

高陡岩质斜坡潜在不稳定块体识别及灾害效应量化分析

吴章雷¹, 姚兆威², 黄达², 肖华波¹, 田雄¹, 马行东¹, 占洁伟^{2*}

1 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610072

2 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054

摘要: 为解决山区重大工程建设中面临的高陡岩质斜坡潜在不稳定块体空间定位难、灾害效应量化分析不足的瓶颈问题。本文提出了一种融合无人机摄影测量、结构面解译算法、三维运动学分析及落石运动模拟的高位潜在不稳定块体识别定位、失稳模式判识及其灾害效应分析的综合分析框架。以大渡河双江口水电站坝址左岸一高位岩体露头为例, 该框架有效识别出 92 处潜在不稳定块体, 确定其潜在失稳模式以楔形体破坏为主。落石三维运动轨迹模拟结果表明不稳定块体失稳后整体呈现加速-减速的循环趋势, 最远运动距离为 845.6 m, 对水电站枢纽区影响较小。本研究强调了不稳定块体空间精准定位对落石灾害风险预测精度提升的重要性, 这对落石灾害防控具有重要指导意义。

关键词: 无人机摄影测量; 结构面解译; 潜在不稳定块体; 三维运动学分析; 落石运动模拟

中图分类号: TU457

收稿日期: 2025-05-11

Identification of potential unstable blocks on high and steep rock slope and quantitative analysis of hazard effects

Wu Zhanglei¹, Yao Zhaowei², Huang Da², Xiao Huabo¹, Tian Xiong¹, Ma Xingdong¹,

Zhan Jiewei^{2*}

1 Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China

2 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract: To address the bottlenecks encountered in major engineering works in mountainous regions namely, the difficulty of spatially locating potentially unstable blocks on high and steep rock slope and the insufficiency of quantitative analyses of associated hazard effects. This study proposes an integrated analytical framework combining unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, discontinuities interpretation algorithms, three dimensional (3D) kinematic analysis, and rockfall numerical simulation to identify and locate high-elevation potentially unstable

基金项目: 国家自然科学基金(U23A202579、42007269 和 42277187); 中国电建成都院科技项目(大型清洁能源工程的智慧勘探关键技术研究与应用 P58723); 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司重点委托项目(CD2C20242812)

第一作者简介: 吴章雷(1977-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水电工程相关的工程地质及地质灾害等方面的研究工作. E-mail: 2000016@chidi.com.cn.

通讯作者简介: 占洁伟(1990-), 男, 教授, 主要从事工程地质方面的教学与研究工作. ORCID: 0000-0003-1039-6160. E-mail: zhanjw@chd.edu.cn.

blocks, determine their failure modes, and analyze associated hazard effects. Taking the high-elevation rock outcrop on the left bank of the Shuangjiangkou Hydropower Station dam site on the Dadu River as an example, the framework effectively identified 92 potentially unstable blocks and determined that wedge failure is the primary instability mode. The simulated 3D rockfall trajectories show that, after destabilization, the blocks exhibit cyclic acceleration-deceleration trends, with a maximum runout distance of 845.6 m, posing minimal impact on the hydropower hub area. In addition, this study emphasizes the importance of precise spatial localization of unstable blocks for improving rockfall hazard risk prediction accuracy, which has important implications for rockfall disaster prevention and control.

Keyword: UAV photogrammetry; Discontinuity interpretation; Potential unstable blocks; 3D kinematic analysis;

Rockfall numerical simulation

0. 引言

高陡裂隙岩质斜坡中结构面切割形成的潜在不稳定块体,易在降雨、地震等外部诱因下失稳形成落石灾害,严重威胁下部居民和基础设施安全(高丙丽等, 2022; 俞朝悦等, 2022)。然而,受限于高陡地形等因素限制,传统人工调查方法难以有效采集和提取岩体结构面信息,加剧了不稳定块体识别定位的难度(周成凯等, 2021)。因此,亟需完善高陡岩质斜坡潜在不稳定块体识别及其失稳后的动力学特征分析方法,从而更好地服务于高位落石灾害防控。

解译诱发落石灾害的主控结构面是识别潜在不稳定块体的首要步骤(熊开治等, 2021)。近年来,非接触式测量手段逐渐成为高陡坡体信息采集的主流方法(贾曙光等, 2018; 王凤艳等, 2012)。其中,无人机技术因其快速、精确的特性,成为高陡边坡及岩体结构数据采集的首选方法(Zhao et al., 2023)。无人机倾斜摄影及贴近摄影均可构建并提取相关模型信息(陈昌富等, 2022; 李水清等, 2017)。尽管二者在不同领域已有良好应用,但单一飞行策略仍难以满足高效且精细的多精度数据采集需求。因此,融合倾斜摄影与贴近摄影的综合飞行策略成为非接触式信息采集的重要手段(Pu et al., 2025)。基于上述非接触式测量数据的结构面解译方法可分为人工解译和自动解译。人工解译主要是通过模型人为提取结构面特征点,进而提取产状、迹长等特征(王凤艳等, 2008; Yan et al., 2023)。如 Liu et al. (2022) 利用最小二乘法拟合特征点提取结构面产状等信息。而自动解译则是通过算法批量提取结构面内点云进行拟合解算,从而自动提取产状等结构面信息。如 Riquelme et al. (2014) 基于 DBSCAN 算法,批量提取了结构面信息。自动解译方法虽便捷,但解译效果受参数选取等因素影响,更适用于大尺度结构面解译。而人工识别解译方法虽耗时,但其在小范围结构面的精细化提取方面更具优势。

基于结构面信息的高陡斜坡潜在不稳定块体识别定位是后续灾害效应分析的关键步骤。

常见的识别方法有稳定性分析、块体理论及目视解译。其中，利用坡面与结构面之间的几何关系来判断不同破坏模式的运动学分析最为简捷。如 Jiang et al. (2025) 等利用赤平极射投影判识斜坡潜在破坏模式的概率。由石根华, (1981) 建立的块体理论, 主要利用交叉结构面裂隙来确定不稳定块体的形状及位置。如张奇华等, (2004) 利用块体理论定位了百色水利枢纽地下厂房的潜在不稳定块体。随着无人机等技术的发展, 基于三维实景模型的目视解译方法也成为潜在不稳定块体识别的方法之一。如 Du et al. (2025) 利用无人机技术识别了露天煤矿的潜在不稳定块体。然而, 稳定性分析及块体理论无法考虑坡体局部地形特征、结构面尺寸等因素, 目视解译则会耗费大量的时间。Menegoni et al. (2021) 为解决上述弊端, 开发了考虑斜坡局部地形及结构面位置尺寸的三维运动学分析算法, 实现了潜在不稳定块体的精确识别。落石灾害效应分析是对落石影响范围、威胁程度等评估的过程 (解明礼等, 2021)。然而, 落石轨迹、能量等灾害效应分析较为复杂, 受到的影响因素较多, 定量分析较为困难。因此, 数值模拟方法是落石灾害效应分析的主要手段 (Chen et al., 2024)。基于 3D 模型的三维落石模拟更贴合实际情况, 适用于复杂条件下的落石灾害效应分析。如黎尤等, (2022) 利用 RocPro3D 模拟了三官庙村崩塌的运动特征; 张先林等, (2023) 利用 RAMMS:Rockfall 的模拟结果对西藏樟木口岸扎美拉山进行了风险评价。RAMMS:Rockfall 考虑了落石的形态及其与地形之间的摩擦交互作用, 是进行落石动力学模拟和灾害效应分析的重要工具。

大渡河双江口水电站枢纽区位于青藏高原东缘向四川盆地过渡地带, 河谷深切, 谷坡陡峻。岸坡岩体结构面发育, 在外界扰动下局部块体易失稳, 严重威胁水电站的施工与运营安全。本文采用无人机测量技术, 重建坡表及高位岩体露头的多源精细化模型, 并开展结构面信息解译工作。然后, 通过三维运动学分析识别定位潜在不稳定块体, 并采用落石三维轨迹模拟手段分析潜在不稳定块体的动力学特征。最后, 对比分析识别潜在不稳定块体对于数值模拟结果的影响。本文提出高陡岩质斜坡潜在不稳定块体识别与灾害效应综合分析框架可为高山峡谷区落石灾害防控提供技术支撑。

1. 研究方法

为识别并分析高位潜在不稳定块体的灾害效应, 本研究融合了多源无人机倾斜、贴近摄影技术、结构面解译拟合算法、三维运动学分析以及落石数值模拟技术, 提出了一种非接触式的高位潜在不稳定块体识别定位、失稳模式判识及其灾害效应分析的综合分析框架 (图 1)。

