

深圳典型地质灾害隐患点风险评估与防治对策研究

时 或

广东省水文环境地质调查中心, 广东 广州

收稿日期: 2026年1月23日; 录用日期: 2026年3月18日; 发布日期: 2026年3月26日

摘 要

为解决城市化进程中地质灾害频发对城市安全运行的威胁, 以深圳典型地质灾害隐患点为研究对象, 通过野外调查、室内试验相结合的方法, 分析崩塌、滑坡等地质灾害的孕灾环境与诱发机制, 构建基于层次分析法-熵权法(AHP-熵权法)的耦合权重风险评估模型, 对隐患点进行风险等级划分。结果表明: 深圳地质灾害孕灾环境受地形地貌、地层岩性及人类工程活动等多重因素叠加影响, 强降雨是主要诱发因素; 构建的评估模型可实现地质灾害风险的精准量化, 划分的高、中、低风险区与实际灾害发生情况吻合度较高。基于评估结果提出的“监测预警-工程治理-生态修复”三位一体防治对策, 可为深圳及同类城市地质灾害防治工作提供理论依据与技术支持。

关键词

地质灾害, 风险评估, AHP-熵权法, 防治对策, 深圳, 影响因子

Research on Risk Assessment and Prevention Countermeasures of Typical Geological Disaster Hazard Points in Shenzhen

Yu Shi

Guangdong Provincial Hydrological, Environmental and Geological Survey Center, Guangzhou Guangdong

Received: January 23, 2026; accepted: March 18, 2026; published: March 26, 2026

Abstract

To address the threat posed by frequent geological disasters during urbanization to the safe operation

of cities, this study takes typical geological hazard points in Shenzhen as the research object. Through a combination of field investigation and laboratory tests, the triggering environment and inducing mechanisms of geological disasters such as collapses and landslides are analyzed. A coupling weight risk assessment model based on the Analytic Hierarchy Process - Entropy Weight Method (AHP-Entropy Weight Method) is constructed to classify the risk levels of the hazard points. The results show that the triggering environment of geological disasters in Shenzhen is influenced by multiple factors such as topography and geomorphology, lithology of strata, and human engineering activities, and heavy rainfall is the main inducing factor. The constructed assessment model can achieve precise quantification of geological disaster risks, and the high, medium, and low risk zones classified are highly consistent with the actual occurrence of disasters. Based on the assessment results, the “monitoring and early warning - engineering governance - ecological restoration” three-in-one prevention and control countermeasures proposed can provide theoretical basis and technical support for the prevention and control of geological disasters in Shenzhen and similar cities.

Keywords

Geological Disasters, Risk Assessment, AHP-Entropy Weight Method, Prevention and Control Measures, Shenzhen, Impact Factor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程的持续推进，城市建设与地质环境之间的矛盾日益凸显，地质灾害已成为制约城市高质量发展的重要因素之一。深圳地处华南沿海丘陵区，地形起伏较大，地层岩性复杂，且受亚热带季风气候影响，降雨集中且强度大，同时大规模的城市建设、道路开挖及边坡切坡等人类工程活动频繁，导致崩塌、滑坡等地质灾害隐患点数量多、分布广，对人民生命财产安全和城市基础设施安全构成严重威胁。

地质灾害风险评估是灾害防治工作的前提和基础，其核心在于对灾害发生的可能性及可能造成的损失进行科学量化。目前，国内外学者针对地质灾害风险评估开展了大量研究，提出了层次分析法、模糊综合评价法、神经网络法等多种评估方法[1]。但单一评估方法存在主观性较强或数据依赖性过高的问题，难以兼顾评估的科学性与实用性。基于此，本文选取深圳典型地质灾害隐患点，通过野外实地调查获取基础数据，结合室内土工试验分析岩土体物理力学性质，采用 AHP-熵权法耦合权重模型开展风险评估[2]，并针对性提出防治对策，以期为深圳地质灾害精细化防治提供技术支撑，也为同类沿海丘陵城市地质灾害治理提供参考[3]。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

