

## 鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析

黄维, 艾东, 胡胜华, 许汇源, 寇磊, 周宝, 袁晶晶, 夏冬生

### Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan'an County

HUANG Wei, AI Dong, HU Shenghua, XU Huiyuan, KOU Lei, ZHOU Bao, YUAN Jingjing, and XIA Dongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107023>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

#### 重庆甑子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区

$\${suggestArticle.titleEn}$

孙敬辉, 石豫川 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 6-11

#### 面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

#### 基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62-69

#### 基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

#### 破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202107023

黄维, 艾东, 胡胜华, 等. 鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析——以远安县瓦坡崩塌区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 37-43.

HUANG Wei, AI Dong, HU Shenghua, *et al.* Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan'an County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 37-43.

## 鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析 ——以远安县瓦坡崩塌区为例

黄 维<sup>1</sup>, 艾 东<sup>1</sup>, 胡胜华<sup>1</sup>, 许汇源<sup>1</sup>, 寇 磊<sup>1</sup>, 周 宝<sup>1</sup>, 袁晶晶<sup>1</sup>, 夏冬生<sup>2</sup>

(1. 湖北省地质局第七地质大队(湖北省宜昌地质环境监测保护站), 湖北 宜昌 443000;

2. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**以远安县瓦坡崩塌区为例,通过地质调查、野外测绘、无人机航拍,建立了瓦坡崩塌区三维模型,基于 Rockfall Analyst(RA)分析软件,实现了瓦坡崩塌区大量崩塌落石三维空间下运动路径、高度、能量等要素模拟,探究了崩塌区落石的三维运动特征,开展了崩塌区落石危险性评估,为崩塌落石的防治提供科学参考。研究表明:崩塌区危岩主要破坏形式为倾倒式,目前处于欠稳定状态;模拟落石三维运动轨迹与已有落石点基本重合,说明此次模拟结果与实际情况较为吻合;落石运动过程中以碰撞弹跳、自由飞落为主,落石主要集中在崩塌区下部冲沟及公路内,部分落石达到居民区,在崩塌落石区下部公路、冲沟及崩塌区右侧危险性较高;崩塌落石防治工程建议采用危石孤石清除+被动防护网,在公路内侧、斜坡下方分别设置 5 m 高和 3 m 高抗冲击力 2 000 kJ 的被动防护网,可有效拦截落石。

**关键词:**落石;三维轨迹模拟;影响分区;被动防护网

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)06-0037-07

## Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan'an County

HUANG Wei<sup>1</sup>, AI Dong<sup>1</sup>, HU Shenghua<sup>1</sup>, XU Huiyuan<sup>1</sup>, KOU Lei<sup>1</sup>,  
ZHOU Bao<sup>1</sup>, YUAN Jingjing<sup>1</sup>, XIA Dongsheng<sup>2</sup>

(1. *The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau (Yichang Geological Environment Monitoring and Protection Station of Hubei Province), Yichang, Hubei 443000, China;* 2. *Wuhan Geomatic Institute, Wuhan, Hubei 430000, China*)

**Abstract:** Taking the Wapo collapse area in Yuan'an County as an example, a three-dimensional model was established by drone aerial photography, geological survey and field mapping. Based on Rockfall Analyst (RA) analysis software, a large number of three-dimensional rockfalls in the Wapo collapse area were studied. The motion path, height, energy and other factors in the space were simulated to explore the three-dimensional motion characteristics of rockfalls. The risk assessment of rockfalls in the collapsed area was carried out to guide the prevention and control of the rockfalls. The research results showed

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-12-27

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 湖北省地质局科研项目(KJ2022-24);湖北省自然资源厅科研计划项目(ZRZY2022KJ01)

第一作者: 黄 维(1992-),男,湖北荆门人,博士,工程师,主要从事地质灾害防治工作。E-mail: huangwei@cug.edu.cn

通讯作者: 艾 东(1986-),男,湖北松滋人,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害防治工作。E-mail: aidong216@163.com

that the main failure form of the dangerous rock was the toppling, and it was in an under-stable state at present; the three-dimensional motion trajectory of the simulated rockfall basically coincided with the existing rockfall point which indicating the simulation results were in good agreement with the actual situation; The mode of motion of the rocks were collision, bounce and free fall. Rockfalls were mainly concentrated in the gullies and roads but a few rocks reached residential areas. Therefore, the roads, gullies and the right side of the collapse area were in high risk area; Dangerous rock mass and boulders removal and passive protective nets were adopt as the prevention engineering, two passive protection nets which were 5 m high and 3 m high respectively were set on the inner side of the road and below the slope, and a net with an impact resistance of 2 000 kJ could effectively intercept falling rocks.

