



引用格式: 黄厚赞, 陈凌伟, 刘伟, 等. 基于孤石全生命周期的危险性评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7247-7256.

Huang Houzan, Chen Lingwei, Liu Wei, et al. Risk assessment based on the full life cycle of boulders[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7247-7256.

# 基于孤石全生命周期的危险性评价

黄厚赞<sup>1,2</sup>, 陈凌伟<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 张庆华<sup>1,2</sup>, 刘羊<sup>1,2</sup>

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060; 2. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室, 广州 510060)

**摘要** 近年来,孤石滚落灾害越发受到关注,而对其危险性定量评价的相关研究较少。一方面,孤石具有数量多、规模大、形状不一的特点,对孤石群的稳定性判定是一个问题;另一方面,对孤石影响区域的风险性评价是难点。因此以广州市白云山原始森林公园为研究对象,对此区域开展孤石危险性评价。通过孤石稳定性定性定量综合判断+失稳孤石威胁范围精准划分的方法,考虑多评价因子对研究区危险性进行综合评价。利用熵权法计算各评价因子的权重,基于高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)、地理信息系统(geographic information system, GIS)软件和岩石崩落分析(rockfall analysis, RA)软件对研究区危险性等级进行划分,将白云山原始森林公园滚石危险范围划分为4个等级:极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区。研究成果提出了一套可为其他区域孤石滚落灾害危险区划参考的系统性评价方法。

**关键词** 孤石; 稳定性; 危险性评价; 定量评价; RA 软件

**中图分类号** P694; **文献标志码** A

## Risk Assessment Based on the Full Life Cycle of Boulders

HUANG Hou-zan<sup>1,2</sup>, CHEN Ling-wei<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-hua<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China;

2. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China)

**[Abstract]** In recent years, the rockfall disaster has received more and more attention, while there are few related studies on the quantitative evaluation of its risk. On the one hand, solitary stones have the characteristics of large quantity, large scale and different shapes, and the determination of the stability of solitary stone groups is a problem. On the other hand, it is difficult to assess the risk of areas affected by boulders. Therefore, taking Baiyun Mountain Primitive Forest Park in Guangzhou as the research object, the risk assessment of boulders in this area was carried out. The risk of the study area was comprehensively evaluated by considering multiple evaluation factors through qualitative and quantitative comprehensive judgment of boulder stability and precise division of the threat range of unstable boulders. The weight of each evaluation factor was calculated using the entropy weight method. Based on the high-precision digital elevation model (DEM), geographic information system (GIS) software, and rockfall analysis (RA) software, the risk level of the study area was divided into four levels: extremely high risk area, high risk area Medium and low hazard areas. The research results propose a systematic evaluation method that can be used as a reference for the risk zoning of boulder rolling hazards in other regions.

**[Keywords]** boulders; stability; hazard assessment; quantitative assessment; RA software

孤石是花岗岩地区中常见的风化产物,是受矿物成分的各向异性排列及裂隙的随机分布影响形成的风化不均的残留体。孤石与岩质崩塌均属于危岩体的一种,两者为并列关系。与崩塌最大不同在于孤石运动能力极强,一旦失稳,经过滚(滑)动、回弹和跳跃等复杂非线性的运动方式向坡底快速冲击时,具有轨迹复杂、冲击能量大、行程远等特点<sup>[1-2]</sup>。若滚石运动轨迹上存在人类工程设施,极

可能产生灾情。因此,研究孤石(群)滚落灾害的危险性评价具有重要的意义。

随着第一次全国自然灾害综合风险普查工作的大力推进,对地质灾害危险性评价的研究也开展得如火如荼<sup>[3-6]</sup>。常见的自然灾害如崩塌、滑坡和泥石流的风险性评价体系已日渐成熟<sup>[7-9]</sup>,《地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)》等国家及省市级规范也给出了相关要求及指引。但是关于孤

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2023-03-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B0101130009); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金(RDI2220204031, RDI2220204125)

第一作者: 黄厚赞(1996—),男,汉族,安徽明光人,硕士,助理工程师。研究方向: 岩土体稳定性与工程环境效应。E-mail: huanghouzan@foxmail.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

石滚落灾害评价的相关研究和规范甚少,现有研究多局限于对孤石运动过程及能量特征的探索<sup>[10-12]</sup>,抑或是定性的分析孤石稳定性和危险性<sup>[13]</sup>,缺少对孤石群稳定性的定量分析以及三维空间下的运动特征描述以及危险性评价。只有先确定孤石的稳定性,才能有针对性地对不稳定孤石的运动特征和威胁范围进行研究。以易发性评价结果对位于高易发区孤石进行影响范围计算是不严谨的。由于孤石滚落发生具有不确定性,落石在二维空间下的运动特征和危险评价的研究都具有一定的局限性,三维空间下的落石运动特征更加符合实际情况<sup>[14]</sup>。在危险区划分方面常用的方法是理论公式法<sup>[15]</sup>和数值模拟法<sup>[16-17]</sup>,理论公式法虽方便快捷,但误差较大,且不能对危险范围进行分级;数值模拟中构建的三维模型多数精度较低,而滚石运动轨迹对坡向、坡型、坡度和坡表覆盖层等微地貌变化极其敏感。其次,孤石运动过程中能量、分布概率和弹跳高度等是常用的危险性分区指标,在模拟中却常被忽略。

现以广州市白云山原始森林公园为例对孤石滚落危险性进行研究。基于无人机航拍技术获取了研究区的遥感影像和高精度地形,结合力学分析,通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定稳定性快速评价方法,以此判断研究区孤石稳定性。继而利用岩石崩落分析(rockfall analysis, RA)软件,以熵权法确定滚石的能量、频率和弹跳高度3个评价因子的权重,进行孤石危险区划分。以期为其他孤石滚落灾害危险性评价提供参考。

## 1 研究区概况

研究区位于白云山原始森林中北部,属低山丘陵地貌。区内最低点高程约47 m,坡顶高程约237 m。总体坡度 $40^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ,地形起伏变化较大,上陡下缓,坡体前缘为居民区。植被覆盖率高,斜坡中上部植被较为发育,下部植被相对稀疏。基岩岩性主要为中细粒斑状黑云母二长花岗岩,上覆土层多为花岗岩残积土,土层厚度较浅。调查范围以靠近山体一侧用地红线为边界相互连接,向山顶合并成片区,面积约0.78 km<sup>2</sup>。坡面孤石发育,孤石共发现并调查489块,总计方量约6 653.81 m<sup>3</sup>。孤石分布点多面广,平面分布情况如图1所示。