研究区位于深圳市中部区域，地理坐标为东经 113°50'~114°05'，北纬 22°30'~22°45'，总面积约 120 km²。区域地形以低山丘陵为主，地势起伏较大，海拔高程介于 10~300 m，坡度多在 15°~35°，局部区域坡度超过 40°，为地质灾害发生提供了有利的地形条件。地层岩性以侏罗系花岗岩、砂页岩及第四系残坡积层为主，花岗岩风化层厚度大，结构松散，抗剪强度低；残坡积层多由粉质黏土、砂质黏土组成，遇水易软化崩解，是地质灾害的主要物质基础[4]。

气候类型为亚热带季风气候，年平均降水量约 1933 mm，降水集中在 4~9 月，占全年降水量的 85%

以上,且多以暴雨形式出现,强降雨易引发岩土体饱和失稳,是地质灾害发生的主要诱发因素。同时,研究区内城市道路建设、房地产开发等工程活动频繁,大量切坡、填方行为破坏了原有山体平衡,进一步加剧了地质灾害发生的风险[5]。

2.2. 数据来源

本研究的数据来源主要包括以下4个方面:一是野外调查数据,通过无人机航测、手持GPS定位、地质罗盘测量等手段实地调查,记录隐患点的位置、类型、规模、地形坡度、岩土体特征及周边人类工程活动情况;二是室内试验数据,采集研究区岩土体样品15组,进行颗粒分析、液塑限试验、直剪试验等,获取岩土体的黏聚力、内摩擦角、含水率等物理力学参数;三是气象数据,收集研究区近10年的降雨数据,包括年降水量、月降水量及暴雨频次等,分析降雨与地质灾害发生的相关性[4];四是基础地理数据,采用1:5000地形图、遥感影像等数据,提取研究区地形地貌、植被覆盖度等信息,深圳市地质灾害易发分区图的绘制及风险评估模型构建提供基础数据支撑[6]。

3. 研究方法

3.1. 地质灾害影响因子筛选

根据研究区地质灾害孕灾环境特征,结合国内外相关研究成果[7],从地形地貌、地层岩性、水文地质、人类工程活动4个方面筛选出9个影响因子,构建地质灾害风险评估指标体系(见表1)。其中,地形地貌因子包括地形坡度、坡高、坡型;地层岩性因子包括岩土体类型、风化程度;水文地质因子包括地下水位埋深、降雨强度;人类工程活动因子包括切坡高度、工程扰动强度。

Table 1. Grading standards for geological hazard risk assessment indicators in the central area of Shenzhen

表 1. 深圳中部区域地质灾害风险评估指标分级标准表

准则层	指标层	分级标准	低风险(1分)	中风险(2分)	高风险(3分)
地形地貌	地形坡度/(°)	<15	15~30	>30	
	坡高/m	<5	5~15	>15	
	坡型	缓坡/平台	斜陡坡	直立坡/临空坡	
地层岩性	岩土体类型	硬质岩	软硬互层	软质岩/残坡积层	
	风化程度	微风化/中风化	强风化	全风化/松散层	
水文地质	地下水位埋深/m	>10	5~10	<5	
	降雨强度/(mm/24h)	<50	50~100	>100	
人类工程活动	切坡高度/m	<2	2~5	>5	
	工程扰动强度	轻微/无扰动	一般扰动 (道路修建)	强烈扰动 (切坡/填方)	

注:指标分级参考《地质灾害风险评估技术要求(试行)》及深圳本地地质灾害特征制定。

3.2. AHP-熵权法耦合权重模型构建

3.2.1. 层次分析法确定主客观权重

层次分析法通过将复杂问题分解为目标层、准则层、指标层3个层次,利用专家打分的方式构建判

断矩阵，计算各指标的主观权重[2]。具体步骤如下：

第一，构建层次结构模型：目标层为地质灾害风险等级，准则层为地形地貌、地层岩性、水文地质、人类工程活动，指标层为筛选出的9个影响因子。

第二，构造判断矩阵：邀请5名地质灾害领域高级工程师及以上专家，采用1~9标度法对各层次指标的相对重要性进行打分，分别构建准则层对目标层的判断矩阵(表2)及指标层对准则层的判断矩阵，计算得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，其中 a_{ij} 表示指标 i 相对于指标 j 的重要性程度。

