

基于图像识别估算碎裂岩崩体积方法研究

黄祥, 黄健, 贺子城, 王豪

Study on the method of estimating the volume of fragmental rockfall based on image recognition

HUANG Xiang, HUANG Jian, HE Zicheng, and WANG Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于颗粒识别分析系统的碎屑流堆积物颗粒识别和统计方法研究

Particle identification and statistical methods of a rock avalanche accumulation body based on the particle analysis system

陈达, 许强, 郑光, 彭双麒, 王卓, 何攀 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 60-69

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59

基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150-156

无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope

黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149-155

基于数字图像处理的颗粒流厚度动态提取方法研究

A study of the dynamic extraction method for granular flow thickness based on digital image processing

吴越, 李坤, 程谦恭, 王玉峰, 龙艳梅, 姜润昱, 宋章, 刘毅 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 151-159

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211055

黄祥, 黄健, 贺子城, 等. 基于图像识别估算碎裂岩崩体积方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 140-148.
HUANG Xiang, HUANG Jian, HE Zicheng, et al. Study on the method of estimating the volume of fragmental rockfall based on image recognition[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 140-148.

基于图像识别估算碎裂岩崩体积方法研究

黄祥¹, 黄健², 贺子城³, 王豪²

(1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 西南山区碎裂岩崩灾害频发, 为了准确模拟岩崩运动过程, 量化岩崩风险大小, 必须明确崩塌体体积, 但目前尚无一种有效且可靠的碎裂岩崩体积估算方法。基于此, 提出一种基于图像识别技术的碎裂岩崩体积精细估算方法, 并以 2020 年雅西高速石棉姚河坝崩塌为例进行应用与验证。通过现场实测与无人机贴近摄影测量方法, 确定岩崩堆积区分区及采样区; 利用图像处理开源软件(ImagePy), 建立块体快速识别步骤, 提取块体等效粒径、周长和面积等特征参数; 构建基于块体体积分布的碎裂岩崩体积估算方法; 以岩崩实例进行方法应用与验证。研究结果表明: (1) ImagePy 软件对块体图像识别速度快、精度高; (2) 获取的块体体积分布曲线与现场实测体积分布规律近一致; (3) 姚河坝岩崩体积估算值占三维点云数据差分法获取体积近 80%。综上, 利用图像识别技术进行碎裂岩崩块体体积提取与体积估算的方法是可行的, 并具有高效率与准确性优势, 可应用于碎裂岩崩灾害快速评估与风险量化评价, 统计的块体体积分布可为碎裂研究提供数据支撑。

关键词: 岩崩堆积体; 图像识别; 粒径分布; 精细估算

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0140-09

Study on the method of estimating the volume of fragmental rockfall based on image recognition

HUANG Xiang¹, HUANG Jian², HE Zicheng³, WANG Hao²

(1. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610052, China; 2. The State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Power China Northwest Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: There are frequent cataclastic rockfall disasters in southwest mountainous areas. To accurately simulate the process of rockfall movement and quantify the risk of rockfall, it must first determine the volume of rockfall. However, to date, there is no effective and reliable method to estimate the volume of rockfall. This study constructed an effective method of estimating cataclastic rock rockfall volume based on image recognition. The application and verification of this method was conducted at the rockfall of Yaohe Dam in Shimian of Yaxi Expressway in 2020. Through in-site measurement and close photogrammetry of UAV, the partition and sampling

收稿日期: 2022-11-18; 修订日期: 2023-04-06

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(41521002)

第一作者: 黄祥(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险评价方面的研究工作。E-mail: 2814094059@qq.com

通讯作者: 黄健(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质工程和岩土工程的教学和科研工作。E-mail: huangjian2013@cdut.edu.cn

area of rockfall accumulation area are determined. Using the open-source software of image processing (ImagePy), a quick block identification step is established, and characteristic parameters, such as equivalent particle size, perimeter, and area of blocks, are extracted. The method of estimating the volume of cataclastic rock rockfall based on the volume distribution of blocks was applied and verified by rock rockfall in the field. The results show that: (1) ImagePy software has high speed and accuracy in block image recognition; (2) The obtained distribution curve of rock volume is nearly consistent with that measured in the field; (3) The estimated volume of rock rockfall in Yaohe Dam accounts for nearly 80% of the volume obtained by three-dimensional point-cloud difference method. Thus, it is feasible to use image recognition technology to extract the particle size and estimate the size of cataclastic rock mass, and it has the advantages of high efficiency and accuracy. This method can be applied to rapid assessment of cataclastic rock mass and quantitative risk assessment. Statistical block volume distribution can provide data support for fragmentation research.