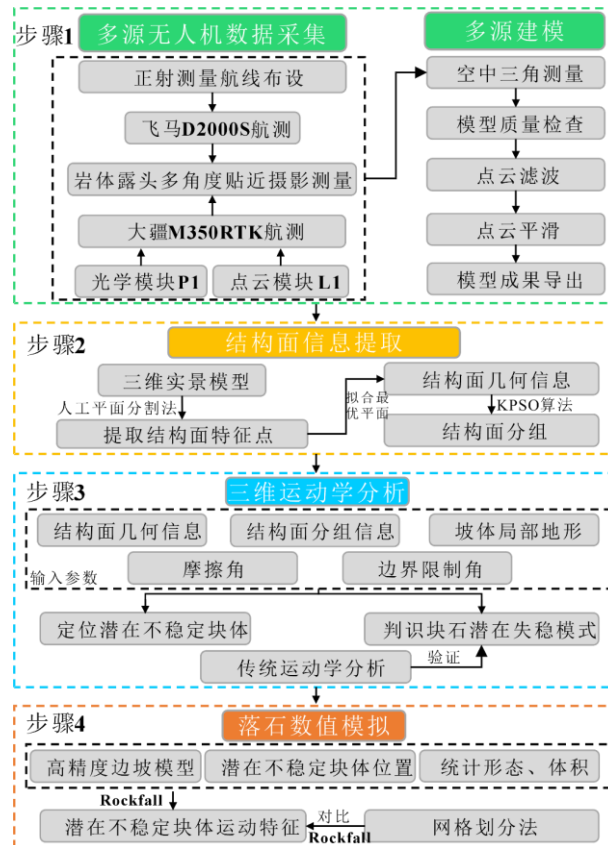


图 1 技术路线图

Figure.1 Technical roadmap

1.1 无人机多源数据采集及建模

1.1.1 无人机飞行策略

针对不同尺度的模型需求，本研究提出了结合区域仿地正射测量与重点露头多角度贴近摄影测量的无人机飞行策略，来获取不同尺度下的高精度影像数据。具体策略如下：

（1）采用配备高精度差分 GNSS 和 2520 万有效像素传感器的飞马 D2000S，基于已有地形数据，布设仿地航线，进行区域仿地正射飞行，以获取区域尺度的影像数据（图 2a）。

（2）为避免上述正射测量在重点岩体露头区域出现空洞、拉花或几何扭曲等问题（王林峰等，2025）。本研究利用集成实时运动学与全球导航卫星系统技术的大疆 M350RTK，配备大疆禅思 P1 光学镜头及大疆禅思 L1 激光雷达传感器，开展多角度贴近摄影测量（图 2b）。该方法通过近距离贴近航拍目标，并根据目标几何形态调整拍摄角度，进而提供重点露头区域的高分辨率影像和激光雷达数据（潘晓娟等，2024；安志磊等，2025）。

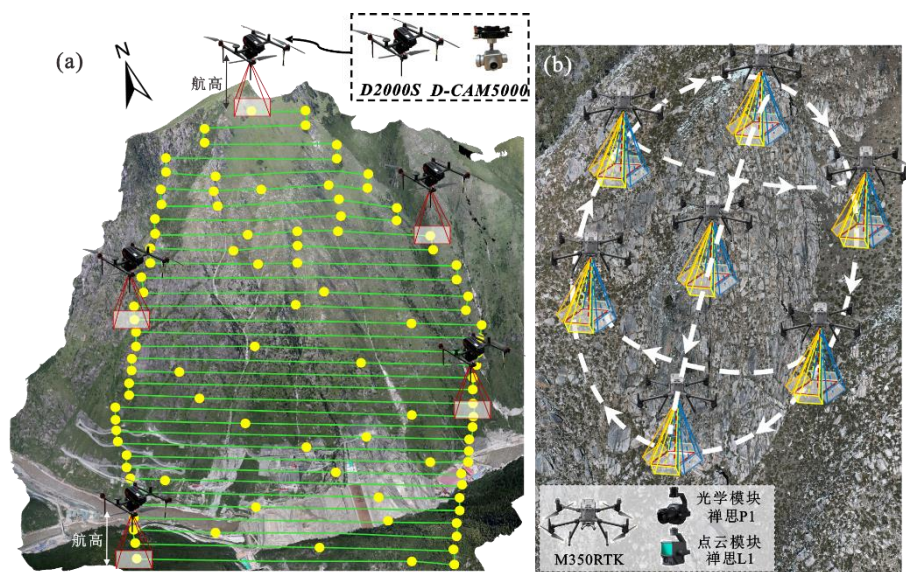


图 2 无人机飞行策略 (a) 区域仿地正射测量 (b) 重点露头多角度贴近摄影测量

Figure.2 Unmanned aerial vehicle (UAV) flight strategy. (a) Regional terrain-following flight route, (b) Multi-angle nap-of-the-object photography of key rock outcrops

1.1.2 三维模型构建

本研究首先将光学影像或激光雷达数据及其对应的空间位置信息导入 DJI Terra 软件。随后，采用尺度不变特征算法匹配图像中的关键特征，并利用运动结构恢复技术重建相机运动轨迹并生成场景的稀疏三维点云。在稀疏点云构建完成后，采用多视角立体视觉技术对稀疏点云进行密集化处理，并在密集点云基础上，利用三角剖分算法和纹理映射重建具有真实几何与色彩细节的多尺度三维模型。

1.2 结构面信息提取

1.2.1 结构面特征点提取

为精确提取重点岩体露头结构面信息，本研究基于前述高精度实景三维模型，采用人工平面分割法提取结构面数据。人工平面分割法是一种基于人机交互式的结构面平面及其特征点提取的方法 (Zhao et al., 2024)。该方法利用 ContextCapture、DasViewer 等三维模型可视化软件，目视识别结构面发育位置及其发育形态，进而提取结构面几何边界处的特征点。由于结构面出露形态不同，出露形态为近光滑平面或起伏曲面的面状结构面，解译时应沿其出露的几何边界处布设特征点。而出露有限的线状结构面，则在其表面起伏的拐点处布设特征点 (图 3)。

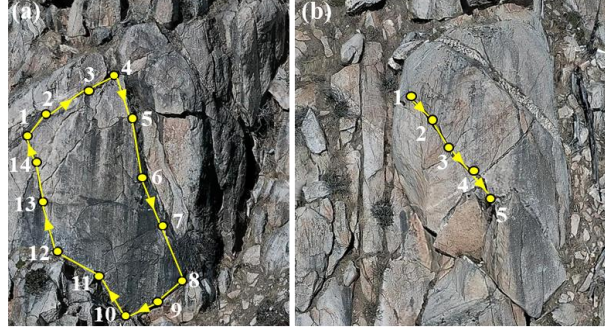


图3 人工平面分割法示意图 (a) 面状结构面提取 (b) 线状结构面提取

Figure.3 Schematic of manual planar segmentation method. (a) Extraction of planar discontinuity, (b) Extraction of linear discontinuity

1.2.2 结构面平面拟合

为描述结构面信息，本研究利用提取的结构面特征点，利用 Matlab 软件编译了结构面最优平面拟合及结构面信息提取程序(图4)。该程序首先计算特征点的质心，即 $\bar{P} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ ，见式 1，随后构造协方差矩阵并求解其特征值与特征向量，见式 2。

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (1)$$

$$C = \begin{pmatrix} \sum (x_i - \bar{x})^2 & \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ \sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) & \sum (y_i - \bar{y})^2 & \sum (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ \sum (z_i - \bar{z})(x_i - \bar{x}) & \sum (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y}) & \sum (z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中， C 为特征点集的协方差矩阵， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 为特征点质心 $\bar{P}$ 的 x 、 y 、 z 坐标， N 为特征点的数量， x_i 、 y_i 、 z_i 分别为点 i 的 x 、 y 、 z 坐标。

C 为实对称方阵，将其进行特征值分解，获取其特征向量 (v_1, v_2, v_3) 及其特征向量 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)。最小特征值对应的特征向量即为平面法向量 $N = (N_x, N_y, N_z)$ 。利用法向量换算平面的倾角 (θ) 和倾向 (ϕ)，见式 3。

$$\theta = \arctan\left(\frac{\|N\|}{C}\right) \quad \phi = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (3)$$

其中， A 、 B 和 C 分别为平面法向量在 x 、 y 和 z 轴上的分量， $\|N\| = \sqrt{A^2 + B^2}$ 为平面法向量在 x 和 y 平面上的投影长度。