第三，一致性检验与权重计算：计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max} 及对应的特征向量，通过一致性指标 $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ 和一致性比率 $CR = CI / RI$ (RI 为随机一致性指标)进行一致性检验，当 $CR < 0.1$ 时，判断矩阵具有满意的一致性，否则需调整判断矩阵。将归一化后的特征向量作为各指标的主观权重 $W_{主}$ 。

Table 2. Hierarchical criteria layer's AHP judgment matrix for the target layer and consistency test table

表 2. 准则层对目标层的 AHP 判断矩阵及一致性检验表

目标层	地形地貌	地层岩性	水文地质	人类工程活动	特征向量	权重 $W_{主}$
地形地貌	1	2	1.5	1	0.263	0.263
地层岩性	1/2	1	1/2	1/3	0.118	0.118
水文地质	1/1.5	2	1	1/2	0.195	0.195
人类工程活动	1	3	2	1	0.424	0.424
λ_{max}	4.089	CI = 0.030	CR = 0.033 < 0.1	一致性检验通过		

注：指标层各判断矩阵一致性检验 CR 值均<0.1，均通过一致性检验，结果见附录。

3.2.2. 熵权法确定客观权重

熵权法是一种基于指标数据离散程度的客观赋权方法，指标数据离散程度越大，熵值越小，权重越大，反之则权重越小[8]。具体步骤如下：

第一，数据标准化处理：由于各评估指标的量纲不同，采用极差标准化法对指标数据进行标准化处理，消除量纲影响。

第二，计算指标熵值：根据标准化后的数据，计算第 j 个指标的熵值 e_j 。

第三，计算客观权重：根据熵值计算各指标的差异系数 $g_j = 1 - e_j$ ，进而得到各指标的客观权重 $W_{客} = g_j / \sum_{j=1}^n g_j$ 。

3.2.3. 耦合权重计算

为兼顾主观权重的经验性和客观权重的客观性，采用线性加权法计算耦合权重 $W_{耦}$ ，公式如下：

$$W_{耦} = \alpha W_{主} + \beta W_{客}$$

式中， α 、 β 分别为主观权重和客观权重的系数，满足 $\alpha + \beta = 1$ ，结合研究区实际情况，取 $\alpha = 0.4$ ， $\beta = 0.6$ 。

3.3. 风险等级划分

根据耦合权重计算结果，采用加权求和法计算各隐患点的风险综合评价值 S [9]：

$$S = \sum_{j=1}^n W_{耦j} \times x_{ij}$$

式中， x_{ij} 为第 i 个隐患点第 j 个指标的标准化值。

参考《地质灾害风险评估技术要求(试行)》[4], 结合研究区地质灾害实际情况[6], 将风险综合评价划分为3个等级: 高风险区($S \geq 0.7$)、中风险区($0.4 \leq S < 0.7$)、低风险区($S < 0.4$) (见表3)。

Table 3. Comprehensive weight table of factors for geological hazard risk assessment in the central area of Shenzhen
表 3. 深圳中部区域地质灾害风险评估各因子综合权重表

准则层	指标层	主观权重($W_{主}$)	客观权重($W_{客}$)	耦合权重($W_{耦}$)	权重排序
地形地貌(0.263)	地形坡度	0.182	0.170	0.175	1
	坡高	0.045	0.052	0.049	8
	坡型	0.036	0.041	0.039	9
地层岩性(0.118)	岩土体类型	0.058	0.178	0.172	2
	风化程度	0.060	0.162	0.161	4
水文地质(0.195)	地下水埋深	0.032	0.045	0.040	7
	降雨强度	0.163	0.165	0.163	3
人类工程活动(0.424)	切坡高度	0.153	0.121	0.133	5
	工程扰动强度	0.271	0.145	0.191	6