通过野外调查发现孤石特征有:①外观形态上多为椭球状、块状,埋深浅,在野外较易估算其方量;②完整性较好,节理裂隙不发育,属中-微风化;③基座多为花岗岩残积土,有一定程度冲刷,力学

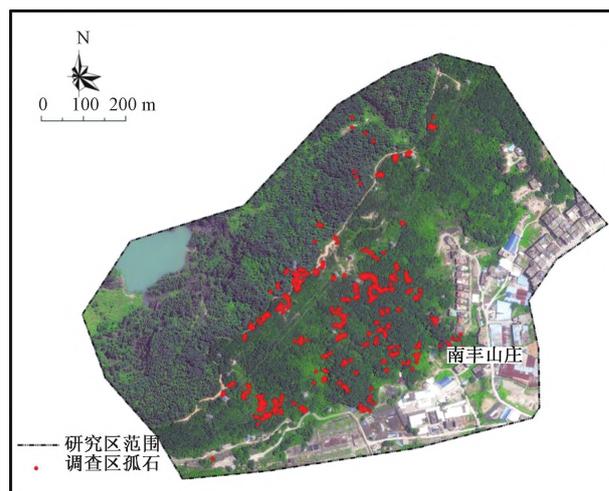


图1 孤石整体分布情况

Fig. 1 The overall distribution of boulders

性质不均;④孤石多处于基本稳定状态,可能失稳模式多为倾倒-滚落式。

## 2 孤石稳定性分析

依据相关规范标准对崩塌地质灾害隐患点的发育程度、稳定性判别的分级标准,结合孤石类危岩体、崩塌失稳特征,采用定性分析与定量计算相结合的稳定性综合评价方法。以现场定性评价法,即工程类比、地质分析法为主,定量评价法,即理论计算、数值计算为辅综合开展孤石稳定性评价。

### 2.1 野外定性评价

地质灾害由内因与外因共同控制,外因指的是工程环境条件,内因指孤石自身条件。震动和降雨是诱发因素,在实际工程中多将其作为稳定性的预测变量。在天然工况孤石稳定性评价结果上,震动和降雨按照最危险工况进行评价<sup>[18]</sup>。根据孤石(群)的特点和上述影响孤石稳定性因素,结合《广东省地质灾害特征认定和分级标准》,综合判定孤石的稳定性,并参照相关技术单位的划分依据,将孤石按照稳定性分级标准划分,结果如表1所示。

### 2.2 基于AHP的稳定性快速评价方法

孤石稳定性快速评价体系研究思路为:孤石特征详细调查→快速评价指标选取→评价指标赋值→快速评价体系建立→稳定性定量快速评价。

孤石稳定性受自身条件和环境因素共同影响。环境因素包括斜坡条件,植被覆盖情况及斜坡表面物质组成;孤石自身条件主要包括孤石尺寸、形状、出露形态、埋深、裂隙发育程度等。根据孤石赋存的工程地质条件,指标选取主要是根据野外地质调查情况,并根据专家意见选取了8个对孤石稳定性起重要作用的影响因子。采用层次分析法(AHP)

构建判断矩阵,由半定量专家打分,对8个因子建立了4级取值标准,分别计算权重 $k(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8) = (20, 12, 10, 8, 14, 8, 18, 10)$ ,计算结果满足一致性检验要求。稳定性快速评价指标量化取值是根据各指标对孤石稳定性的影响程度以及对野外定性评价结果的考量所赋予相应的数值,最终建立表2所示的评价指标取值标准。

2.2.1 孤石不稳定指数的计算

各评价指标的权重按照表2取值,通过定性分析确定评价指标的单因素分级指数。在此基础上,根据式(1)和各指标相互作用关系矩阵,即可计算出表征孤石稳定性的不稳定指数。

$$BII = \sum_{i=1}^n \lambda_i k_i F_i \tag{1}$$

式(1)中: $F_i$ 为第*i*个指标单因素分值; $k_i$ 为指标权重; $\lambda_i$ 为降雨和地震修正系数。孤石不稳定指数(boulder instability index, BII)是综合多个评价因子累加指标权得到的用于评价单体孤石稳定性的一个无量纲数值。

$\lambda_i$ 取“1”代表天然状态,此时降雨和地震对孤石稳定性不产生影响;降雨和地震主要通过基座变形影响孤石稳定性。因此,对基座变形程度的修正系数 $\lambda_7$ 可按表3确定(修正系数通过对广州

其他几个行政区孤石稳定性综合评判得到),其余修正系数取1,求得降雨和地震条件下的孤石不稳定指数。

2.2.2 孤石(群)稳定程度分级

分级界限值依据其他几个项目的经验进行取值,已在广州市白云区其他地块得到验证。根据计算得到的BII,与表4对比可以定量地确定出该区域每一块孤石的稳定性,便可有针对性地采取合适的治理措施,避免过度治理或遗漏未治。

2.2.3 现场快速评价结果

根据孤石野外定性判断结果结合孤石稳定性快速评价方法,在天然、暴雨和地震工况下的稳定性统计情况见表5。

2.3 基于解析法和数值法的定量计算

选取具有普遍性和代表性,以及稳定性需进一步确定的孤石开展深入研究,采用定性计算与数值模拟相结合的方法。分别选取滚落式和滑移式两种破坏模式下的孤石,为BGC03-4和BGF25-3(图2)。BGC03-4孤石等效尺寸为2.3 m × 1.0 m × 1.0 m,所处在陡坎处,地形坡度较陡;植被稀少,基本无埋深;BGF25-3孤石等效尺寸为2.1 m × 0.9 m × 1.2 m,所处地形较陡,坡表无植被,基座及周边岩土体有冲刷迹象。