**Keywords:** rock fall; 3D trajectory simulation; impact area regionalization; passive protection network

## 0 引言

崩塌落石是鄂西山区主要地质灾害之一,具有分布零散、发生偶然、运动不规律、破坏力强等特征<sup>[1-2]</sup>。近年来,极端天气频发,崩塌落石地质灾害发生的频率也越来越高威胁着鄂西山区人民生命财产安全。2020年6月19日上午8时40分左右,远安县瓦坡崩塌区发生坠石险情,现场可见6处落石,最大直径约2.5 m,总体积约4.0 m<sup>3</sup>,造成村级公路多处路面损坏,所幸本次崩塌坠石未造成人员伤亡和村民房屋损毁。但根据现场调查,崩塌区发育较多危石、孤石,严重威胁下方20户65人的生命财产安全,以及G347国道的安全运行。

崩塌落石灾害一直是国内外地质灾害研究的重点<sup>[3-5]</sup>。胡厚田<sup>[6]</sup>归纳总结了国内典型崩塌落石灾害的形成机制、影响因素、运动特征及规律。唐红梅等<sup>[7]</sup>研究了三峡库区危岩落石,分别探究了坠落式、倾倒式、滑塌式危岩的初始运动状态、碰撞阶段、碰撞过程及滚动阶段,获得了危岩落石的运动轨迹方程,并在工程中得到验证。Palma等<sup>[8]</sup>通过野外地质调查及数值模拟,在二维平面中分析了落石的运动过程。Lan等<sup>[9]</sup>通过Rock Analyst软件,在三维空间下模拟了崩塌落石的运动过程,并基于GIS平台对崩塌落石的危险性进行了评价。目前落石运动过程主要是在二维空间下,通过数值模拟分析崩塌落石灾害的运动特征具有一定局限性<sup>[10]</sup>,而三维空间下的轨迹模拟可以更加真实的反映落石运动过程中的空间特征,在崩塌落石的预防与治理中具有更加实际的指导意义<sup>[11]</sup>。

因此文中以远安县瓦坡崩塌为例,通过地质调查、野外测绘、无人机航拍,建立了瓦坡崩塌三维模型,基于Rockfall Analyst(RA)分析软件,模拟了瓦坡崩塌区大量崩塌落石三维空间下运动路径、高度、能量等要素,研究坡崩塌区落石的三维运动过程及威胁范围,为瓦坡崩塌区落石灾害的风险管控及防治提供了科学参考。

## 1 研究区工程地质条件

研究区位于湖北省远安县洋坪镇余家畈村一组(图1),距洋坪镇直线距离约8 km,距远安县城约20 km。属长江中游亚热带湿润季风气候,区内多年平均降雨量(1957—2000年)为1 080.2 mm,最大24 h降雨量418 mm,最大年降雨量为1 586 mm(1964年),一年中降雨量多集中在4—9月,其中7月降雨量最大,1