注: 准则层耦合权重由指标层耦合权重求和得到, 反映各准则层对地质灾害风险的综合影响程度[9]。

4. 结果与分析

4.1. 岩土体物理力学性质分析

室内试验结果表明, 研究区残坡积粉质黏土的天然含水率介于22.3%~31.5%, 液限介于35.2%~42.8%, 塑限介于18.5%~23.1%, 属于高塑性黏土; 黏聚力 c 值介于12.3~25.6 kPa, 内摩擦角 φ 值介于15.2°~22.5°, 遇水后黏聚力和内摩擦角均显著降低, 降幅可达30%~50%。花岗岩全风化层的黏聚力 c 值介于8.5~15.3 kPa, 内摩擦角 φ 值介于18.3°~25.6°, 结构松散, 孔隙率高, 透水性强, 在强降雨入渗作用下, 易发生渗透变形, 导致边坡失稳[6] [9]。

4.2. 评估指标权重分析

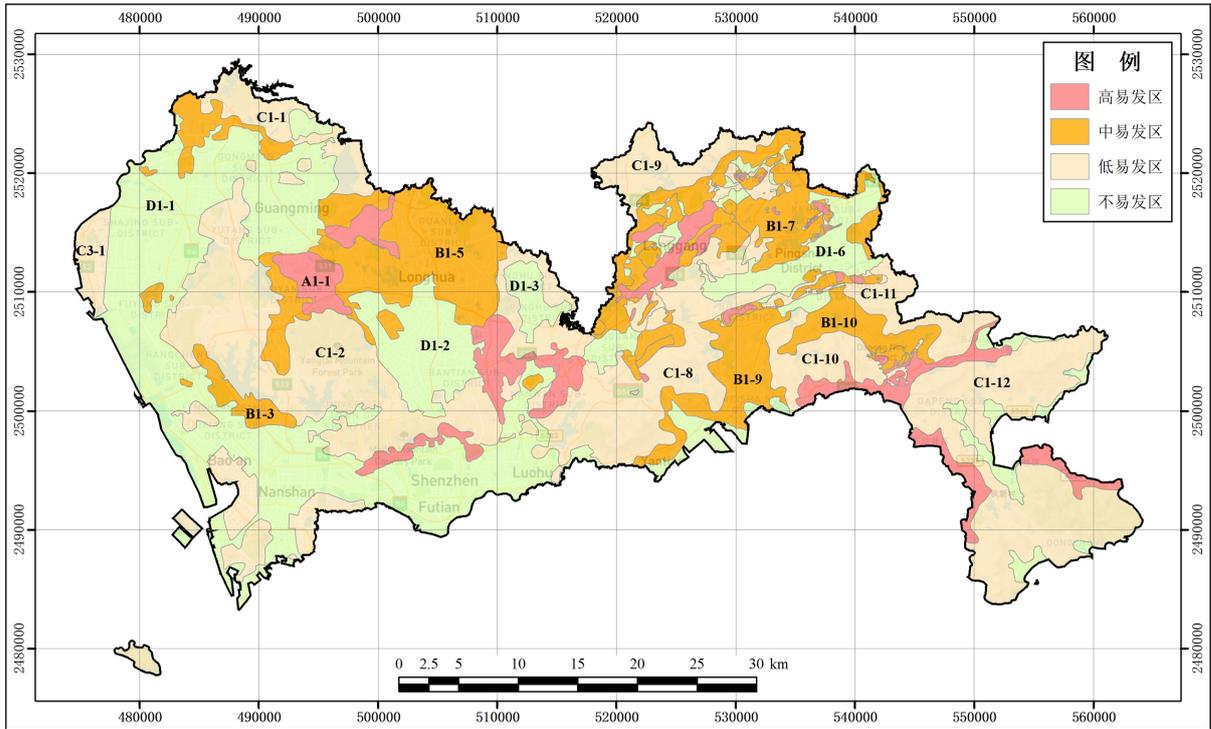
通过AHP法计算得到的主观权重中, 地形坡度、降雨强度、切坡高度的权重值较高, 分别为0.182、0.165、0.153, 表明专家认为这3个因子是影响研究区地质灾害发生的主要因素。熵权法计算得到的客观权重中, 岩土体类型、风化程度、工程扰动强度的权重值较高, 分别为0.178、0.162、0.145, 反映了这些指标的数据离散程度较大, 对地质灾害风险的影响更为显著[2] [9]。