Keywords: rockfall deposits; image identification; particle size distribution; detailed estimate

崩塌作为一种山区常见地质灾害类型, 具有显著的隐蔽性、突发性及灾难性特征。随着全球极端气候事件频发, 近年我国西南山区时常出现大型高位碎裂化岩崩灾害, 造成重大人员伤亡与财产损失。2013年2月18日, 贵州凯里龙场镇崩塌, 体积达 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 形成厚度达 20 m、宽 100 m 堰塞坝体; 2017年8月28日, 贵州纳雍张家湾镇普洒村崩塌, 方量约 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$, 形成碎屑流, 堆积体厚度约 4 m, 直接造成 35 人遇难; 2017年6月24日, 四川茂县叠溪镇新磨村高位岩崩-碎屑流灾害, 体积约 $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 造成新磨村 64 户农房被埋, 10 人死亡、73 人失踪, 堵塞河道 1 km。可见, 山区高位高危崩塌, 由于势能大, 一旦发生破坏, 往往会形成高速远程碎屑流灾害, 破坏力巨大。目前针对高位岩崩灾害, 主要研究其运动轨迹、致灾机理及风险评价^[1-3], 如采用数值模拟^[4]和物理模拟^[5]获取岩崩运动过程及堆积特征。但对于碎裂岩崩的体积大小, 在现场调查中, 往往依据技术人员的经验进行估算, 由于碎裂块体分散且分布范围大, 常造成与实际情况存在较大的偏差。但是, 岩崩体积恰恰又是风险量化评价中一个非常关键的参数, 是研究历史崩塌体积-频率规律特征的基础。为此, 开展碎裂化岩崩体积的精细估算方法研究具有重要实用价值。

大量岩崩案例表明, 在其运动过程中, 往往伴随着岩体撞击与碎裂现象^[6-7], 形成的堆积体由分散在地面上的不同大小的岩石块体组成, 块体粒度的分布取决于岩体碎裂程度。可见, 从堆积体岩石块体大小的统计入手, 是实现岩崩体积精细估算的一种可行方法, 也可为碎裂研究提供数据基础^[8-9]。Dussauge 等^[10]通过研究不同体积范围岩崩事件的堆积体块体体积分布特征, 发现其遵循幂率分布; Crosta 等^[11]通过

现场统计岩崩体积分布规律, 发现岩崩碎裂需要消耗大约 1% ~ 30% 能量; Ruiz 等^[12]通过野外现场测量块体统计岩崩体积, 根据岩崩体积和节理切割获取破坏前的岩体结构特征, 提出了三参数分形碎裂模型。现场实地测量是估算岩崩体积主要方法之一, 如 Xing 等^[13]在堆积体上选取多个取样点进行统计分析; Ruiz 等^[14]对岩崩堆积体进行分区现场测量块体, 根据统计分布估算出体积; Crosta 等^[11]拍摄堆积区 320 万像素的数码照片, 将照片以 $0.42 \text{ m} \times 0.32 \text{ m}$ 的格式打印后放在透明纸下进行人工测量。但是实测方法在具体实施过程中, 面临着巨大的工作量, 不仅费时费力, 且人工统计易出现失误等问题。随着新兴技术不断使用, 一些学者提出结合三维激光扫描的岩崩体积估算方法, 如 Santana 等^[15]利用 TLS 扫描岩崩疤痕节理点云数据, 经过处理分析后计算出落石体积; Mavrouli 等^[16]假设岩崩疤痕缺失岩体为棱柱形, 统计疤痕基底面积与其高度乘积估算出岩崩体积。这些新方法对岩崩体积估算较现场统计精度更高, 但同时需要崩塌前后高精度地形模型(如 DEM 或 DSM); 疤痕节理面识别具有高敏感性特征, 仅适用于厚层状岩体结构斜坡, 碎裂结构识别误差偏高, 适用性较差。

ImagePy 是一款基于 Python 的超轻量级开源可扩展图像处理软件^[17], 能够轻松接入 scipy, scikit-image, opencv 等任何基于 numpy 的图像处理库。ImagePy 对无人机拍摄图像进行滤波、降噪和二值化等预处理后, 可以智能的将图像中块体沿边缘分割, 通过区域分析处理后, 导出块体的数量、面积、等效直径和协方差等特征参数。对于大体积碎裂化岩崩块体粒径的统计, 相比于传统的人工测量方法, ImagePy 具备的图像识别技术更显优势。目前, 该软件已被广泛应用