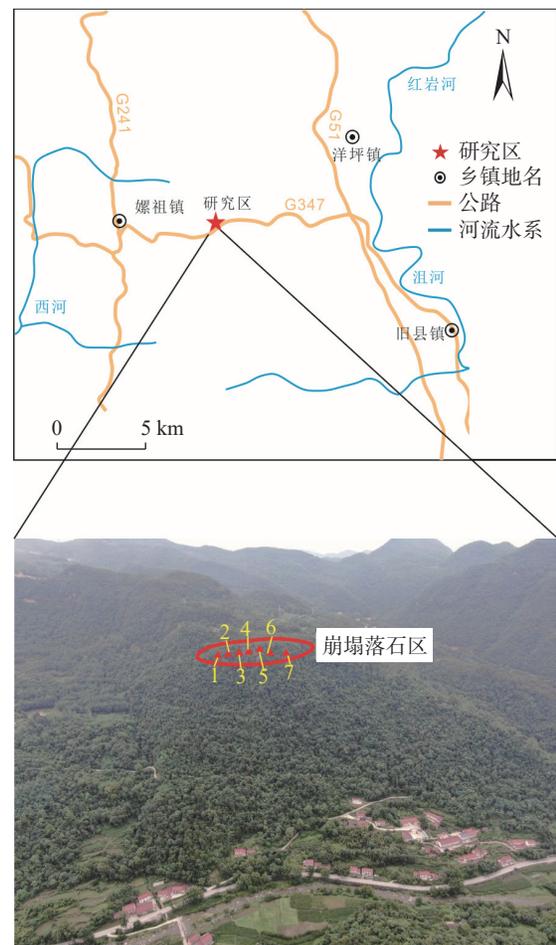


图 1 研究区位置图

Fig. 1 The geographical location of the study area

月、12月最少。

研究区地貌单元属于侵蚀低山地貌,地形起伏不大,植被茂密。区内出露地层有石炭系黄龙组( $C_2h$ )、泥盆系黄家蹬组( $D_3h$ )、志留系纱帽组( $S_3s$ )及第四系崩坡积物( $Q_4^{col+dl}$ ),第四系残破积物( $Q_4^{el+dl}$ )。研究区位处远安地堑西侧,属弱震活动区,弱震活动频繁,震级小,大部分小于3级,地震动峰值加速度为0.05g。

研究区内地下水类型主要有裂隙水、岩溶水。崩塌发育区出露灰岩具有一定的含水性,由于裸露岩体构造裂隙发育,岩体的完整性差,为地表水下渗提供通道及储存空间,是该地区的主要含水层,下部泥盆系和志留系为相对隔水层。地下水主要接受大气降水补给,其水动力特征多属浅层短循环无压流。研究区地势总体北高南低,地形陡峭坡度大,有利于地下水和地表水排泄,大部分以坡面流形式自北向南排泄至公路下坡面,就近向低洼地带,水文地质属简单类型。

## 2 崩塌区基本特征

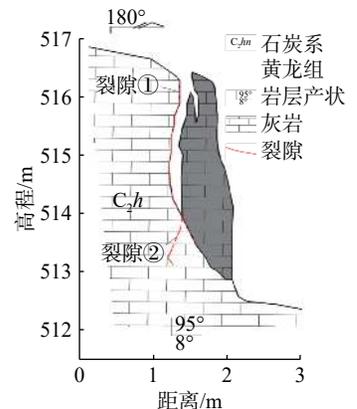
崩塌区位于北高南低的单面斜坡上,下部地形稍缓,坡度为 $35^\circ \sim 45^\circ$ ,顶部坡度为近直立,坡体表面植被覆盖较茂密,中部为一村级盘山公路,坡脚为G347国道。根据现场勘查,该崩塌所处斜坡为东西走向,总体坡向约 $180^\circ$ ,斜坡坡顶距余家畈村委会垂直高差约250m,坡脚高程为250~270m,坡顶高程为540m,崩塌区出露岩性为石炭系黄龙组( $C_2h$ )灰、灰白色块状灰岩,白云质灰岩,底部为角砾状及条带状灰岩,岩层产状 $95^\circ \angle 8^\circ$ ,为崩塌体母岩,岩体呈块状结构,节理裂隙极为发育,结构十分破碎。下部出露地层有:泥盆系黄家蹬组( $D_3h$ )浅黄绿色、灰色薄层至中厚层状细粒石英砂岩及砂质页岩;志留系纱帽组( $S_3s$ )上部为黄绿色薄层状细砂岩、粉砂岩夹页岩,下部为砂质页岩与页岩互层,岩层产状 $90^\circ \angle 13^\circ$ ,中等—强风化。坡面与岩层组合为横向坡,斜坡体上部基岩裸露,中部残坡积覆盖层较薄,厚度约0.2~1.0m。危岩体分布高程480~539m,高差为30~50m,主崩方向 $180^\circ$ ,节理裂隙十分发育,主要发育与坡向相同的裂隙,主要倾向为 $92^\circ \sim 270^\circ$ ,倾角为 $60^\circ \sim 90^\circ$ ,岩体裂隙宽2~15cm,岩体裂缝宽0.5~1.5m。该崩塌平面分布长度约320m,平均高度约35m,均厚约10m,体积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

根据现场调查,崩塌区共分布7处危岩体,总体积为 $493.8 \text{ m}^3$ ,斜坡带分布较多危石、孤石,总体积约 $15\,093.8 \text{ m}^3$ 。崩塌区危岩主要破坏形式为倾倒式,以1号危岩为例(图2),1号危岩长约1.5m,高约3.5m,厚