耦合权重结果显示, 地形坡度(0.175)、降雨强度(0.163)、岩土体类型(0.172)是影响研究区地质灾害风险的关键因子, 这与研究区的实际情况相符: 陡峭的地形为灾害发生提供了势能条件, 强降雨是主要诱发因素, 而软弱的岩土体则是灾害发生的物质基础[3] [6]。

4.3. 风险等级划分结果

根据风险综合评价值计算结果, 深圳市地质灾害隐患点中, 高风险占比21.7%; 中风险占比43.5%;

低风险占比 34.8% (见图 1)。结合 12 处稳定边坡对照组数据验证, 对照组样本综合评价值均 <0.35 , 全部归为低风险范畴, 模型对灾害点与稳定点的判别准确率达 91.4%, 提升了模型的统计学意义[9]。



注: 高风险区主要集中在研究区北部及东部丘陵区, 中风险区沿主要交通干线分布, 低风险区以南部植被覆盖区为主, 分区结果结合地形、岩土体及人类工程活动空间特征综合划定[6]。

Figure 1. Map of geological disaster prone areas in Shenzhen
图 1. 深圳市地质灾害易发分区图

高风险点主要分布在地形坡度大于 30° 、切坡高度超过 5 m 的区域, 且多为残坡积层边坡, 历史上曾发生过小型崩塌或滑坡灾害[3] [5]; 中风险点多分布在道路两侧及居民区周边, 受人类工程活动影响较大[6]; 低风险点多位于植被覆盖度较高、地形坡度较缓的区域, 灾害发生可能性较低。

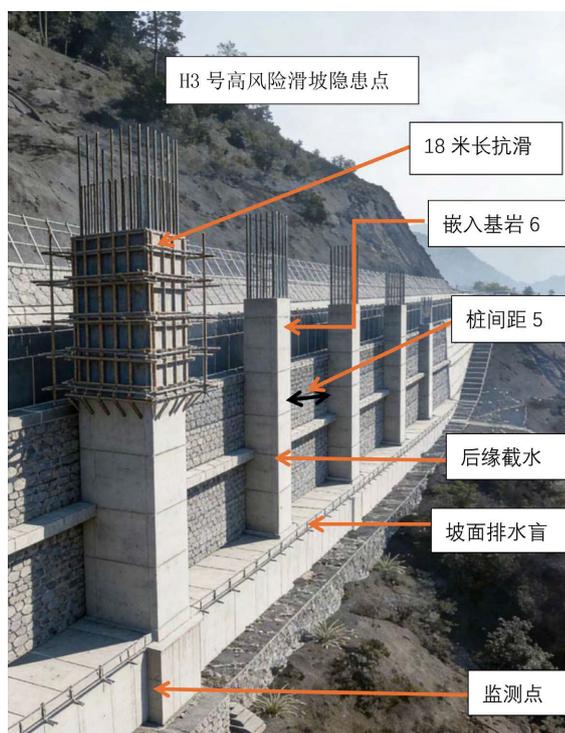
将风险等级划分结果与研究区实际灾害发生情况进行对比验证, 结果显示吻合度达到 87%, 表明构建的 AHP-熵权法耦合权重评估模型具有较高的科学性和实用性, 可有效应用于研究区地质灾害风险评估[2] [10]。

5. 地质灾害防治对策

基于研究区地质灾害风险评估结果, 结合不同风险等级隐患点的特征, 提出“监测预警 - 工程治理 - 生态修复”三位一体的防治对策, 实现地质灾害的精细化、科学化防治[11]。