于生物、医学及工程领域的块体识别与统计。如杨仕教等^[18]对露天爆堆黏连岩块图像处理分析得到了良好的二值化分割效果。Jiang 等^[19]利用 ImagePy 图像分割技术实现砾石土剖面图像中提取块石尺寸,数据可靠度较高。

鉴于此,通过融合无人机贴近摄影与图像识别技术,提出一种基于典型分区块体识别、精细估算碎裂化岩崩体积的方法。以雅西高速姚河坝崩塌为例,通过对比岩崩前后点云数据提取的方量,讨论方法的精确性与实用性,进一步对比国内外相关研究成果,讨论该方法的优缺点。

1 碎裂岩崩体积估算方法的构建

利用图像识别技术进行碎裂岩崩体积精细估算主要包括堆积体分区和图像识别两部分,技术路线如图 1 所示。根据现场堆积区块体分布情况,对集中堆积区的覆盖层分区,选定具有代表性的采样区。利用无人机贴近摄影获取正射影像图,提取集中堆积区中采样区图像和散落区图像。利用开源图像识别软件(ImagePy)快速提取块体特征参数,基于此,统计碎裂岩崩块体体积分布特征,估算岩崩体积。

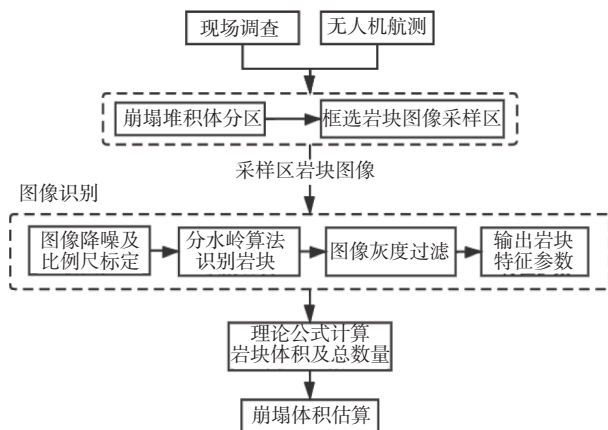


图 1 工作方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the methodology

1.1 碎裂岩崩堆积体平面分区

岩崩往往在斜坡上呈现出集中堆积区与散落区的分布特征(图 2)。当对整个堆积区进行块体识别,分割算法会受限于不同区域精度差异而产生较大偏差。如果对所有分区进行识别,工作量大,无法满足快捷、高效需求^[19]。

Ruiz 等^[14]提出了现场分区实测方法,通过随机选取一个采样区进行现场测量,节省了大量的时间,但



图 2 岩崩碎裂演示图

Fig. 2 Diagram of the rockfall fragmentation

由于采样区的随机性,无法保证粒径分布的准确度。在此基础上,本文结合现场调查和无人机正射影像分析(图 3),将集中堆积区沿运动方向划分为 3 个亚区(I 区、II 区、III 区),各亚区块体粒径分布相似,内部大块体粒径差异小。每个亚区中,结合现场块体粒径分布情况,定义多个采样区,需包含区内所有块体粒径范围的块体。如果区内块体粒径分布复杂,则增加采样区数量以提高估算精度。散落区块体数量较少,未产生堆积,因此对散落区域的孤立块体进行直接量测。

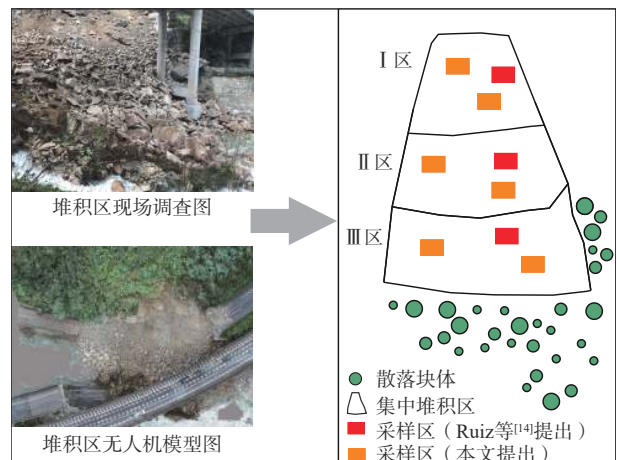


图 3 分区效果示意图

Fig. 3 Schematic diagram of partition method

1.2 图像识别块体粒径

利用 DJI Phantom 4Pro 无人机,采用贴近摄影技术获

取堆积区高清正射影像数据,精度可达到 2.4 cm/pixel。块体图像识别主要利用 ImagePy 集成的 Python 强大的图像处理库,编写图像处理函数,实现块体尺寸量化提取,如图 4 所示。