最后，识别距离最远的两个点，将它们的中点作为圆心，距离作为直径，即结构面的迹长，拟合出 Baecher 圆盘。

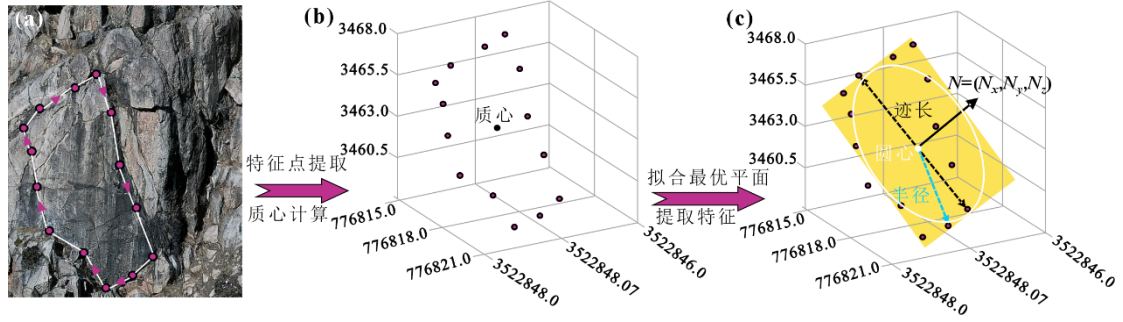


图 4 结构面平面拟合 (a) 特征点位置 (b) 提取特征点计算质心 (c) 拟合平面及 Baecher 圆盘

Figure.4 Plane fitting of discontinuity. (a) Locations of feature points, (b) Extraction of feature points and centroid calculation, (c) Fitted plane and Baecher disk

1.2.3 结构面聚类分组

结构面的分组信息是运动学分析的内在需求,相同组的结构面对破坏发生的概率有显著影响。本研究利用 KPSO 算法,依据结构面产状信息,将其聚类分组。该方法随机生成粒子群,并根据当前划分计算每一类的协方差矩阵,通过特征分解确定归一化后的聚类中心(孙林等, 2023)。同时,计算所有样本与各自聚类中心的适应度(式 4)。

$$f = \sum_{j=1}^K \sum_{e_i \in S_j} d(e_i, c_j) \quad (4)$$

其中, K 为组数, S_j 为第 j 个簇中的所有结构面, $d(e_i, c_j)$ 为第 i 个结构面距离第 j 个聚类中心的距离。

在 M 次迭代中,根据 PSO 更新公式,更新粒子的速度(式 5)和位置(式 6),确保聚类中心向最优解靠拢。

$$v_{id} = \omega v_{id} + \mu_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + \mu_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (5)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (6)$$

其中, v_{id} 为速度, x_{id} 为位置, d 为搜索方向, ω 为惯性权重, μ_1 和 μ_2 为定义的学习因子, r_1 和 r_2 为 0 到 1 范围内的随机数, p_{id} 为第 i 个粒子的个体最优解, p_{gd} 为第 i 个粒子的全局最优解。

在更新后,对每个粒子利用最近邻法则重新划分样本并更新聚类中心,重新计算适应度,并据此更新个体及全局最优解,从而确定结构面的分组信息。上述算法通过 Matlab 编程实现。

1.3 运动学分析

1.3.1 传统运动学分析

传统运动学分析是一种在赤平极射投影图上绘制结构面、坡面和摩擦圆,依据极点或交

线是否位于危险区域，进行平面破坏、楔形体破坏和弯曲破坏模式及概率分析的方法（张学东等，2017）。本研究基于上述获取的结构面产状信息，利用 Dips 软件开展传统运动学分析，其中摩擦角参考双江口水电站岩石物理力学试验结果设置为 30° ，边界限制角则选取 Menegoni et al. (2021) 推荐的 20° ，以确保分析的准确性。

1.3.2 三维运动学分析

传统运动学分析仅能考虑坡体整体发育特征及结构面倾向倾角，但坡体不同位置处地形变幅较大，同时结构面有着不同尺寸和位置，因此传统运动学分析仅能判别整体的潜在失稳模式及其发生概率。为准确识别潜在不稳定块体位置，并判识其潜在的失稳模式，本研究利用 Menegoni et al. (2021) 提出的三维运动学分析算法（ROKA）进行分析。ROKA 算法假设结构面为平面，并且遵循 Baecher 圆盘模型，同时结构面尺寸用圆盘直径替代。为充分考虑坡体局部地形特征，ROKA 算法定义了扫描圆盘尺寸参数，该参数用于提取坡体局部地形要素。扫描圆盘尺寸需综合考虑坡体点云密度、坡体几何形状的复杂性和结构面的尺寸。然后基于结构面几何特征（位置、产状、尺寸）、结构面分组信息与扫描圆盘，计算结构面或结构面交线与坡面之间的交线或交点。最后基于几何关系进行失稳模式的判识（式 7-9），与传统运动学分析相同，此处失稳模式仅考虑平面滑动、楔形体破坏和弯曲破坏。

如果结构面倾向坡外，倾角大于摩擦角 Φ 且低于结构面在坡面处的视倾角，则该结构面可能为平面滑动：

$$\begin{cases} (a) dipdir_{slope} - 90^\circ < dipdir_{discontinuity} < dipdir_{slope} + 90^\circ \\ (b) dipdir_{discontinuity} > \Phi \\ (c) dipdir_{discontinuity} < apparentdip_{slope} \end{cases} \quad (7)$$

如果两个结构面形成一个倾向坡外的交线，交线的倾角大于摩擦角 Φ 且小于结构面在坡面处的视倾角，则该两个结构面可能为楔形破坏：

$$\begin{cases} (a) dipdir_{slope} - 90^\circ < trend_{intersection} < dipdir_{slope} + 90^\circ \\ (b) dipdir_{intersection} > \Phi \\ (c) dipdir_{intersection} < apparentdip_{slope} \end{cases} \quad (8)$$

如果结构面倾向坡内，并且倾角 $< 90^\circ - \text{坡度倾角} + \text{摩擦角}$ ，则该结构面可能为弯曲破坏：

$$\begin{cases} (a) antidipdir_{slope} - 90^\circ < dipdir_{discontinuity} < antidipdir_{slope} + 90^\circ \\ (b) dip_{discontinuity} < 90^\circ - dip_{slope} + \Phi \end{cases} \quad (9)$$

1.4 落石动力学模拟

RAMMS:Rockfall 模拟软件采用硬接触刚体拉格朗日力学模型模拟落石在三维真实地

形上的复杂运动，能够预测岩石在一般地形上包括坠落、跳跃、滚动和滑动的运动轨迹。

Rockfall 采用摩擦力学控制岩石与坡面间的相互作用，使其相较于回弹系数模型具有更严谨、明确的物理学依据（Zhang et al., 2022）。因此，本研究选用该软件模拟并量化潜在不稳定块体的灾害效应。落石的数值模拟由坡体地表模型、坡体材料划分、设定模拟参数和落石模拟 4 个模块构成。坡体地表模型可由无人机正射测量结果构建。不同的地形材料对于模拟结果有着重要的影响，为避免参数选取的主观性及落石模拟结果的有效性，RAMMS 程序研发团队在大量现场试验与室内模拟对比测试给出了相关材料的选取表（表 1）。最后，将落石的密度、形态、体积、释放点和模拟次数等参数输入模型进行模拟计算。

表 1 RAMMS:Rockfall 中地形类别及摩擦参数预设值

Table 1. Specification of terrain types and preset friction parameters in RAMMS:Rockfall

地类	范例	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$	β_s	k	C_v
极软	沼泽、草地	0.2	2	50	1	0.9
软	湿草甸	0.25	2	100	1.25	0.8
中软	草甸（厚腐殖层）	0.3	2	125	1.5	0.7
中	草甸（中厚腐殖层）	0.35	2	150	2	0.6
中硬	山地草甸、未铺面山路、卵砾石	0.4	2	175	2.5	0.5
硬	岩屑堆、卵砾石、铺面公路	0.55	2	185	3	0.4
极硬	基岩、陡崖	0.8	2	200	4	0.3
雪地	雪地	0.1	0.35	150	2	0.7