表1 孤石稳定性分级标准

Table 1 Boulder stability classification standard

分级	稳定	较稳定	不稳定
主要特征	①所处地形为平台或缓坡;②汇水面积小,排水条件好,强降雨时雨水入渗较少,植被茂盛;③基座土体密实、均匀、干燥,岩层单一、无软弱结构面;④孤石直接坐落于基岩之上,且基岩面平缓,埋深大,基座受雨水冲刷程度小;⑤孤石微风化、完整性好,节理裂隙不发育;⑥孤石周边岩土体无变形破坏迹象	①所处地形为缓坡;②汇水面积较大,排水条件比较通畅,强降雨时雨水较易渗入,植被较茂盛;③土体结构较松散、土质不均匀、透水性较好;④孤石与基岩(母岩)之间有填充物,埋藏较浅;基座受雨水冲刷淘蚀迹象明显;⑤孤石风化程度较高、完整程度较差,节理裂隙较发育;⑥孤石及周边岩土体局部有变形破坏迹象	①所处地形为陡坡或陡崖;②汇水面积大,排水不畅通,强降雨时雨水大量入渗,植被稀少;③土体结构松散、透水性好;④孤石与基岩(母岩)的胶结差,埋藏浅,部分悬空,基座受雨水冲刷或淘蚀严重,可见明显的冲沟或空腔;⑤孤石风化程度严重、完整性差,节理裂隙发育;⑥孤石及周边岩土体有明显变形破坏迹象,且进一步变形的趋势明显

表2 孤石(群)评价指标取值标准

Table 2 Evaluation criteria of boulders (group)

影响因素	评判分值 $F_i$				权重 $k_i$	
	1	0.75	0.5	0.25		
自身条件	孤石埋深	无埋深	浅埋	深埋	全埋	20.00
	孤石形状	球体	椭球体	块体	片状	12.00
	尺寸大小	大型	中型	小型	微型	10.00
	结构类型	破裂散体	层状	块裂	整体块状	8.00
环境因素	地形坡度	>45°	30°~45°	15°~30°	<15°	14.00
	植被发育	裸露	稀少	较茂盛	茂盛	8.00
	基座变形	裂缝、掏空	淘蚀	冲刷	无变形	18.00
	基座岩土体	残积土	全风化	强风化	中微风化	10.00
诱因	降雨	$\lambda_1 = 1.2$				
	地震	$\lambda_2 = 1.6$				

注: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为降雨和地震修正系数。

表3 降雨和地震条件下评价指标修正系数

Table 3 Correction coefficients of evaluation indexes under rainfall and vibration conditions

评价指标	$\lambda_i$	评价指标基本状况
基座变形程度( $F_7$ )	1	天然
	1.2	降雨
	1.6	震动

表4 孤石(群)稳定性分级

Table 4 Stability classification of lone stones (group)

孤石不稳定指数 BII	稳定性程度	评价指标基本状况
<60	稳定	III
60~68	欠稳定	II
>68	不稳定	I

表5 孤石稳定性统计表

Table 5 Statistical table of boulder stability

序号	天然		暴雨		地震	
	稳定性程度	数量/个	稳定性程度	数量/个	稳定性程度	数量/个
1	稳定	139	稳定	118	稳定	67
2	欠稳定	59	欠稳定	76	欠稳定	97
3	不稳定	6	不稳定	10	不稳定	40



(a) BGC03-4 倾倒-滚落式



(b) BGF25-3 牵引-滑移式

图2 两种不同失稳模式下的孤石

Fig. 2 Boulders under two different instability modes

## 2.3.1 静力解析法

根据现场调查情况,对孤石的结构类型、埋藏

深度、基座岩土体性质及变形特征综合分析来确定孤石潜在的失稳模式。针对不同失稳模式采用不同的理论计算公式。

## 1) 倾倒-滚落

孤石可分为原地风化的基岩或后期经外动力作用搬运至此的孤石两类。部分或全部出露于残坡积物中,坡度一般较陡,在 $30^\circ \sim 60^\circ$ ,呈椭球体-球体,磨圆较好。岩体受雨水侵蚀强烈、汇水面积较大,植被稀少,岩体基座及周围岩土体受水流冲刷淘蚀较明显,局部有变形的现象,在极端天气等不利条件下有失稳的可能。其稳定性计算方法参照倾倒式危岩体的计算方法,示意图如图3所示。

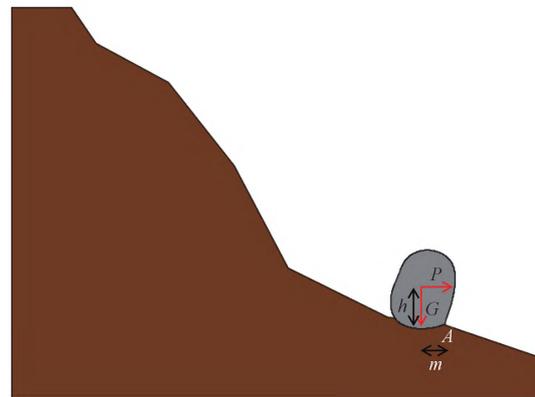


图3 倾倒-滚落失稳破坏稳定性计算图

Fig. 3 Calculation diagram of topping-rolling instability failure stability

$$F = \frac{Gm}{Ph} \quad (2)$$

式(2)中: $G$ 为孤石的重量,kN; $m$ 为转点 $A$ 至重力延长线的垂直距离, $m$ ; $P$ 为孤石承受的水平地震力,kN; $h$ 为转点 $A$ 至水平地震力延长线的垂直距离, $m$ 。

## 2) 牵引-滑移

牵引-滑移失稳破坏,位于坡表的孤石,在重力和水平地震力作用下,沿坡表滑移失稳,主要发育在冲沟或坡表覆盖层上,整体呈块状-椭球状,岩体基座周围土体多被雨水强烈冲刷侵蚀,岩体与岩体间沿冲沟成片分布,一旦下部岩块受外力作用失稳,上部岩体与覆盖层间摩擦力小于岩体下滑力,岩体整体受下部基座影响而失稳滑动。其稳定性计算可参照滑移式危岩体计算方法,示意图如图4所示。

$$F = \frac{(G \cos \alpha - P \sin \alpha) \tan \varphi + \frac{ch}{\sin \alpha}}{G \sin \alpha + P \cos \alpha} \quad (3)$$

式(3)中: $h$ 为孤石高度, $m$ ; $\alpha$ 为孤石所处坡度, $(^\circ)$ ; $c$ 为孤石与坡表接触面的黏聚力,kPa; $\varphi$ 为孤

