓玉,王 艳.2021.陕西省略阳县地 质灾害危险性区划评估 [J]. 地理空间信息,19(2):78-82+120+7.
- 冯卫,唐亚明,马红娜,宿晓虹,陈新建.2021.基于层次分析 法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价 [J]. 西北 地质,54(2):282-288.
- 桂忠强,周阳,赵智强,张航泊.2018.洛南县地质灾害危险性 区划与评价 [J]. 地下水,40(2):87-89.
- 何寒舟,丁一.2024.赣南地区地质灾害风险区划分析研究 [J]. 华南地质,40(4):737-748.
- 湖南省自然资源厅. 2020. 湖南省 2020 年度地质灾害防治 方案 [R].
- 湖南省自然资源厅. 2021. 湖南省"十四五"地质灾害防治 规划 (2021-2025 年)[R].
- 蒋树,王义锋,刘科,潘洪月.2017. 滑坡灾害空间预测方法 研究综述 [J]. 人民长江, 48(21):67-73.
- 解明礼,巨能攀,赵建军,范强,何朝阳.2021.区域地质灾害 易发性分级方法对比分析研究 [J]. 武汉大学学报 (信 息科学版),46(7):1003-1014.
- 李崇博,张紫昭,张海东,宋玉,王拓,刘毅业.2024.基于斜坡 单元霍城北部山区地质灾害风险性评价 [J]. 新疆地 质,42(4):632-639.
- 李明波,陈平,陈植华.2018.湖南省降雨型滑坡灾害发生的 关键性因子研究 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学 版),41(1):36-40.
- 廖玉芳,张剑明,蔡荣辉,陈湘雅. 2011. 湖南主要气象灾害 [M]. 长沙:湖南大学出版社.
- 刘舫舟. 2012. 江西省地质灾害危险性综合分析与区划 [D]. 东华理工大学硕士学位论文.
- 马 敏,王江立,陈 琦,李景富.2024.基于随机森林赋权信息 量的区域滑坡易发性评价—以三峡库区秭归至巴东 段为例 [J]. 华南地质,40(4):749-763.
- 宋渊,江南,任达,张恩博. 2022. 基于加权信息量法的湖北 省兴山县地质灾害危险性评价与区划 [J]. 贵州地 质,39(3):272-279+299.
- 孙林,刘梦含,徐久成.2022.基于优化初始聚类中心和轮廓 系数的 K-means 聚类算法 [J]. 模糊系统与数 学,36(1):47-65.
- 王 磊,常鸣,邢月龙.2021.基于信息量法模型与 GIS 的滑坡 地质灾害风险性评价 [J]. 地质灾害与环境保

护,32(2):14-20.

- 吴家宝,陈红旗,向中林.2025.斜坡单元的划分方法优化与 适宜性评价指标 [J]. 自然灾害学报.34(1):127-136.
- 伍敏婷,孙岳,周子腾.2023.基于层次分析-信息量法的滑坡 易发性评价——以江西省浮梁县为例 [J]. 东华理工 大学学报 (自然科学版),46(2):157-166.
- 武 杨.2024.斜坡单元支持下赣西山区典型乡镇地质灾害 风险评价 [J]. 地理空间信息,22(10):117-120.
- 辛 鹏,吴树仁,石菊松,王 涛.2012.基于降雨响应的黄土丘 陵区滑坡危险性预测研究——以宝鸡市麟游县为例 [J]. 地球学报,33(3):349-359.
- 张 靖,段 富.2013.优化初始聚类中心的改进 k-means 算法 [J]. 计算机工程与设计,34(5):1691-1694+1699.
- 赵晓燕,谈树成,李永平.2021.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),43(2):299-305.

Dobbelaere M R, Plehiers P P, Van de Vijver R, Stevens C

V, Van Geem K M. 2021. Machine Learning in Chemical Engineering: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats[J]. Engineering, 7(9): 1201-1211.

- Sun X P, Zeng P, Li T B, Zhang T L, Feng X D, Jimenez R. 2021. Run-out distance exceedance probability evaluation and hazard zoning of an individual landslide[J]. Landslides, 18(4): 1295-1308.
- Xu C, Dai F C, Xu X W, Lee Y H. 2012. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China[J]. Geomorphology, 145-146: 70-80.
- Xu S H, Zhang M, Ma Y, Liu J P, Wang Y, Ma X R, Chen J. 2021. Multiclassification method of landslide risk assessment in consideration of disaster levels: a case study of Xianyang City, Shanxi Province[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(10): 646.