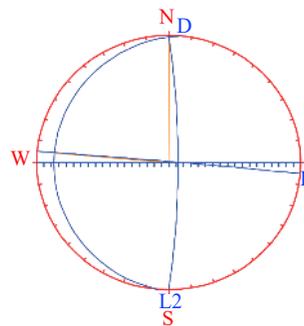
约0.5m,体积约 $2.6 \text{ m}^3$ ,剖面形态呈柱状,主崩方向 $180^\circ$ 。该危岩体岩性为石炭系黄龙组( $C_2h$ )岩性为灰、灰白色块状灰岩,白云质灰岩,岩层产状 $95^\circ \angle 8^\circ$ ,中等风化,节理裂隙较发育,坡体主要发育2组裂隙,裂隙①: $185^\circ \angle 89^\circ$ ,长3.5m,宽0.1~0.3m,0.5m/条;裂隙②: $270^\circ \angle 82^\circ$ ,长2~4m,裂隙张开2~5cm,1.5m/条;坡面与岩层组合为横向坡。危岩后缘裂隙张开0.1~0.3m,几近贯穿,下部基座已劈裂。根据《崩塌防治工程设计规范(T/CAGHP032-2019)》,1号危岩体在天然工况下稳定系数为1.232,欠稳定,在50年一遇暴雨(饱水状态)工况下稳定系数为1.123,为欠稳定。



(a) 1号危岩体照片



(b) 1号危岩体剖面图



(c) 1号危岩体赤平投影图

编号	结构面名称	倾向/(°)	倾角/(°)
P	坡面	180	90
L1	裂缝1	185	89
L2	裂缝2	270	82
D	地层	95	8

组合交线	倾向/(°)	倾角/(°)
P-L1	270	79
P-L2	270	82
P-D	90	8
L1-L2	268	82
L1-D	95	8
L1-D	180	1

图2 1号危岩体基本情况

Fig. 2 Basic information of No.1 dangerous rock mass

## 3 三维运动轨迹模拟

近年来,无人机航拍结合野外测绘技术,可以获得崩塌区高精度地形数据,建立仿真三维模型。同时,借助三维运动轨迹模拟软件,可以开展崩塌落石三维运动轨迹模拟,为崩塌落石的运动特征、精准预测及风险管控提供科学参考。

### 3.1 三维运动轨迹模拟软件简介

此次落石三维运动轨迹模拟采用 Rock analyst(RA)

软件, RA 是基于 ArcGIS 开发的落石三维运动轨迹模拟软件<sup>[12]</sup>, 能够模拟崩塌落石的 3 个主要运动过程: 坠落或飞行、碰撞反弹和滚动滑行。可模拟落石的三维滚动、滑动、碰撞、飞跃等复杂运动特征, 合理预测运动距离、影响范围和破坏强度等<sup>[13]</sup>。RA 基于 GIS 平台开发, 可兼容利用 GIS 强大的空间数据管理、分析与展示等功能。同时采用流程化的操作模式, 仅需简单点击即可获得初步结果以供后续优化。

### 3.2 三维运动轨迹模拟基本原理

RA 计算模型采用如下假定条件: (1) 边坡为光滑的坡面; (2) 落石简化为质点模型, 质量分布均匀; (3) 落石和坡面均为刚体; (4) 不考虑落石与落石之间的相互碰撞, 同时假定落石始终保持完整。落石运动过程中满足牛顿运动定律和碰撞理论, 为确定性理论模型。

在落石飞行阶段, 落石运动过程满足抛物线方程。落石在三维空间坐标系中(图 3), 初始位置为 $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 满足方程:

$$S = \begin{bmatrix} V_{x0} + X_0 \\ V_{y0} + Y_0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 + V_{z0}t + Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{x0} \\ V_{y0} \\ V_{z0} - gt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -gt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{x0} \\ V_{y0} \\ V_{z0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $S$ ——运动距离/m;

$V$ ——速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$t$ ——落石飞行时刻/s;

$V_{x0}$ —— $X$ 方向初始速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_{y0}$ —— $Y$ 方向初始速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_{z0}$ —— $Z$ 方向初始速度/( $m \cdot s^{-1}$ )。

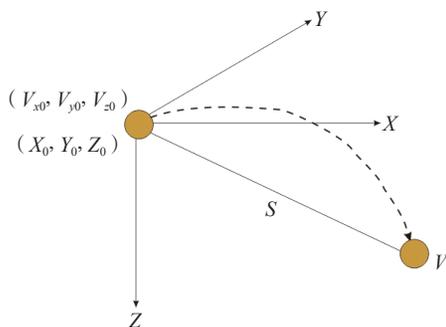


图 3 飞行阶段示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the rockfall fly

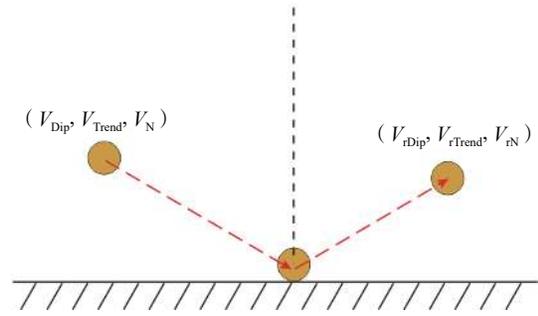


图 4 碰撞阶段示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the rockfall collision