石与坡表接触面的摩擦角,(\$^\circ\$)。

在计算前,首先要获得准确的岩土体参数,通过室内试验测定孤石物理力学参数,然后根据现场类比法以及反演分析法,结合《工程地质手册》《水文地质手册》等资料,对边坡及孤石的岩体力学参数进行优化,综合确定岩土体物理力学参数见表6。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),广州市白云区的抗震设防烈度均为7度,地震动峰值加速度取值为0.10g(g为重力加速度),综合水平地震系数 $\alpha_w$ 按《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)5.2.6节取值为0.025。孤石稳定性评价标准参考崩塌防治工程勘察规范并根据研究区孤石所处工程地质条件划分,如表7所示。

根据孤石的形状及基座状况,结合其埋深情况判断孤石可能的失稳模式,选择合适的计算模型计算其稳定系数,最后根据表7判断孤石的稳定性。计算结果见表8。

通过计算结果可知,在暴雨工况下孤石BGC03-4和BGF25-3均处于不稳定状态,与定性和快速评价方法一致。

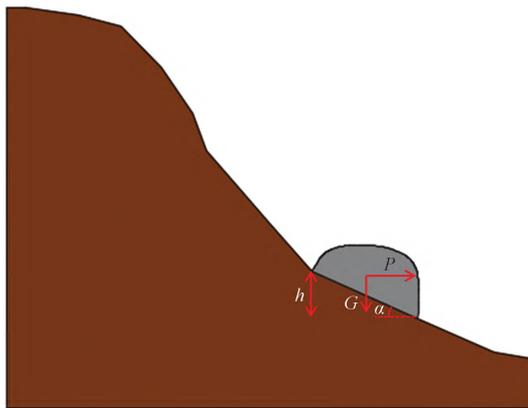


图4 牵引-滑移失稳破坏稳定性计算图

Fig. 4 Calculation diagram of tractor-slip failure stability

表6 斜坡各层岩土体的物理力学参数

Table 6 Physical and mechanical parameters of rock mass in each layer of slope

Table with 6 columns: 岩土名称, 重度 gamma/(kN·m^-3), 摩擦角 phi/(°), 黏聚力 c/kPa. Rows include 残坡积土, 强风化花岗岩, 中风化花岗岩, 微风化花岗岩.

表7 孤石稳定性评价标准

Table 7 Stability evaluation criteria of boulder

Table with 4 columns: 类型, 不稳定(I类), 欠稳定(II类), 稳定(III类). Rows include 倾倒-滚落, 牵引-滑移.

表8 暴雨工况孤石稳定性计算结果

Table 8 Stability calculation results of boulder under rainstorm condition

Table with 4 columns: 孤石编号, 失稳模式, 稳定系数, 稳定性. Rows include BGC03-4, BGF25-3.

2.3.2 数值计算法

针对不同失稳模式,采用不同的稳定性计算方法。由于斜坡整体稳定性较好,研究中不考虑斜坡大范围滑动导致的孤石失稳,只考虑孤石自身滚动或滑动。对于牵引-滑移式,其失稳模式类似于滑坡的过程,有固定的滑移面,即孤石与斜坡的接触面为滑动面,指定滑面计算稳定性即可;对于倾倒-滚落式,其失稳的原因是因为孤石底部起支撑作用的土体失稳。因此,只需对孤石起支撑作用这部分土体,不断搜索最危险滑面,计算稳定系数。

对BGC03-4和BGF25-3孤石在3种工况下的稳定性进行数值法计算,工况一为天然状态,工况二为暴雨状态,工况三为地震工况,计算参数根据表6选取,数值计算结果见表9,可以发现数值计算结果与解析法计算结果一致,互相印证,证明了结果的准确性。

表9 孤石稳定性计算结果

Table 9 Stability calculation results of boulder

Table with 8 columns: 孤石编号, 失稳模式, 稳定系数 (天然, 暴雨, 地震), 稳定性 (天然, 暴雨, 地震). Rows include BGC03-4, BGF25-3.

3 孤石崩塌灾害危险性区划

孤石崩塌灾害的危险性主要由两个因素决定:孤石的稳定性和滚石的威胁范围。稳定性结果已通过定性和定量方法得到,接下来只需获得不稳定和欠稳定孤石的运动轨迹。数值模拟是目前针对孤石运动过程研究应用最广的方法之一,采用中科院兰恒星课题组开发的产品[19],在国际上许多重大项目中得到应用[20]。

3.1 孤石运动轨迹及特征

3.1.1 孤石运动轨迹

以暴雨工况为例,根据稳定性判定结果,对欠稳定(76个)及不稳定孤石(10个)的运动过程进行模拟。孤石在运动过程中主要受地形和斜坡表层属性的影响,RA软件通过数字高程模型(digital elevation model,DEM)自动提取坡向、坡度和高程等要素,结合斜坡表层属性,共同影响孤石的运动轨迹。斜坡表层属性主要通过法向、切向恢复系数和摩擦角进行量化,取值见表10。

表 10 坡表模拟参数取值<sup>[21]</sup>

Table 10 Parameter values of slope surface simulation<sup>[21]</sup>

坡表特征	法向恢复系数 $R_n$	切向恢复系数 $R_t$	摩擦角/ (°)
坚硬较光滑的基岩面或铺砌面	0.37 ~ 0.42	0.87 ~ 0.92	8 ~ 10
基岩和砾岩的斜面	0.33 ~ 0.37	0.83 ~ 0.87	15 ~ 17
硬土或少量植被覆盖斜面	0.30 ~ 0.33	0.82 ~ 0.85	20 ~ 22
茂密植被覆盖斜坡或软土边坡	0.28 ~ 0.30	0.78 ~ 0.83	25 ~ 32

将孤石信息、坡表属性和 DEM 等添加到 ArcGIS 中,并在 RA 模块中调用,通过坐标系的转换以及有关动力学计算,量化孤石三维运动轨迹特征,图 5 为由 RA 软件模拟的孤石三维运动轨迹,一小部分孤石运动至房屋,严重威胁民房安全,大多孤石并未到达居民区即停止运动。图 6 为 SW 侧运动至房屋一个孤石的轨迹断面图和速度图。孤石运动轨迹贴近坡表,运动最大距离近 140 m,已经严重威胁了民房的安全,运动至 70.2 m 时,速度达到最大值,冲击能量同时也到达最大,最终停止位置已到达民房,极有可能威胁到下方居民和建筑的安全。