2. 案例应用

2.1 研究区概况

本研究以位于四川省金川县境内的双江口水电站坝址左岸边坡一高位岩体露头为例。该地区为典型高山峡谷地貌，河谷深切，地形陡峻，高程分布在 2244-3794 m 之间，垂直高差近 1550 m。坡度分布在 15°-72°，山顶夷平面区域较缓，基岩出露区域较陡（图 5a）。该地区气候垂直差异大，2800 m 以下区域，年平均气温为 6-12℃，最低气温在-10℃以下。而 3000 m 以上区域，年平均气温在 6℃以下，极端最低气温可达-36℃。边坡主要出露燕山早期似斑状黑云钾长花岗岩（ γ_{k5}^2 ），顶部部分区域出露三叠系上统变质砂板岩（ T_3z^2 ），岩体露头为似斑状黑云钾长花岗岩，夹有伟晶岩脉（图 5b-c）。该边坡周边虽无区域性断层作用，但受鲜水河、龙门山和岷山断裂带等区域性构造的影响，地质历史上曾发生多次地震。边坡岩体在高地应力及陡峭地形引起的卸荷效应、昼夜温差和不均匀降雨引起的冻融循环和周边构造应力的共同作用下，结构面发育显著（图 5c），岩体强度劣化，进一步加剧了崩塌、落石等地质灾害的风险。

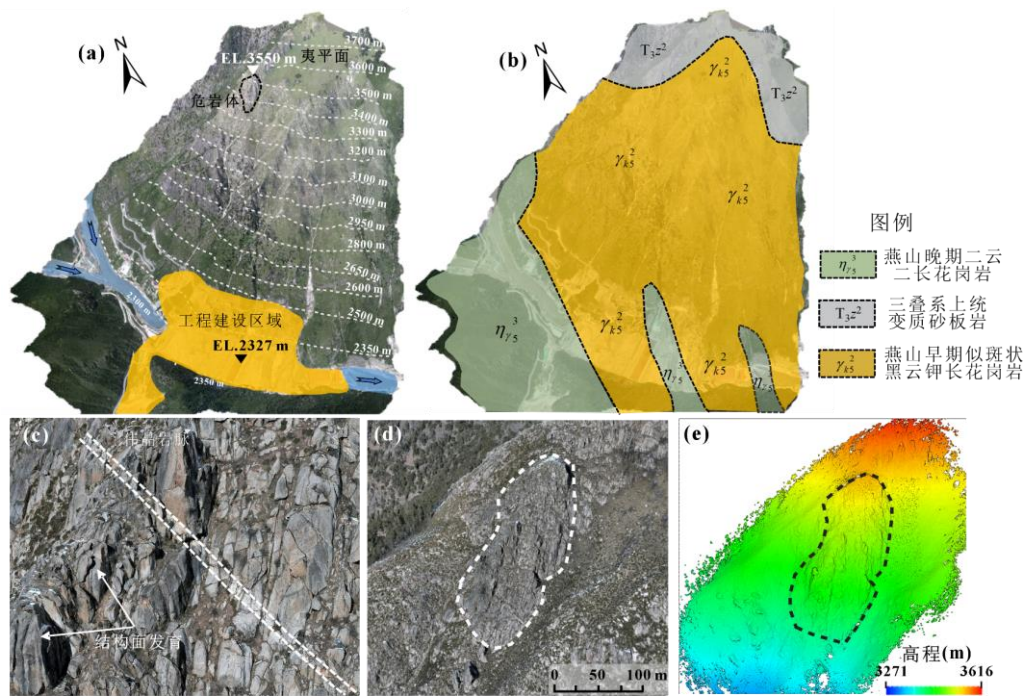


图 5 研究区概况 (a) 边坡模型 (b) 边坡岩性图 (c) 重点露头岩性及典型结构面
(d) 重点露头光学模型 (e) 重点露头点云模型

Figure.5 Overview of the study area. (a) Slope model, (b) Slope lithology map, (c) Lithology and typical discontinuity of key outcrop, (d) Optical model of key outcrop, (e) Point cloud model of key outcrop

2.2 无人机多源模型构建结果

根据 1.1.1 节中的无人机飞行策略, 本研究采用飞马 D2000S 无人机进行仿地飞行, 飞行高度设置为 230 m, 航向重叠率与旁向重叠率分别为 80%和 60%, 共获取 5365 张分辨率为 5472×3648 的光学影像。同时, 利用搭载光学与点云采集模块的大疆 M350RTK 无人机开展多角度贴近摄影测量, 飞行过程中保持与露头约 5 m 的距离, 共获取 545 张分辨率为 8192×5460 的光学影像及两组原始点云数据。随后, 将仿地飞行获取的边坡影像与贴近摄影采集的重点露头影像导入 DJI Terra 软件, 建立了边坡的三维实景模型 (图 5a、d)。该模型整体精度达 0.2 m, 重点露头区域的精度满足后续结构面手动解译的要求。同时, 通过 DJI Terra 软件生成了重点露头区域的点云模型, 点云密度为 20 cm/point, 为后续的三维运动学分析提供了高精度地形数据支持。

2.3 重点露头结构面解译

本研究基于 1.2 节的结构面解译聚类方法, 对露头结构面进行解译及分组。本研究共识别四组 938 处结构面 (图 6a), 每组的聚类中心分别为 J1: 89°∠84°, J2: 219°∠56°, J3: 146°∠65°, J4: 51°∠61° (图 6b)。其中, J2 占比最多为 36.3%, 伟晶岩脉侵入所形成的 J4 占比最少为 4.8%。J1 与 J3 相互切割且倾向坡外, 在 J2 作用下, 易形成不稳定块体。

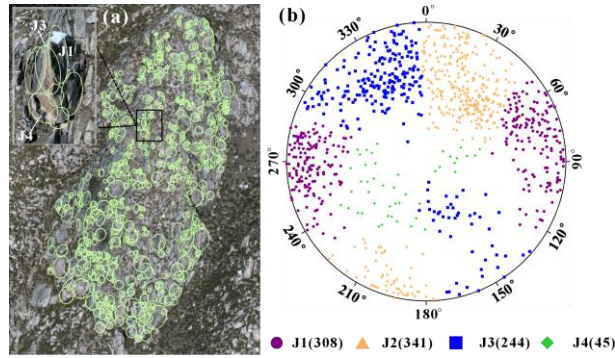


图 6 结构面解译结果 (a) 结构面分布 (b) 结构面聚类结果

Figure.6 Interpretation results of discontinuities. (a) Distribution of discontinuities, (b) Clustering Results of discontinuities

2.4 传统运动学分析结果

本研究基于边坡三维模型提取了该露头处的平均方向 ($160^\circ \angle 60^\circ$)，传统运动学分析结果见图 7。结果表明，楔形体破坏为该露头最主要的破坏模式，破坏概率可达 21.09%。而平面滑动与弯曲破坏概率较低，分别为 2.88% 和 2.13%。由结构面组合关系可知，J3 为关键结构面，其与 J1 和 J4 组合易形成楔形体破坏。同时，其倾向与坡面近乎平行，因此对平面滑动与弯曲破坏同样具有显著的控制作用，在 J3 中发生平面滑动的概率为 11.07%，弯曲破坏的概率为 6.57%。尽管 J2 为该区内分布最广泛的结构面，但其对露头影响相对较小。

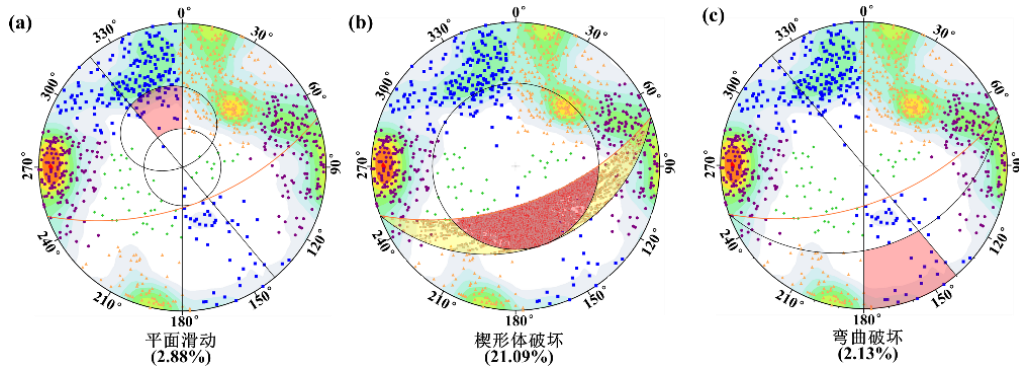


图 7 传统运动学分析结果 (a) 平面滑动 (b) 楔形体破坏 (c) 弯曲破坏

Figure.7 Results of Kinematic analysis. (a) Planar sliding, (b) Wedge failure, (c) Flexural failure