落石在碰撞反弹过程中, 满足动量守恒定律, 在 ArcGIS 平台中, 根据落点与栅格相交位置, 通过质点碰撞反弹模型, 可以计算质点碰撞后的弹跳矢量速度(图 4)。满足方程:

$$\begin{cases} V_{rDip} = RTV_{Dip} \\ V_{rTrend} = R_T V_{Trend} \\ V_{rN} = R_N V_N \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_{rDip}$ ——碰撞后倾向速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$R_T$ ——切向上恢复系数(无量纲其数值大小在 0 ~ 1 之间, 可通过野外现场试验或工程类别判断);

$V_{Dip}$ ——碰撞前倾向速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_{rTrend}$ ——碰撞后走向速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$R_N$ ——法向上恢复系数(无量纲其数值大小在 0 ~ 1 之间, 可通过野外现场试验或工程类别判断);

$V_{Trend}$ ——碰撞前走向速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_{rN}$ ——碰撞后法向速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_N$ ——碰撞前法向速度/( $m \cdot s^{-1}$ )。

在落石的滚动过程中(图 5), 落石由于受到地面的摩擦力, 速度逐渐减小, 满足牛顿第二定律及运动学公式, 满足公式:

$$a = g \sin \theta - g \cos \theta \tan \varphi \quad (5)$$

$$V_t = V_0 - at \quad (6)$$

式中:  $a$ ——加速度/( $m \cdot s^{-2}$ );

$\theta$ ——坡度/( $^\circ$ );

$\varphi$ ——内摩擦角/( $^\circ$ );

$V_t$ —— $t$ 时刻速度/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_0$ ——落石初速度/( $m \cdot s^{-1}$ )。

### 3.3 三维运动轨迹模拟过程

根据野外测绘及无人机航拍, 获得研究区地形资料, 建立研究区三维地形模型, 模型栅格大小为  $5 m \times 5 m$ 。

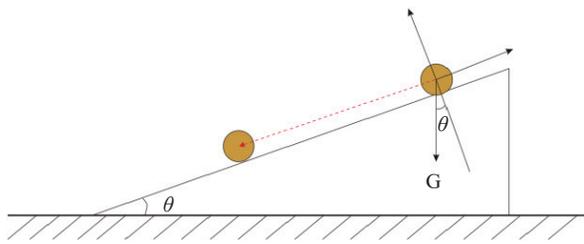


图 5 滚动过程示意图

Fig. 5 The schematic diagram of rockfall roll

根据地质调查, 将崩塌落石区下部坡面划分为 3 类: 基岩(植被发育区)、居民生活区、碎石区。设定了崩塌落石源区, 落石点以折线形式分布于危岩顶部岩石临空面上(图 6)。

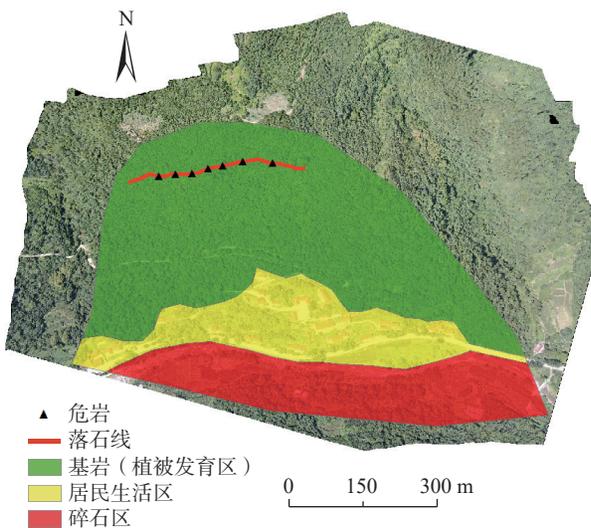


图 6 研究区坡面分类

Fig. 6 Classification of slope surface in the study area

结合野外地质调查崩塌落石区覆盖层厚度, 植被发育情况, 参考前人研究结果<sup>[14]</sup>, 确定了崩塌落石下部坡面法向恢复系数( $R_N$ )、切向恢复系数( $R_T$ )和动摩擦角( $\varphi$ )等计算参数, 根据现场堆积区落石的调查, 估算了落石的最大落石质量( $m$ )、密度( $\rho$ )及初始运动状态( $V_0$ ), 落石坠落一般具有一个较小初速度( $V_0$ ), 三维运动轨迹模拟基本参数见表 1。