### 3.1.2 孤石运动特征

孤石在运动过程中获得速度和能量,能量分布如图 7 所示。同一个孤石速度越大,能量越大,最大能量分布在斜坡中部,最小能量则在每个孤石轨迹停止处。图 8 显示的是孤石轨迹的频率分布。频率指轨迹在每个栅格中所占数量的百分比,反映孤石运动的空间分布特征。最大频率分布在孤石发育密度较高区域,因为孤石较多,轨迹更容易密集相

交。除此之外,滚石频率受地形影响明显,会集中在如冲沟处运动,从而导致轨迹密集,频率过高。图 9 为滚石在研究区的弹跳高度分布特征。孤石弹跳高度受下落速度、地形和坡表材质影响明显,下落速度大,地形平直,坡表坚硬,则弹跳高度更高。

## 3.2 孤石危险性分区

### 3.2.1 熵权法确定危险性评价因子权重

以滚石的能量、频率、和弹跳高度作为危险性的评价因子,利用熵权法通过公式计算确定各个因素的权重<sup>[22]</sup>,公式为

$$Q_j = - \ln \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{ij} \ln \theta_{ij} \quad (4)$$

$$\theta_{ij} = X_{ij} \left( \sum_{i=1}^n X_{ij} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$P_j = (1 - Q_j) \left( m - \sum_{i=1}^m Q_j \right) \quad (6)$$

式中: $Q_j$ 为单个评价因子的信息熵; $n$ 为单个评价因子的数据个数; $\theta_{ij}$ 为第  $j$  个评价因子中第  $i$  个数据所占的比重; $X_{ij}$ 为归一化后的评价因子; $m$ 为评价因子的个数; $P_j$ 为评价因子的权重。

通过 ArcGIS 提取孤石的危险性评价因子的数值数据,根据式(4)~式(6)计算得到能量因子权重为 0.49、高度因子权重为 0.18 和频率因子权重为 0.33。

### 3.2.2 危险性评价结果

将速度、高度和频率因子归一化后,利用式(7)