2.5 三维运动学分析结果

在传统运动学分析的基础上，本研究采用 ROKA 算法对该露头进行了三维运动学分析 (图 8)。为确保扫描圆盘能够准确捕捉关键地形特征，本研究设定了扫描半径 1 m、摩擦角 30° 和边界限制角 20° 。结果表明，该露头的潜在破坏模式主要为楔形体破坏。平面滑动及弯曲破坏的分布较为局限，主要集中在陡坡区域。其中，J2 在平面滑动破坏中具有显著激活效应，占该破坏模式的 7.33%。而垂直于坡面的 J1 与平行于坡面的 J3 则分别作为弯曲破坏的主要激活面，其贡献比例分别达到 44.98% 和 39.24%。基于识别结果定位了 92 处潜在不稳

定块体。其中，潜在破坏模式为楔形体破坏的块体共 39 块，平面滑动与弯曲破坏的块体分别为 22 和 31 块。

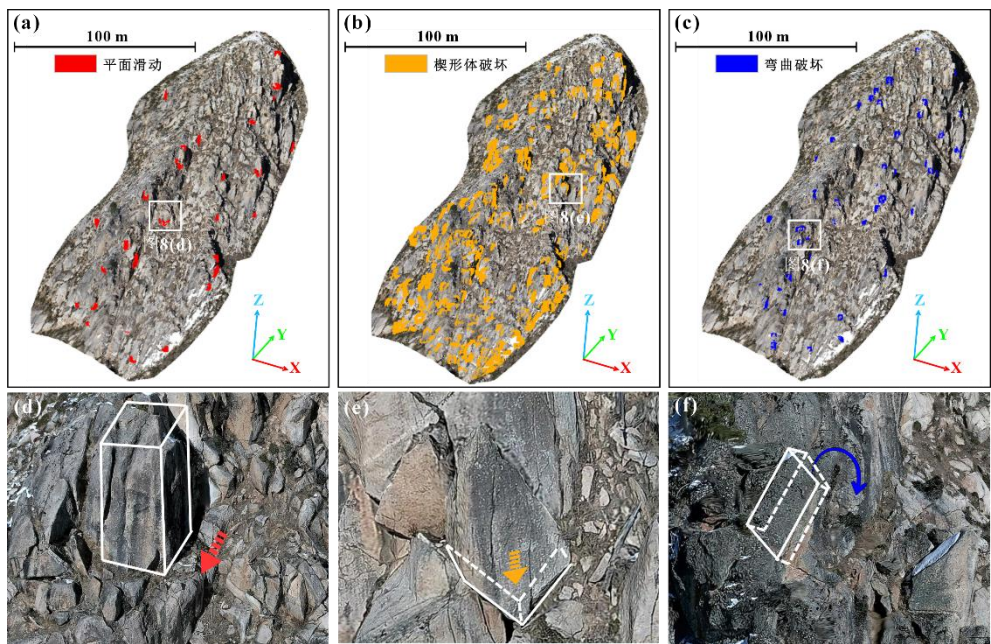


图 8 ROKA 结果 (a) 平面滑动 (b) 楔形体破坏 (c) 弯曲破坏 (d) 典型平面滑动
(e) 典型楔形体破坏 (f) 典型弯曲破坏

Figure.8 ROKA results. (a) Planar sliding, (b) Wedge failure, (c) Flexural failure, (d) Representative planar sliding, (e) Representative wedge failure, (f) Representative flexural failure

2.6 落石轨迹数值模拟结果

2.6.1 模型构建

为捕获边坡地形特征并保证计算效率，本次模拟选用 0.5m×0.5 m 精度的数字高程模型。模拟参数结合现场调查和 RAMMS 预定义的地形材料模型（表 1）来分配。该边坡为岩质边坡，植被稀疏，边坡中下部为坚硬的基岩，边坡顶部区域存在碎石土，但其厚度较薄，落石的穿透深度较小。因此基于预定义的地形材料模型（表 1），将边坡中下部区域定义为极硬地形，顶部区域定义为硬地形，工程建设地区定义为硬地形，并采用相应的摩擦参数预设值。

本次模拟选取三维运动学结果获取的 92 处潜在不稳定块体作为释放点。利用 CloudCompare 统计潜在不稳定块体的体积及形态，块体形态依据（Palmström., 2001）提出的理论进行分类（图 13a）。统计结果显示，潜在不稳定块体体积多数位于 0-20 m³ 区间内，且形状多为长棱柱杆状。由于 ROKA 算法未考虑结构面张开度、粗糙度等特征，因此识别出面积较大的潜在不稳定块体，但体积较大的块体多数处于稳定状态。因此，本研究模拟选用潜在不稳定块体体积分布较多的 20 m³，形态选择长棱柱杆状，释放点为潜在不稳定块体位置（图 9）。块体密度参数参考双江口水电站岩石物理力学试验结果设定为 2.65 g/cm³。

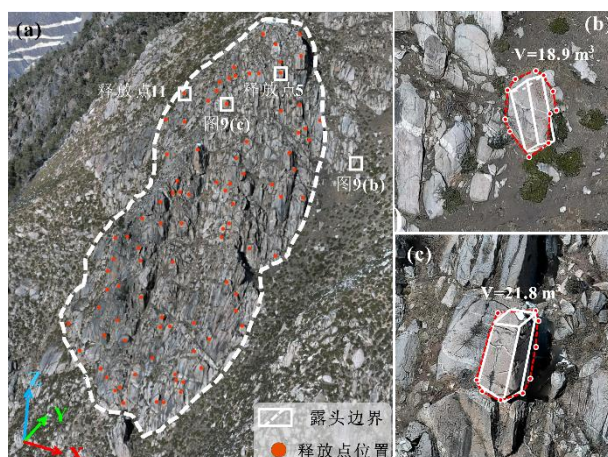


图 9 释放点位置 (a) 释放点分布 (b) 典型落石 (c) ROKA 典型结果

Figure.9 Release points locations. (a) Distribution of release points, (b) Representative rockfall block, (c) Typical ROKA results

2.6.2 Rockfall 模拟结果

基于上述模型，通过每个释放点发射 30 个岩块来预测落石轨迹，并量化每条轨迹的能量、速度和弹射高度。本次模拟共获取 2760 条轨迹及其动能、速度和跳跃高度结果。由图 10 结果可知，块体运动整体呈现加速-减速的循环趋势。露头东侧为陡崖，导致东西两侧块体在启动后存在明显的速度和能量差异。东侧块体启动后撞击地面加速至 25-30 m/s，峰值能量可达 3.0×10^4 kJ。而同一高度的西侧块体速度仅能达到 15-20 m/s，峰值能量仅有 1.6×10^4 kJ。随后，块体沿沟道下落。当西侧块体到达沟道汇聚口时，其撞击沟道基岩加速至 25-35 m/s，部分块体速度达到峰值 39.4 m/s，能量增至 2.9×10^4 kJ。轨迹汇合后，块体沿沟道运动并多次撞击沟道基岩，速度与能量再次增加，峰值能量达到 4.3×10^4 kJ，峰值跳跃高度可达 32 m。最终沿沟道停积，块体最远运动距离为 845.6 m，对坝址影响较小。

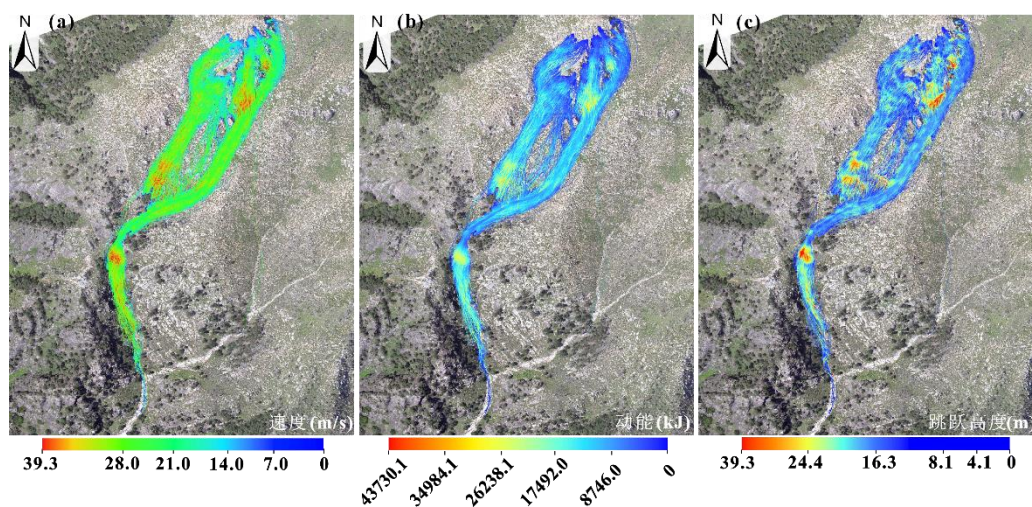


图 10 落石轨迹数值模拟结果 (a) 速度 (b) 动能 (c) 跳跃高度

Figure.10 Numerical simulation results of rockfall trajectories. (a) velocity distribution model, (b) kinetic energy distribution model, and (c) jump height distribution model