### 3.4 模拟结果分析

研究区崩塌落石三维运动轨迹如图 7 所示, 模拟运动轨迹与已有落石点基本重合, 说明此次模拟结果与实际情况较为吻合。崩塌区落石主要集中在崩塌区下部冲沟及公路区域, 部分落石运动达到居民区。落石最大运动距离为 450 m, 最大弹跳高度为 30 m, 在居民区附近最大弹跳高度为 2 m, 最大冲击能量为 1 000 kJ。典型落石点 2 运动轨迹如图 8 所示, 落石运动轨迹可划分

表 1 三维运动轨迹模拟基本参数  
Table 1 Basic parameters of three-dimensional motion trajectory simulation

坡面类型	法向恢复系数	切向恢复系数	动摩擦角 / (°)	最大落石质量/kg	初速度 / (m·s <sup>-1</sup> )
基岩(植被发育区)	0.37	0.83	30	1 000	1
居民生活区	0.3	0.82	25		
碎石区	0.25	0.80	20		

为 3 个部分: (1)碰撞弹跳; (2)自由飞落; (3)滚动。运动过程中以碰撞弹跳、自由飞落为主, 落石 2 最大运动距离为 320 m。在落石运动初期, 运动速度逐渐增大, 与坡面发生碰撞、弹跳。当运动速度大于 30 m/s 时, 落石脱离地面, 开始自由飞落。当落石与地面接触时, 速度达到最大值 50 m/s, 然后与地面发生碰撞, 速度迅速降低, 以滚动为主, 直至速度降为 0, 落石停止运动。

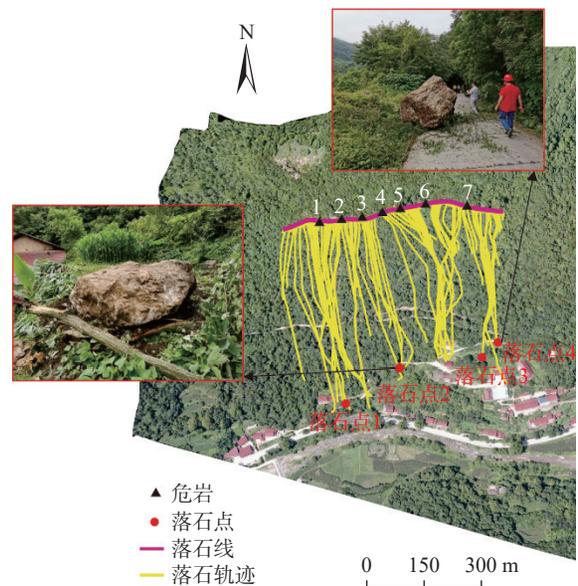


图 7 崩塌落石三维运动轨迹

Fig. 7 Three-dimensional trajectory of rockfall

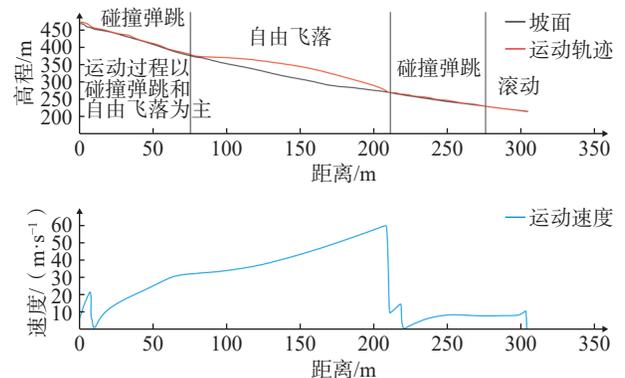


图 8 落石点 2 运动轨迹

Fig. 8 Trajectory of rockfall 2

### 3.5 崩塌落石危险性分析

模拟获得崩塌区落石三维运动轨迹后,通过 RA 软件,将落石运动轨迹栅格化,栅格大小为 5 m×5 m,选取落石的轨迹交叉频数、弹跳高度、运动速度三种评价因子,分析每个栅格落石的轨迹交叉频数、弹跳高度、运动速度。根据前人研究,三种评价指标权重 A、B、C 分别为 0.5、0.2、0.3<sup>[15]</sup>。将栅格图层叠加计算(式 7),并按照自然间断点法进行分级,获得崩塌落石影响范围危险性评价图。

$$Hazard_{(i)} = A \times P_{Frequency(i)} + B \times P_{Height(i)} + C \times P_{Velocity(i)} \quad (7)$$

式中:  $Hazard_{(i)}$ ——第  $i$  个栅格单元的危险程度;