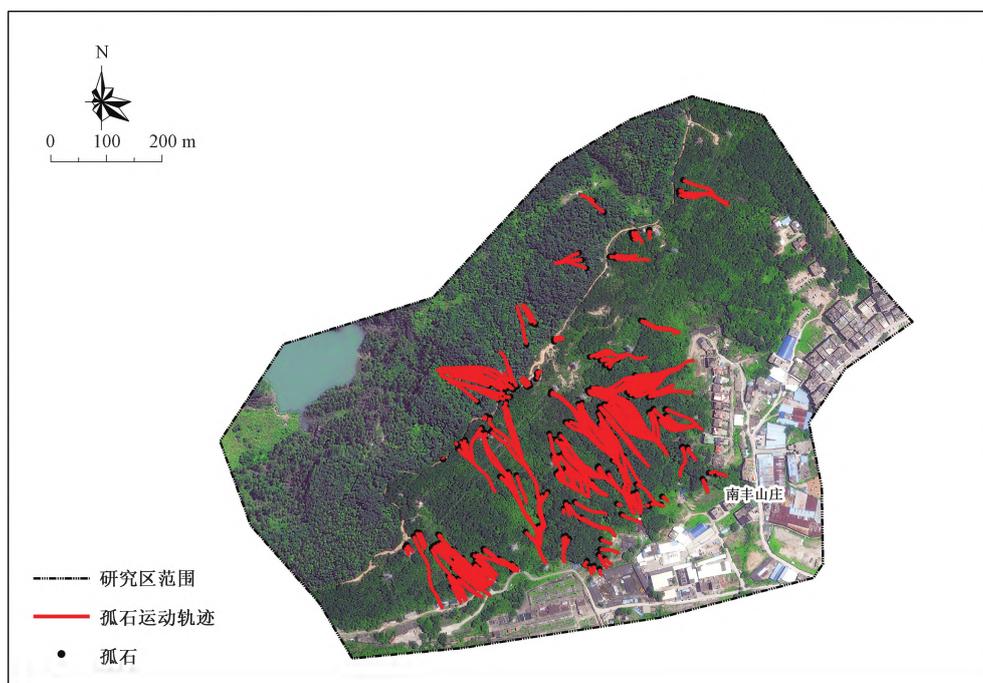


图 5 孤石三维运动轨迹

Fig. 5 Three-dimensional motion trajectory of a boulder

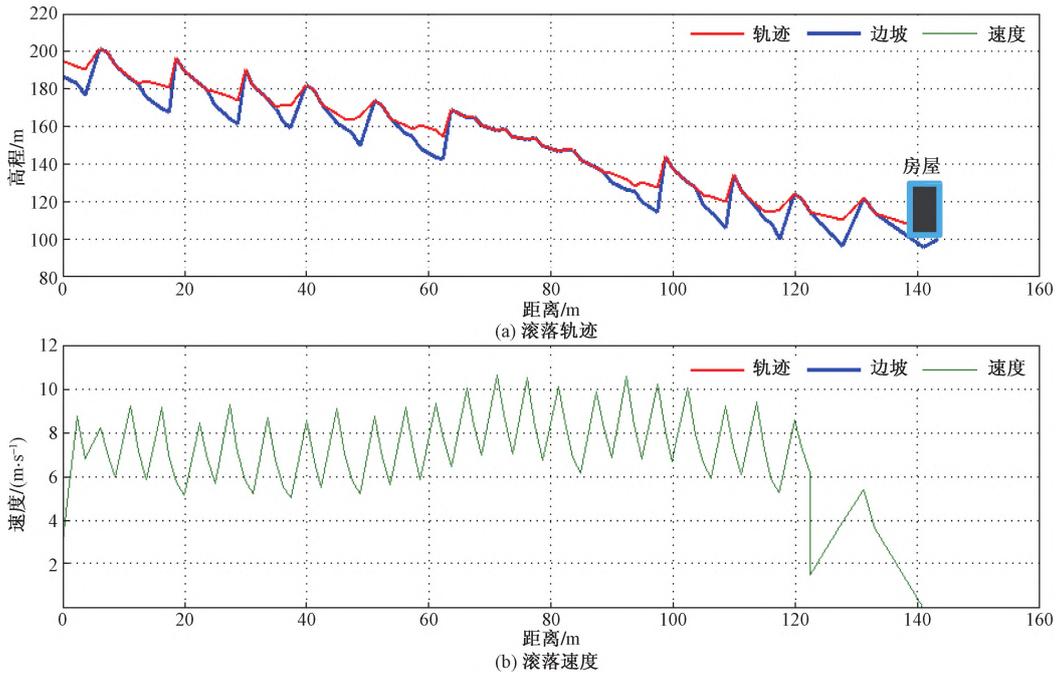


图6 孤石二维运动轨迹及速度图

Fig. 6 Two-dimensional trajectory and velocity of a boulder

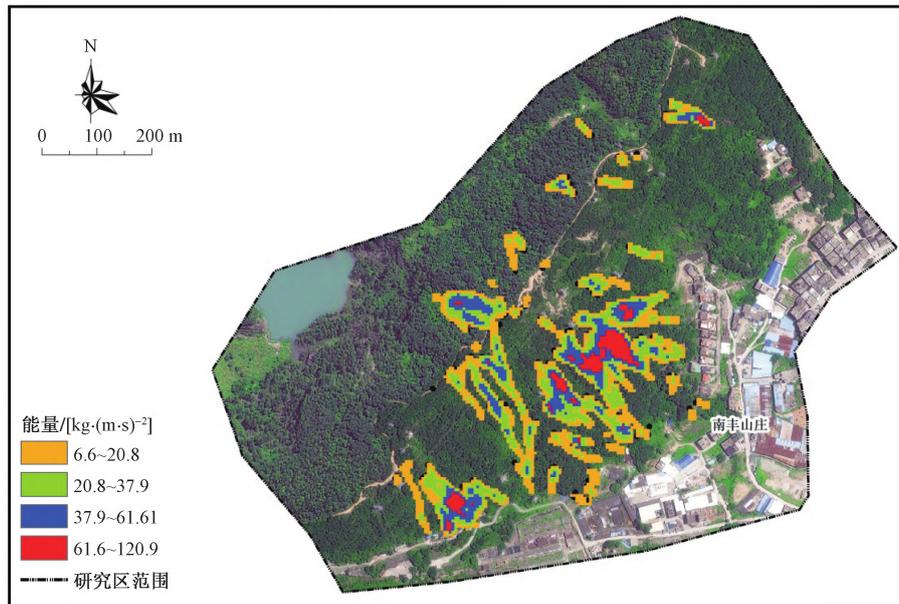


图7 孤石运动能量特征

Fig. 7 Motion energy characteristics of boulder

赋值权重后叠加求和,最后采用快速聚类法(K-means cluster model)对危险性进行分级,获取分级阈值。再根据实际野外调查灾害点的分布特征,对分级阈值进行修正,最终划分孤石危险性等级:极高危险区、高危险区、中危险区和低危险区,实现孤石的危险性评估制图(图10)。

$$D_k = P_{frequency} F_k + P_{height} H_k + P_{energy} E_k \quad (7)$$

式(7)中: $D_k$ 为第 $k$ 个栅格的危险性; $P_{frequency}$ 、 $P_{height}$

和 $P_{energy}$ 分别为频率、弹跳高度和能量的权重系数,按3.2.1节取值; $F_k$ 、 $H_k$ 和 $E_k$ 分别为第 $k$ 个栅格单元上孤石经过的频率、弹跳高度和能量。

从危险性分区图(图10)可以发现:仅有部分居民的生命财产受到威胁,主要分布在研究区SW方向以及正E向斜坡坡脚处,处在中危险区内,已用红色虚线圈出,其余地方居民生命财产受威胁程度低。极高危险区面积约为2675 m<sup>2</sup>,占比0.34%;高