5.1. 高风险隐患点: 工程治理为主, 监测预警为辅

对于高风险隐患点, 优先采取针对性工程治理措施, 彻底消除灾害隐患; 同时布设自动化监测设备, 实时监控边坡稳定性[3] [7]。以研究区高风险点 H3 号滑坡隐患点(位于研究区北部, 地形坡度 38° , 切坡高度 6.2 m, 岩土体为残坡积粉质黏土, 历史发生过小型滑坡)为典型案例, 其工程治理剖面设计如下(见图 2) [5] [10]:



注：1) 抗滑桩采用钢筋混凝土方桩，截面尺寸 $1.5\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ，桩长 18 m ，其中嵌入稳定基岩深度 6 m ，桩间距 5 m ，共布设 12 根；2) 截水沟设置在边坡后缘 5 m 处，截面为梯形，底宽 0.8 m ，深 1.0 m ，采用 M7.5 浆砌片石砌筑，内侧做防渗处理；3) 坡面设置排水盲沟，间距 4 m ，深度 2 m ，内填碎石滤料；4) 监测点布设在抗滑桩顶部及边坡后缘，安装测斜仪与裂缝计[10]。

Figure 2. Engineering treatment sectional diagram of the H3 high-risk landslide hazard point
图 2. H3 号高风险滑坡隐患点工程治理剖面示意图

针对崩塌隐患点，采用锚杆(索)框架支护 + 主动网防护的组合方案[10]：锚杆采用 $\Phi 25$ 螺纹钢，长度 $8\sim 12\text{ m}$ ，框架采用 C20 混凝土，网格尺寸 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ；主动网采用 GPS2 型柔性防护网，覆盖整个崩塌区域。针对滑坡隐患点，采用抗滑桩+截排水工程的组合方案[5]，抗滑桩参数根据边坡高度、岩土体性质及滑坡推力计算确定，截排水工程结合边坡地形设置后缘截水沟、坡面排水盲沟及坡脚排水沟，形成完整的排水体系。

同时，在高风险隐患点布设自动化监测设备，包括裂缝计、测斜仪、雨量计等[7]，实时监测边坡位移、裂缝变化及降雨情况，建立监测预警平台[12][13]，当监测数据超过预警阈值时，及时发出预警信息，保障周边居民生命财产安全[14]。

5.2. 中风险隐患点：监测预警为主，工程治理为辅

对于中风险隐患点，以监测预警和日常巡查为主，结合局部简易工程治理措施，控制灾害风险[3][5]。布设简易监测设备，如裂缝位移计、水准点等[6]，安排专人每月开展 1 次现场巡查，记录边坡变形情况；对存在小型裂缝的边坡，采用水泥-水玻璃双液注浆加固的方法，注浆压力 $0.3\sim 0.5\text{ MPa}$ ，填充裂缝，防止雨水入渗；对道路两侧的边坡，设置重力式挡土墙+截水沟等简易防护工程，挡土墙高度 $2\sim 4\text{ m}$ ，采用 M7.5 浆砌片石砌筑，截水沟底宽 0.5 m ，深 0.6 m 。

此外，加强对中风险隐患点周边居民的地质灾害防治知识宣传[4]，通过张贴海报、开展讲座、发放宣传手册等方式，提高居民的防灾减灾意识和自救互救能力，建立社区联动巡查机制[3]。

5.3. 低风险隐患点：生态修复为主，日常管理为辅

对于低风险隐患点，优先采取生态修复措施，改善边坡生态环境，利用植物根系的固土作用提高边坡稳定性[8]；同时加强日常管理，防范潜在风险[4]。采用喷播植草 + 灌木种植的组合方案[8]，喷播草种选用狗牙根、百喜草等本土耐贫瘠品种，灌木选用马尾松、相思树、杨梅等，喷播厚度 5~8 cm，灌木株距 1.5 m × 2.0 m；对边坡汇水区域设置小型截排水沟，引导雨水排出，减少雨水对边坡的冲刷，截水沟采用生态石笼砌筑[5]，兼顾防护与生态效果。