$P_{Frequency(i)}$ 、 $P_{Height(i)}$ 、 $P_{Velocity(i)}$ ——表示第  $i$  个栅格单元上落石经过的频率、弹跳高度和运动速度。

从落石危险性评价图(图 9)中可知,在崩塌落石区下部公路、冲沟及崩塌区右侧危险性较高,结合落石三维运动轨迹,大部分落石停留在崩塌区冲沟中,但少量落石会运动到公路及居民生活区,对崩塌区下方居民、行人车辆及建筑物的安全构成威胁,需对崩塌落石体进行防治。

### 4 防治工程建议

针对瓦坡崩塌落石结构特征及灾害体发育特点,防治工程以“安全可靠、技术可行、经济合理、施工简便”为总则,尽可能避免因施工对崩塌落石区地质环境条件造成恶化、破坏。因此,崩塌落石防治工程建议采用危石孤石清除+被动防护网。鉴于危岩的岩性硬脆,危石孤石清除可根据危岩结构的自由面而定或尽可能多地创造自由面,对不同自由面采取不同的布孔方法。采用风钻、钢钎等工具将危石分解破碎,直接用挖机装车外运,危岩清理应严格遵循自上而下开挖原则。被动防护网拟建在公路内侧及斜坡下方,共设置 2 道防护网。根据上文崩塌落石三维运动轨迹可知,公路内侧被动防护网处的落石弹跳高度绝大部分小于 5 m,最大冲击能约 1 400 kJ,故设置高 5 m,抗冲击力 2 000 kJ 的被动防护网能对大部分落石进行有效拦截;在斜坡下方落石弹跳高度均小于 3 m,最大冲击能最大约 1 000 kJ,故在斜坡下方设置第二道高 3 m,抗冲击力 2 000 kJ 的被动防护网可有效拦截其余落石。设置被动拦网后,落石运动轨迹如图 10 所示,2 道防护网能有效拦截落石。

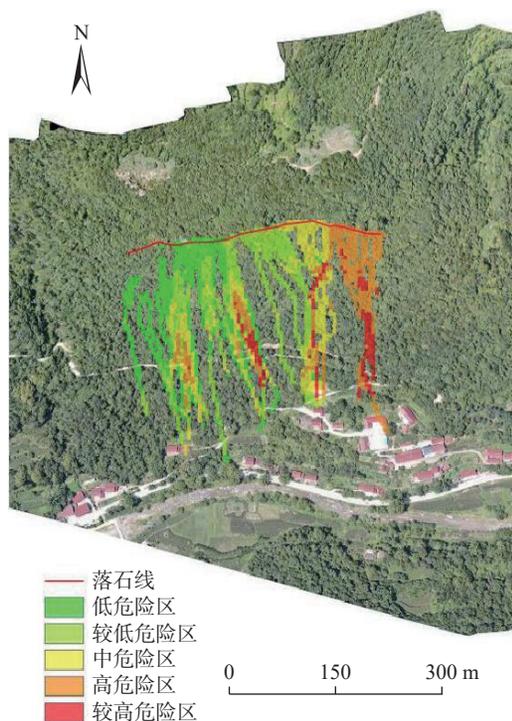


图 9 危险性分区图

Fig. 9 Hazard zoning map of the study area

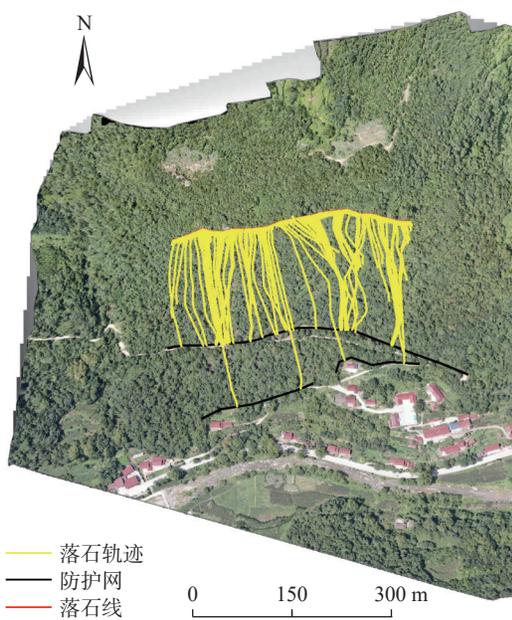


图 10 设置防护网后落石运动轨迹

Fig. 10 Rockfall movement trajectory after setting the protective net

### 5 结论

- (1)崩塌区危岩主要破坏形式为倾倒地,目前处于欠稳定状态。
- (2)基于 RA 模拟的落石三维运动轨迹与已有落石点基本重合,说明本次模拟结果与实际情况较为吻合。