投稿网址:www.stae.com.cn

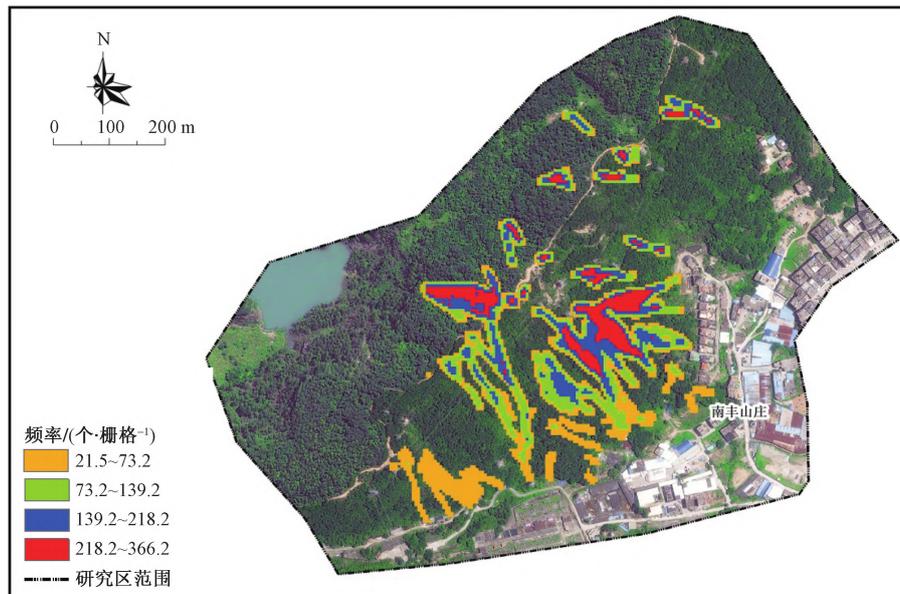


图8 孤石运动频率特征

Fig.8 Frequency characteristics of solitary rock movement

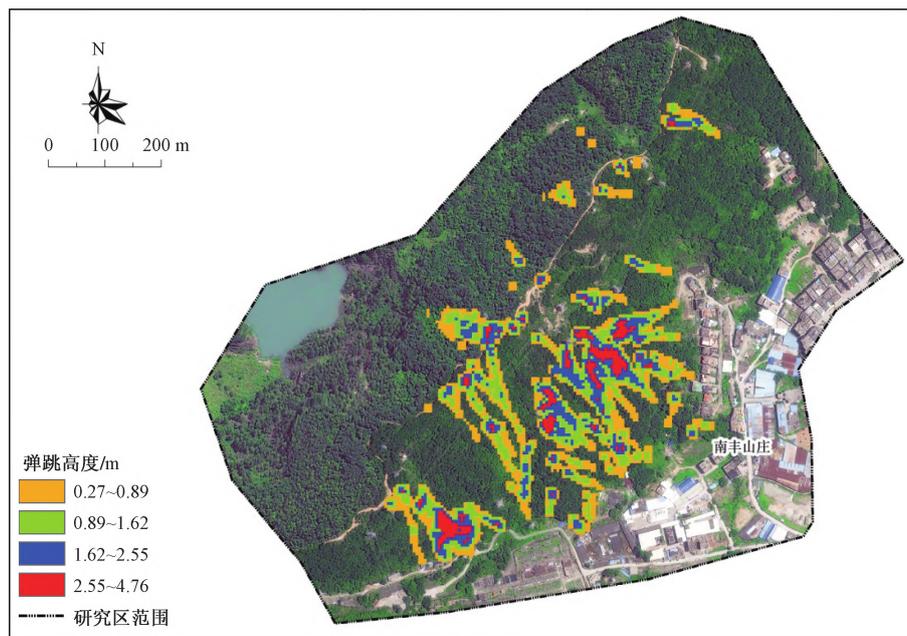


图9 孤石运动高度特征

Fig.9 Height characteristics of boulder movement

危险区面积约为  $15\,700\text{ m}^2$ , 占比  $2.01\%$ ; 中危险区面积约为  $43\,125\text{ m}^2$ , 占比  $5.53\%$ ; 低危险区面积约为  $718\,500\text{ m}^2$ , 占比  $92.12\%$ 。此时在承灾体调查基础上, 只需确定承灾体综合易损性, 即可形成风险评价结果。

利用工作特征曲线(receiver operating characteristics, ROC) 检验危险性评价模型的准确性, 一般采用曲线以下面积 AUC 来评价模型精度, ROC 曲线约接近左上角, 评价结果越理想<sup>[23]</sup>。危险性评价结

果 ROC 曲线见图 11, 曲线下的面积 (area under curve, AUC) 为  $95.2\%$ , 说明此次危险性评价结果具有很好的准确性和可信度。

## 4 结论

(1) 在工程地质分析和野外定性判断的基础上, 建立了基于 AHP 法的孤石稳定性快速评价方法, 采用定性-定量相结合方法综合判断孤石稳定性, 辅之以解析法和数值计算校核, 3 种方法综合穿

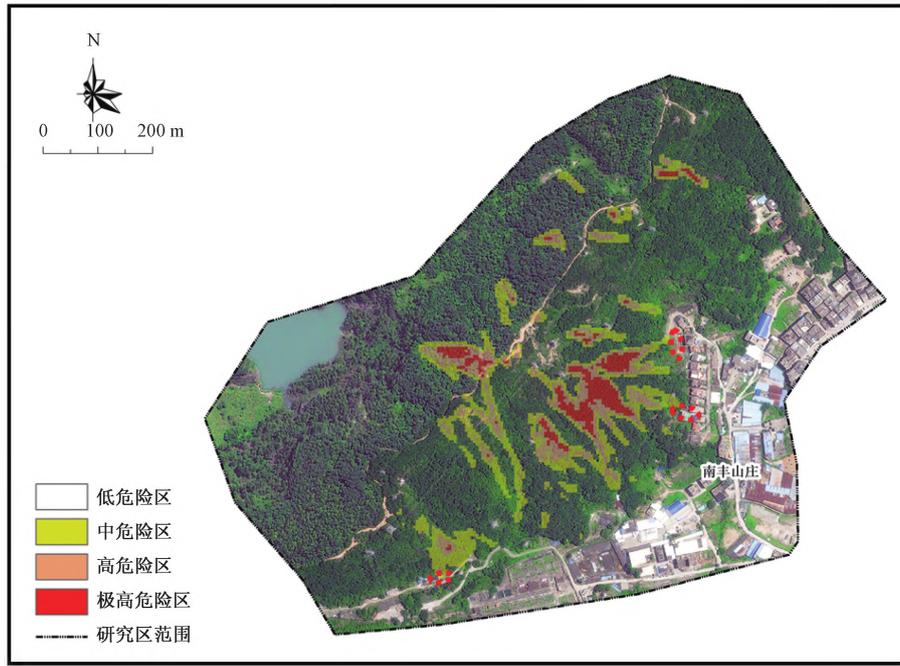


图 10 孤石崩塌灾害危险性分区图

Fig. 10 Hazard zoning map of boulder collapse disaster

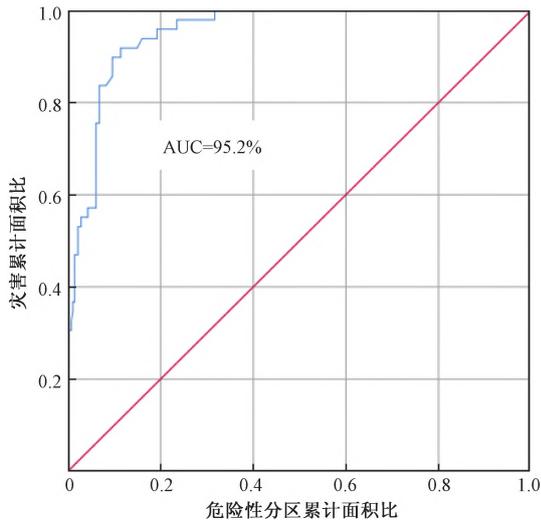


图 11 ROC 曲线结果

Fig. 11 ROC curve results

插使用增加了稳定性判断的可靠性、准确性和实操性,形成了一套“野外定性判断 + AHP 快速评价 + 定量校核”的稳定性评价体系。

(2)基于高精度 DEM 采用内嵌于 ArcGIS 的三维数值模拟软件 RA,以暴雨工况为例对不稳定孤石的运动轨迹和威胁范围进行模拟,获得了研究区内孤石的能量、频率和弹跳高度等运动特征,并将其作为危险性区划的重要评价因子。

(3)利用熵权法确定能量、频率和弹跳高度 3 种评价因子权重,分别为 0.49、0.33 和 0.18。基于 RA 模型按权重对 3 种评价因子进行空间栅格叠加

计算,通过快速聚类法对危险区分级,划分威胁对象。极高危险区面积约占研究区 0.34%;高危险区面积约占 2.01%;中危险区面积约占 5.53%;低危险区面积约占 92.12%。若叠加易损性结果,即可形成风险性评价结果,针对性制定防治策略。

参 考 文 献

[1] 丁斌, 孟永旭, 裴晓东. 尼泊尔某项目滚石灾害的工程地质调查与评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 554-563.  
 Ding Bin, Meng Yongxu, Pei Xiaodong. Engineering geological survey and evaluation of rolling rock disaster in a project in Nepal[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 554-563.