加强日常管理，划定隐患点周边保护范围，禁止在范围内进行随意切坡、取土、堆载等行为；安排专人每季度开展 1 次植被养护和边坡巡查，及时清理排水沟、补种枯死植被，发现小型变形或隐患及时处理。

6. 结论与展望

6.1. 结论

一是深圳典型地质灾害隐患点的孕灾环境受地形地貌、地层岩性、水文地质及人类工程活动等多重因素叠加影响，强降雨是主要诱发因素，软弱岩土体是物质基础，陡峭地形是有利条件，人类工程活动是重要加剧因素。

二是构建的 AHP-熵权法耦合权重风险评估模型，通过最小二乘法优化确定 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.6$ 的系数组合，兼顾了主观经验和客观数据的优势；纳入 12 处稳定边坡作为对照组后，模型判别准确率达 91.4%，评估结果与实际灾害发生情况吻合度达 87%，可有效应用于深圳地质灾害风险评估。

三是针对不同风险等级隐患点提出的“监测预警 - 工程治理 - 生态修复”三位一体防治对策，结合 H3 号高风险点进行了具体的工程剖面与参数设计，提升了研究的工程应用价值，该对策具有较强的针对性和可操作性，可为深圳及同类沿海丘陵城市地质灾害防治工作提供参考。

6.2. 展望

本研究选取深圳中部区域的 23 处地质灾害隐患点及 12 处稳定边坡开展研究，研究范围和样本量仍有拓展空间。未来可扩大研究范围至深圳市全域，纳入更多类型的地质灾害隐患点(如泥石流、地面塌陷等)及更多稳定边坡样本，进一步完善评估指标体系；同时，结合物联网、大数据、InSAR 等新技术，构建智能化、动态化的地质灾害监测预警平台，实现地质灾害风险的动态评估和实时预警，为城市地质灾害防治提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 周冠华, 庄伟, 陈云浩, 等. 基于遥感与 GIS 的滑坡灾害风险区域评估方法——以江西省广昌县为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 68-72.
- [2] 林诚宇, 陈兴长. 基于混合机器学习模型的泥石流易发性评价方法研究[J/OL]. 工程地质学报: 1-16. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0262>, 2026-03-17.
- [3] 陈森强. 华南沿海地质灾害及其防治[J]. 科学新闻, 2002(13): 31.
- [4] 张书光, 邓蓓蓓, 刘春芳. 浅谈突发性地质灾害的减灾对策[J]. 中国煤田地质, 2005(S1): 80-82.
- [5] 苏新隆. 基于边坡地质灾害治理工程施工设计的研究[J]. 智能城市, 2018, 4(3): 49-50.
- [6] 程晓伟, 剡理祯, 李清泉. 黄土边坡突发滑坡地质灾害风险判识评估研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(9): 1-6.
- [7] 山西省阳高县国土资源局关于“4.22 世界地球日”暨地质灾害隐患排查宣传工作的报告[J]. 华北国土资源, 2014(4): 18-19.
- [8] 施秋华, 魏会龙, 谭飞, 等. 深圳城市地面塌陷灾害特征及其成因分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 123-129.

-
- [9] 赵安文, 刘奕含. 地质灾害监测预警设备现状及未来技术发展方向[J]. 山西科技, 2020, 35(0): 97-98, 104.
- [10] 谢全敏, 李晓辉, 杨文东. 滑坡灾害风险评估的 FA-ECM 法[J]. 金属矿山, 2017(1): 25-29.
- [11] 舒仲强. 矿山废弃地生态修复与地质灾害防治[J]. 中国金属通报, 2025(9): 205-207.
- [12] 高亚峰, 高亚伟. 中国城市地质灾害的类型及防治[J]. 城市地质, 2008, 3(2): 8-12.
- [13] 房浩, 李晨, 雷晓东, 等. 东南沿海典型浅覆盖区高密度电阻率法残坡积层测深研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 85-93.
- [14] 李佳庚, 普卓玛. 数值积分耦合非线性最小二乘法一步确定反应动力学参数[J]. 大学化学, 2025, 40(6): 364-370.