(3) 落石运动过程中以碰撞弹跳、自由飞落为主。落石主要集中在崩塌区下部冲沟及公路区域, 部分落石运动达到居民区。在崩塌落石区下部公路、冲沟及崩塌区右侧危险性较高。

(4) 落石最大运动距离为 450 m, 最大弹跳高度为 30 m, 在居民区附近最大弹跳高度为 2 m, 最大冲击量为 1 000 kJ。

(5) 崩塌落石防治工程建议采用危石孤石清除+被动防护网。在公路内侧、斜坡下方分别设置 5 m 高、3 m 高抗冲击力 2 000 kJ 的被动防护网, 可有效拦截落石。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 黄俊光, 张帅. 基于动力有限元法的落石运动轨迹研究 [ J ] . 长江科学院院报, 2021, 38(11): 73 - 79. [ HUANG Janguang, ZHANG Shuai. Research on trajectory of rockfall based on dynamic finite element method [ J ] . Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11): 73 - 79. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 危岩落石防治技术体系及其特点 [ J ] . 公路, 2010, 55(7): 80 - 85. [ YE Siquiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Rockfall mitigation techniques and its characteristics [ J ] . Highway, 2010, 55(7): 80 - 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 王军义, 梁风, 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, 2021: 1 - 12. [ WANG Junyi, LIANG Feng, PENG Xiongwu, et al. Study on the assessment method of single collapse risk range based on GIS technology [ J ] . Journal of Engineering Geology, 2021: 1 - 12. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 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. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: A case study of the Xuangou collapse [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 24 - 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 孙敬辉, 石豫川. 重庆甑子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 6 - 11. [ SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and hazard zoning of collapse and rockfall in Zengziyan, Chongqing [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 6 - 11. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 胡厚田. 崩塌与落石 [ M ] . 北京: 中国铁道出版社, 1989. [ HU Houtian. Collapse and falling rocks [ M ] . Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究 [ J ] . 重庆建
- 筑大学学报, 2003, 25(1): 17 - 23. [ TANG Hongmei, YI Pengying. Research on dangerous rock movement route [ J ] . Journal of Chongqing Architecture University, 2003, 25(1): 17 - 23. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] PALMA B, PARISE M, REICHENBACH P, et al. Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy [ J ] . Natural Hazards, 2012, 61(1): 187 - 201.
- [ 9 ] LAN H X, MARTIN C D, ZHOU C H, et al. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling [ J ] . Geomorphology, 2010, 118(1/2): 213 - 223.
- [ 10 ] 王学良, 张路青, 张中俭, 等. 石经山藏经洞坡体滚石灾害危险性分析 [ J ] . 岩土力学, 2012, 33(1): 191 - 196. [ WANG Xueliang, ZHANG Luqing, ZHANG Zhongjian, et al. Rockfall hazard analysis of slope at sutra caves of Shijing Mountain [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 191 - 196. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] CHEN G Q, ZHENG L, ZHANG Y B, et al. Numerical simulation in rockfall analysis: A close comparison of 2-D and 3-D DDA [ J ] . Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3): 527 - 541.
- [ 12 ] LAN H X, MARTIN C D, LIM C H. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling [ J ] . Computers & Geosciences, 2007, 33(2): 262 - 279.
- [ 13 ] 仇义星, 兰恒星, 李郎平, 等. 综合统计模型和物理模型的地质灾害精细评估: 以福建省龙山社区为例 [ J ] . 工程地质学报, 2019, 27(3): 608 - 622. [ ZHANG Yixing, LAN Hengxing, LI Langping, et al. Combining statistical model and physical model for refined assessment of geological disaster: A case study of Longshan community in Fujian Province [ J ] . Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 608 - 622. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 王栋, 王剑锋, 李天斌, 等. 西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析 [ J ] . 地质力学学报, 2021, 27(1): 96 - 104. [ WANG Dong, WANG Jianfeng, LI Tianbin, et al. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: A case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China [ J ] . Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 96 - 104. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 刘洪江, 兰恒星. “5·12”震后都江堰—汶川公路崩塌灾害模拟及危险性评价 [ J ] . 资源科学, 2012, 34(2): 345 - 352. [ LIU Hongjiang, LAN Hengxing. Rockfall disaster simulation and risk assessment on the Dujiangyan-Wenchuan highway after “5·12” earthquake [ J ] . Resources Science, 2012, 34(2): 345 - 352. (in Chinese with English abstract) ]