为对比露头两侧由地形差异导致的不同动力学特征,选取露头东西两侧运动距离最远且动能最大的释放点 5 和释放点 11 作为典型释放点,绘制了块体运动轨迹剖面及动力学参数变化曲线(图 11)。结果表明,同一释放点的块体运动轨迹及能量分布存在着显著差异,这表明落石的致灾能力具备较强的不确定性。同时,这也强调了识别定位不稳定块体对于落石模拟的重要性。露头东西两侧地形差异,导致东侧释放点 5 的峰值能量达到 3.0×10^4 kJ,而西侧释放点 11 峰值能量为 2.5×10^4 kJ。这一结果表明,高位落石的能量显著高于低处落石,进一步证实了高位落石具有更强的致灾能力。

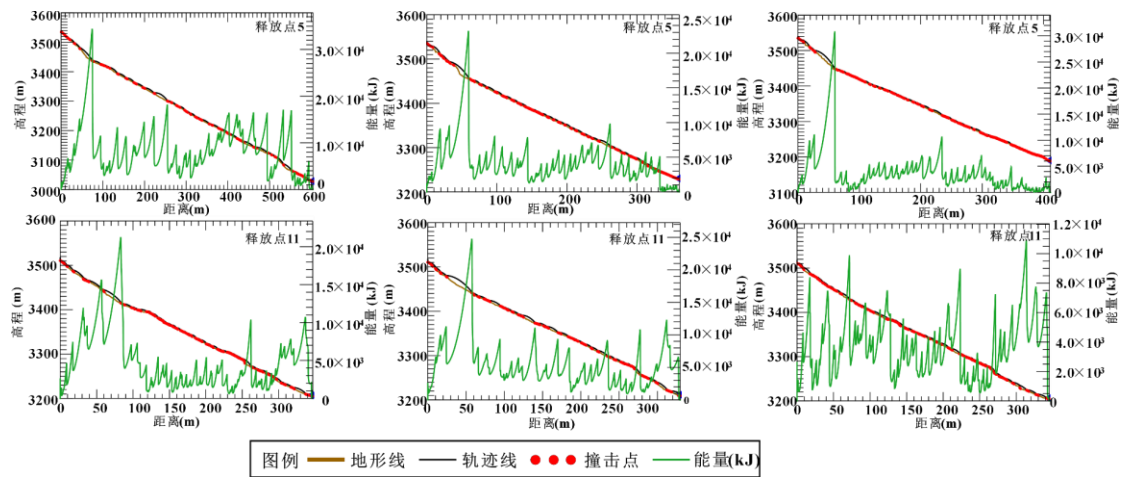


图 11 释放点 5 和 11 的块体运动轨迹剖面及块体动力学参数变化曲线

Figure.11 Profiles of block trajectories and dynamic parameter variation for release points 5 and 11

3. 讨论

3.1 无人机融合飞行策略优势

高精度的三维实景和点云模型是后续结构面解译及灾害效应分析的重要数据基础。本研究基于上述目的,提出了融合仿地正射和多角度贴近摄影测量的无人机飞行策略,以同时满足广域数据获取与局部精细重建的多尺度精度需求。为评估该飞行策略的优越性,本研究对比研究露头处的模型结果(Wang et al., 2022)。

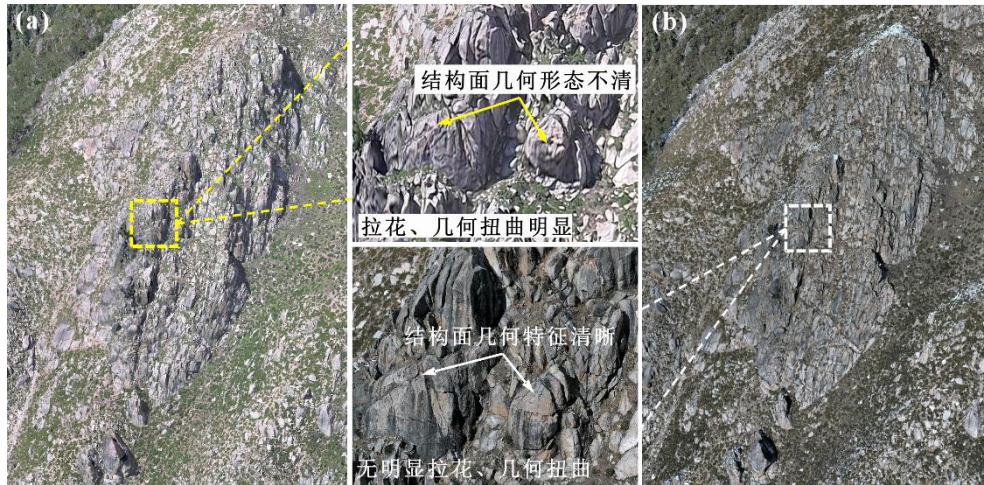


图 12 研究露头光学实景模型 (a) 仿地正射生成影像 (b) 多角度贴近摄影测量生成影像
Figure.12 Optical real scene outcrop models. (a) Terrain-following orthophoto derived imagery, (b) Multi-angle nap-of-the-object photography derived imagery

如图 12 所示，两个模型精度存在显著差异。仿地正射模型结果在研究露头区域存在严重的拉花和几何扭曲，难以满足结构面手动解译需求，而多角度贴近摄影测量模型结果同一位置处结构面几何特征清晰，可实现快速高效的手动结构面提取。因此，融合飞行策略不仅能够获取不同尺度模型，还可显著提升模型几何精度及结构面手动解译效率。

3.2 三维运动学结果可靠性及优势

为凸显三维运动学分析在灾害效应分析中的可靠性及优势，本研究将传统运动学结果和区域周边落石统计数据与三维运动学识别结果进行对比。从破坏模式概率来看，三维运动学识别出 12.11% 的结构面交线主导岩体发育楔形体破坏，传统运动学结果为 21.09%。虽然数值存在差异，但均表明楔形体破坏为该露头主要失稳模式，符合现场认知。而差异性在于，传统运动学不考虑结构面在三维空间中的位置与尺寸，允许不相邻结构面相交，从而高估楔形体破坏的可能性，使其概率结果显著高于 ROKA 算法。这一结果表明，三维运动学结果通过引入局部地形、结构面位置与尺寸等因素，提高了破坏概率估计精度。

为进一步验证 ROKA 算法在识别潜在不稳定块体方面的准确性，本研究利用 2.2 节中生成的高精度三维实景模型，对计算区域周边 41 块落石的体积与形态进行了统计分析 (Mineo et al., 2025)。图 13 统计结果显示，不稳定块体体积主要集中在 0-20 m³ 区间，形态以长棱柱杆状为主。该分布与 ROKA 算法识别出的不稳定块体在体积与形态上的结果高度一致，进一步证明了该算法在潜在不稳定块体识别方面的有效性与可靠性。

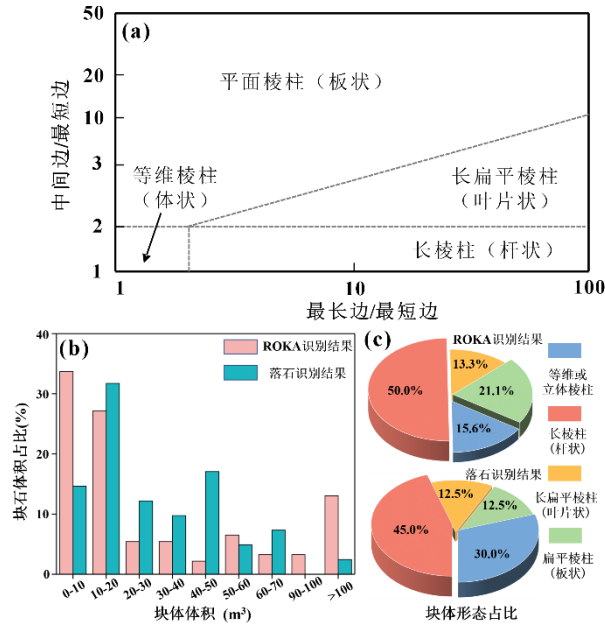


图 13 统计结果 (a) 形状分类图 (Palmström, 2001) (b) 块体体积统计结果 (c) 块体形态统计结果
Figure.13 Statistical results. (a) Shape categorization maps (Palmström, 2001), (b) Block volume statistics, (c) Block morphology statistics