[2] 吴红刚, 牌立芳, 王飞, 等. 不同结构面落石对坡面冲击的动力响应研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(7): 13-17, 28.  
 Wu Honggang, Pai Lifang, Wang Fei, et al. Research on the dynamic response of rockfall on different structural surfaces to slope impact[J]. Chinese Journal of Railway Engineering, 2020, 37(7): 13-17, 28.

[3] 栗倩倩, 史绪山, 柴波, 等. 台风-非台风降雨型滑坡的多时段临界雨量值预测模型[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 267-273.  
 Li Qianqian, Shi Xushan, Chai Bo, et al. A multi-period critical rainfall prediction model for typhoon-non-typhoon rainfall landslides [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 2022, 41(2): 267-273.

[4] 孟晖, 张若琳, 石菊松, 等. 地质环境安全评价[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3764-3776.  
 Meng Hui, Zhang Ruolin, Shi Jusong, et al. Safety assessment of geological environment [J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3764-3776.

- [5] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223-240.  
Zheng Guang, Xu Qiang, Ju Yuanzhen, et al. Research on the characteristics and genesis mechanism of the collapse in Pusa Village, Zhangjiawan Town, Nayong County, Guizhou Province on August 28, 2017[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 223-240.
- [6] 郝文新. 地质灾害风险评估模型构建与应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.  
Hao Wenxin. Research on the construction and application of geological hazard risk assessment model[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
- [7] 陈攀, 葛永刚, 孙庆敏, 等. 基于小流域单元的泥石流易发性评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12764-12771.  
Chen Pan, Ge Yonggang, Sun Qingmin, et al. Evaluation of debris flow susceptibility based on small watershed unit[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12764-12771.
- [8] 解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 184-192.  
Xie Mingli, Ju Nengpan, Liu Yunkun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 184-192.
- [9] 杨柳, 牟鑫亮, 李晨, 等. 延安市宝塔区地质灾害风险评价[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 679-690.  
Yang Liu, Mu Xinliang, Li Chen, et al. Risk assessment of geological hazards in Baota District of Yan'an City[J]. Journal of Mountainous Sciences, 2020, 38(5): 679-690.
- [10] Ran Y H. Study on numerical simulation and protection of rockfall on an expressway in Chongqing[J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2019, 30(2): 52-57.
- [11] 许婧璟, 唐旭海, 刘泉声, 等. 基于能量跟踪法研究岩石破碎对滚石运动轨迹的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 541-548.  
Xu Jingjing, Tang Xuhai, Liu Quansheng, et al. Research on the influence of rock fragmentation on the trajectory of rolling stones based on energy tracking method[J]. Geomechanics, 2019, 40(S1): 541-548.
- [12] Wang X L, Zhang L Q, Zhang Z J, et al. Disaster risk analysis of rolling stones in the slope of the Jingdong cave in Shijing Mountain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 191-196.
- [13] 叶唐进, 刘依缘, 王泽文, 等. 降雨条件下滚石斜坡失稳机理试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3513-3519.  
Ye Tangjin, Liu Yiyuan, Wang Zewen, et al. Experimental study on instability mechanism of rolling stone slope under rainfall conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3513-3519.
- [14] 王军义, 梁凤, 彭雄武, 等. 基于GIS技术的单体崩塌危险范围评价方法研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 188-198.  
Wang Junyi, Liang Feng, Peng Xiongwu, et al. Research on the evaluation method of single collapse danger range based on GIS technology[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 188-198.
- [15] 刘成清, 陈玉满. 基于滚石运动参数的防护网数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7422-7428.  
Liu Chengqing, Chen Yuman. Numerical simulation of protective net based on rolling stone motion parameters[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18): 7422-7428.
- [16] 刘福臻, 李旭德, 王军朝, 等. 基于无人机和Rockfall Analyst的崩塌落石特征分析与运动学模拟——以察雅县崩塌落石为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 171-180.  
Liu Fuzhen, Li Xude, Wang Junchao, et al. Characteristic analysis and kinematics simulation of rock fall based on UAV and Rockfall Analyst: a case of rock fall in Chaya County[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(3): 171-180.
- [17] 何宇航, 裴向军, 梁靖, 等. 基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 24-33.  
He Yuhang, Pei Xiangjun, Liang Jing, et al. Prediction and risk assessment of dangerous rock mass based on Rockfall: taking the dangerous rock mass of Xuangou in Jiuzhaigou scenic spot as an example[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2020, 31(4): 24-33.
- [18] 刘卫华. 高陡边坡危岩体稳定性、运动特征及防治对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.  
Liu Weihua. Research on the stability, movement characteristics and prevention countermeasures of dangerous rock mass on high and steep slopes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [19] Lan H, Martin C D, Zhou C, et al. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling[J]. Geomorphology, 2010, 118(1-2): 213-223.
- [20] 林镇. 公路边坡滚石灾害运动特征模拟及风险评估[D]. 福州: 福州大学, 2015.  
Lin Zhen. Simulation and risk assessment of rolling stone hazard movement characteristics on highway slopes[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015.
- [21] 吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. 自然灾害学报, 2003(2): 79-84.  
Lü Qing, Sun Hongyue, Zhai Sankou, et al. Computational model of rolling rock movement on slopes[J]. Journal of Natural Disasters, 2003(2): 79-84.
- [22] Su S R, Zhou Y, Zhou Z H, et al. Collapse risk evaluation based on EW-AHP and unascertained measure theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 577-584.
- [23] 杨康, 薛喜成, 段钊, 等. 基于AHP-LR熵组合模型的子长市地质灾害危险性评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11551-11560.  
Yang Kang, Xue Xicheng, Duan Zhao, et al. Risk assessment of geological disasters in Zichang City based on AHP-LR entropy combination model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11551-11560.