基于上述结果可知,基于三维运动学识别的潜在不稳定块体及其破坏模式与传统运动学分析和周边落石具有良好的一致性,且能够快速、高效且准确的量化及可视化高位区域不同破坏模式的潜在不稳定块体位置及形态。

3.3 潜在不稳定块体识别对灾害效应的影响

为突出潜在不稳定块体对于量化灾害效应的影响,本研究将基于三维运动学的模拟结果与提出的网格划分法释放点的模拟结果进行对比分析。其中,网格采取 10m×10m 进行划分,共获取 130 个释放点。除释放点不同外,其余参数均与 2.5.2 节中保持一致。其中,网格划分法确定的释放点在区域内均匀分布,而 ROKA 算法确定的释放点则在区域内呈现局部集中分布的特点 (图 14a)。

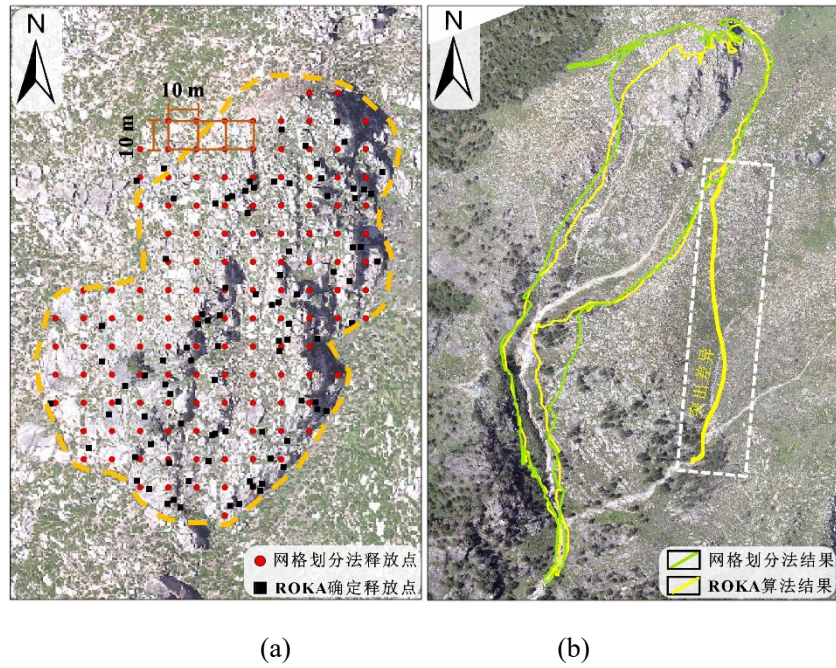


图 14 数值模拟对比结果 (a) 不同释放点位置 (b) 轨迹覆盖范围

Figure.14 Comparison results of numerical simulations. (a) Different release points locations, (b) Trajectory coverage range

为量化突出两种数值模拟结果的差异，本研究提取并比较了两种方法的轨迹覆盖范围（图 14b）。网格划分法在 130 个释放点上共生成 3900 条轨迹，覆盖面积为 $7.23 \times 10^4 \text{ m}^2$ ；ROKA 算法确定的 92 处释放点共生成了 2760 条轨迹（为网格划分法轨迹数量的 70%），覆盖面积为 $6.16 \times 10^4 \text{ m}^2$ （图 14b）。两种方法的轨迹有 85% 区域重叠，表明在减少 30% 释放点的条件下，ROKA 算法仍能高度重现网格划分法结果的主要运动趋势及范围。此外，ROKA 算法结果出现两条从东侧逸出并停留的轨迹，而网格划分法结果未模拟出该路径。这一差异源于固定尺度网格难以捕捉局部地形复杂性，易忽视局部陡峻地形的潜在不稳定块体。若位于局部陡峻地形下的块体失稳，其初始势能和运动速度显著高于缓坡区域，且运动方向更易偏移。而 ROKA 算法考虑了局部地形发育，其识别的潜在不稳定块体位置则更为全面，因而能模拟出东部沟道逸出轨迹。

综上所述，基于网格划分法所确定的释放点均匀分布，易布设至稳定区域，导致落石威胁范围被动扩大，而 ROKA 算法仅用网格划分法 70% 的释放点，即可重现 85% 的轨迹覆盖区域，体现了其准确的识别能力及效率。此外，固定尺度的网格划分法难以反映局部地形特征，ROKA 算法则考虑了局部地形特征及结构面特征，因此识别的潜在不稳定块体更为精确。这不仅有助于量化准确的灾害发育特征，也显著提高了落石运动模拟的精度与可靠性。

4. 结论

本文提出了一种融合无人机摄影测量技术、结构面解译算法、三维运动学分析及数值模拟的高陡岩质斜坡潜在不稳定块体识别及灾害效应量化分析的综合分析框架。依据该框架对双江口水电站坝址左岸一高位岩体露头进行了案例研究，取得的主要结论如下：

（1）基于提出的融合仿地正射及多角度贴近摄影测量的新型无人机飞行策略，弥补了纹理扭曲现象，建立了重点露头结构清晰且分辨率达 0.2 m 的三维边坡模型以及点云密度为 20 cm/point 的重点露头点云模型。基于该模型共提取解译出 938 处结构面，并利用 KPSO 聚类算法将其划分为四组结构面，聚类中心分别为 J1: $89^{\circ}\angle 84^{\circ}$ ；J2: $219^{\circ}\angle 56^{\circ}$ ；J3: $146^{\circ}\angle 65^{\circ}$ ；J4: $51^{\circ}\angle 61^{\circ}$ 。

（2）传统运动学与三维运动学分析结果均表明楔形体破坏是该区域最主要的潜在失稳模式。三维运动学分析共识别出 92 处潜在不稳定块体，多数块体体积分布在 0-20 m³，形态多呈长棱柱杆状。结合周边落石统计结果进行对比验证，结果表明该方法可有效量化并可视化高陡边坡不同破坏模式下的潜在不稳定块体空间分布及几何特征。

（3）基于识别出的潜在不稳定块体，利用 RAMMS:Rockfall 模拟并量化了 2790 条轨迹及其动能、速度和跳跃高度结果。结果显示，块体运动呈加速-减速交替变化趋势，最大运动距离为 845.6 m，对水电站坝址的影响较小。与网格划分法布设释放点的模拟结果对比，本方法在释放点数量减少约 30%的情况下，仍与网格划分法结果存在 85%区域重叠。同时，考虑了局部地形及结构面特征的识别结果在落石轨迹精度与可靠性方面具有显著优势。

Reference

- An Z L., Wang F Y., Wang M C., et al., 2025. Rapid flight path planning and application of high and steep slopes based on UAV multi-pose nap-of-the-object photogrammetry. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* , 55(01): 209-222 (in Chinese with English abstract).
- Chen C F., He K Y., Yu J Y., et al., 2022. Identification of discontinuities of high steep slope based on UAV nap-of-the-object photography. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)* , 49(01): 145-154 (in Chinese with English abstract).
- Gao B L., Zhang J H., Zhang L Q., 2022. Deterioration characteristics of structural plane and dynamic instability mechanism of high dangerous rock mass under earthquake. *Earth Science*, 47(12): 4417-4427 (in Chinese with English abstract).
- Jia S G., Jin A B., Zhao Y Q., 2018. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope. *Rock and Soil Mechanics*, 39(03): 1130-1136 (in Chinese with English abstract).
- Xie M L., Ju N P., Liu Y K., et al., 2021. A study of the risk ranking method of landslides and collapses. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(05): 184-192 (in Chinese with English abstract).
- Li S Q., Zhang H C., Liu R Y., 2017. Semi-automatically counting orientations of rock mass structural plane based on unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Science Technology and Engineering*, 17(26): 18-22 (in Chinese with English abstract).
- Li Y., He K., Hu X W., et al., 2022. Formation characteristics and kinematics 3-D simulation of rockfall evolved from shattered mountain—case study of Sanguanmiao Village rockfall in Wenchuan County. *Journal of Engineering Geology*, 30(02): 542-552 (in Chinese with English abstract).
- Pan X J., Zhang W., Sun Q., 2024. Complex structural plane distribution of high-steep rockslope and division of statistical homogeneous zones. *Earth Science*, 49(09): 3334-3346 (in Chinese with English abstract).
- Shi G H., 1981. Geometric Methods for Rock Mass Stability Analysis. *Scientia Sinica*, (04): 487-495 (in Chinese with English abstract).
- Sun L., Zhang Y M., Zhang C K., et al., 2023. Optimization algorithm using improved particle swarm and K-means clustering. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 37(03): 81-90 (in Chinese with English abstract).
- Wang F Y., Chen J P., Fu X H., et al., 2008. Study on geometrical information of obtaining rock mass discontinuities based on VirtuoZo. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (01): 169-175 (in Chinese with English abstract).
- Wang F Y., Chen J P., Yang G D., et al., 2012. Solution models of geometrical information of rock mass discontinuities based on digital close range photogrammetry. *Journal of Jilin*

- University(Earth Science Edition)*, 42(06): 1839-1846 (in Chinese with English abstract).
- Wang L F., Jiang H., Tang N., et al., 2025. Three-dimensional reconstruction and structural surface identification of high steep slopes based on UAV close-range photogrammetry. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(01): 92-100 (in Chinese with English abstract).
- Xiong K Z., Ren Z Y., Zhao Y L., et al., 2021. 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. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(05): 62-69 (in Chinese with English abstract).
- Yu Z Y., Cheng Y X., Lv Y., et al., 2022. Rockfall hazard assessment in canyon areas incorporating regional-scale identification of potential rockfall source areas. *Journal of Engineering Geology*, 30(05): 1583-1596 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q H., Wu Q A., Shi G H., 2004. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in baise hydraulic project. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (15): 2609-2614 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X L., Zhang J., Liu T., et al., 2023. Risk assessment of monomer rockfall based on 3D numerical simulation: A case study of Zhameila mountain at Zhangmu port, Tibet. *Journal of Natural Disasters*, 32(04): 61-69 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X D., Liu X F., Yi X F., et al., 2017. Kinematic analysis of rock slope stability. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 36(02): 50-53 (in Chinese with English abstract).
- Zhou C K., Li Y Y., Wang N T., et al., 2021. Application of micro unmanned aerial vehicle in a quick investigation and stability assessment of high dangerous rock mass. *Science Technology and Engineering*, 21(10): 3920-3928 (in Chinese with English abstract).
- Chen L., Zeng W Q., Wang X B., et al., 2024. A Three-Dimensional DEM Method for Trajectory Simulations of Rockfall under Irregular-Shaped Slope Surface and Rock Blocks. *Journal of Earth Science*, 35(1): 306-312. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1959-3>
- Du W J., Sheng Q., Fu X D., et al., 2025. Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing on Dangerous Rock Mass Identification and Deformation Analysis : Case Study of a High-Steep Slope in an Open Pit Mine. *Journal of Earth Science*, 36(2): 750-763. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1813-7>
- Jiang T., Wei Y F., Cui S H., et al., 2025. 3D rockfall trajectories analysis considering earthquake-induced initial velocities : a case study in Nujiang Bridge area , China. *Landslides*, 22: 2055-2072. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02468-0>
- Liu Y Q., Chen J P., Tan C., et al., 2022. Intelligent scanning for optimal rock discontinuity sets considering multiple parameters based on manifold learning combined with UAV photogrammetry. *Engineering Geology*, 309: 106851. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106851>
- Menegoni N., Giordan D., Perotti C., 2021. An Open-Source Algorithm for 3D ROck Slope

- Kinematic Analysis (ROKA). *Applied Sciences Basel*, 11(4): 1698.
<https://doi.org/10.3390/app11041698>
- Mineo G., Rosone M., Cappadonia C., 2025. Semi-Automated rock block volume extraction from high-resolution 3D point clouds for enhanced rockfall hazard analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 185: 105982.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105982>
- Palmström A., 2001. In-Situ Characterization of rocks. Norway: A. A. BALKEMA, 49-97.
- Pu C L., Zhan J W., Huang D., et al., 2025. Interpretation and Characterization of Sedimentary Rock Mass Structure Using UAV Multi-Sensor Data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,
<https://doi.org/10.1007/s00603-025-04514-8>
- Riquelme A J., Abelian A., Tomas R., et al., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computer & Geosciences*, 68: 38-52.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Wang W., Zhao W B., Chai B., et al., 2022. Discontinuity interpretation and identification of potential rockfalls for high-steep slopes based on UAV nap-of-the-object photogrammetry. *Computers & Geosciences*, 166: 105191. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105191>
- Yan J H., Chen J P., Tan C., et al., 2023. Rockfall source areas identification at local scale by integrating discontinuity-based threshold slope angle and rockfall trajectory analyses. *Engineering Geology*, 313: 106993. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.106993>
- Zhang W., Zhao X H., Pan X J., et al., 2022. Characterization of high and steep slopes and 3D rockfall statistical kinematic analysis for Kangyuqu area , China. *Engineering Geology*, 308: 106807. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106807>
- Zhao M Y., Chen J P., Song S Y., et al., 2023. Proposition of UAV multi-angle nap-of-the-object image acquisition framework based on a quality evaluation system for a 3D real scene model of a high-steep rock slope. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125: 103558. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103558>
- Zhao M Y., Song S Y., Wang F Y., et al., 2024. A method to interpret fracture aperture of rock slope using adaptive shape and unmanned aerial vehicle multi-angle nap-of-the-object photogrammetry. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*, 16(3): 924-941.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.07.010>

附中文参考文献

- 安志磊,王凤艳,王明常,等, 2025. 基于无人机多姿态贴近摄影测量的高陡边坡快速航线规划及应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 55(01): 209-222.
- 陈昌富,何旷宇,余加勇,等, 2022. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别. *湖南大学学报(自然科学版)*, 49(01): 145-154.
- 高丙丽,张金厚,张路青, 2022. 地震作用下结构面劣化特征及高位危岩体动力失稳机制. *地球*

- 科学, 47(12): 4417-4427.
- 贾曙光,金爱兵,赵怡晴, 2018. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用. 岩土力学, 39(03): 1130-1136.
- 解明礼,巨能攀,刘蕴琨,等, 2021. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究. 水文地质工程地质, 48(05): 184-192.
- 李水清,张慧超,刘乳燕, 2017. 无人机摄影测量半自动统计岩体结构面产状. 科学技术与工程, 17(26): 18-22.
- 黎尤,何坤,胡卸文,等, 2022. 震裂山体崩塌形成特征及运动学三维模拟——以汶川县三官庙村崩塌为例. 工程地质学报, 30(02): 542-552.
- 石根华, 1981. 岩体稳定分析的几何方法. 中国科学, (04): 487-495.
- 孙林,张一曼,张辰珂,等, 2023. 基于改进粒子群和K-means聚类的优化算法. 江苏科技大学学报(自然科学版), 37(03): 81-90.
- 王凤艳,陈剑平,付学慧,等, 2008. 基于VirtuoZo的岩体结构面几何信息获取研究. 岩石力学与工程学报, (01): 169-175.
- 王凤艳,陈剑平,杨国东,等, 2012. 基于数字近景摄影测量的岩体结构面几何信息解算模型. 吉林大学学报(地球科学版), 42(06): 1839-1846.
- 王林峰,蒋辉,唐宁,等, 2025. 无人机贴近摄影技术在高陡边坡的三维重建与结构面识别中的应用. 中国地质灾害与防治学报, 36(01): 92-100.
- 熊开治,任志远,赵亚龙,等, 2021. 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——以重庆四面山景区为例. 中国地质灾害与防治学报, 32(05): 62-69.
- 俞朝悦,成玉祥,吕艳,等, 2022. 融合区域潜在落石源区识别的峡谷区落石危险性评价. 工程地质学报, 30(05): 1583-1596.
- 张奇华,邬爱清,石根华, 2004. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用. 岩石力学与工程学报, (15): 2609-2614.
- 张先林,张继,刘桃,等, 2023. 基于三维数值模拟的单体崩塌风险评价——以西藏樟木口岸扎美拉山为例. 自然灾害学报, 32(04): 61-69.
- 张学东,刘向飞,衣雪峰,等, 2017. 岩质边坡稳定性的运动学分析. 水利水电工程设计, 36(02): 50-53.
- 周成凯,李远耀,王宁涛,等, 2021. 基于小型无人机的高位危岩快速调查与稳定性评价. 科学技术与工程, 21(10): 3920-3928.