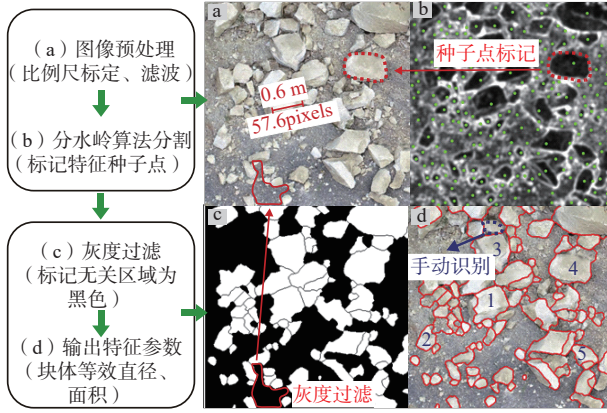


图 4 图像识别方法

Fig. 4 Image processing method

图像预处理:定义尺寸换算比例,图像中块体尺寸(pixels)和实际块体尺寸(m)比值,消除与块体无关信息,减少过分割现象,增加块体可检测性(图 4a)。分割算法:标定块体特征种子点,利用分水岭算法分割块体(图 4b),并过滤剔除泥土、植物等无关信息(图 4c)。对比影像,手动补充识别块体,导出块体面积参数(图 4d)。根据图像识别得到的块体平面面积,采用描述碎裂岩石的等效面积圆法获取块体体积 $V^{[20]}$,如式 1 所示:

$$V = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \times S \quad (1)$$

式中: V ——块体体积/ m^3 ;

S ——块体平面面积/ m^2 。

为验证块体体积计算精度,现场实测图 4d 中对应的 5 类不同粒径块体体积,对比结果见表 1。可见两者误差较小,图像识别的精度可用于估算岩崩体积,而且更高效安全。

1.3 碎裂岩崩体积估算

根据采样区识别结果,统计体积大于 0.01 m^3 的块体,得到采样区表层块体体积分布。为了估算表层以下块体分布情况(图 5),即运动距离较近的崩塌,其碎裂块体粒径在竖向上分布规律与表层近一致^[11]。定义厚度比例因子 H_i ,为采样区厚度与块体粒径的比值(式 2),其中采样区域厚度取区域的平均厚度,根据现场实测或崩塌前后高精度地形数据(如 DEM 和 DSM)确定。在此条件下,根据式 3 计算区域 i 的采样比,由

表 1 块体体积对比结果

Table 1 Comparison of rock block volume

编号	V_1/m^3	V_2/m^3	$(V_1-V_2)/\text{m}^3$	$[(V_1-V_2)/V_2]/\%$
1	0.062 5	0.058 5	0.004 0	6.8
2	0.013 4	0.015 1	-0.001 7	11.3
3	0.020 3	0.018 7	0.001 6	8.6
4	0.040 2	0.037 1	0.003 1	8.4
5	0.011 2	0.010 6	0.000 6	5.7

注: V_1 为图像识别体积; V_2 为实际测量体积。

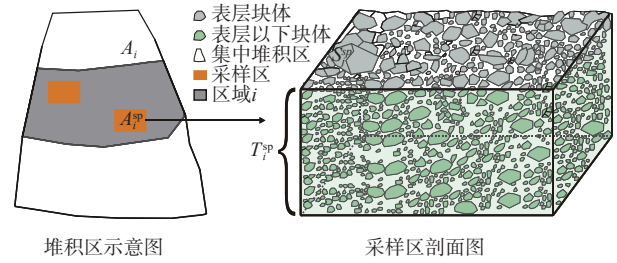


图 5 岩崩堆积体体积估算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rockfall magnitude estimation

式 4 将采样区块体分布转换为整个区域 i 的块体分布,各区域块体累加即得到集中堆积区块体分布。

$$H_i = \frac{T_i^{\text{sp}}}{D_j^{\text{sp}}} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{A_i}{A_i^{\text{sp}}} \quad (3)$$

$$n(V_j)_i^{\text{RBSD}} = n(V_j)_i^{\text{measured}} \times R_i \times H_i \quad (4)$$

式中: V_j ——块体体积范围为 j (0.01 ~ 0.02、0.02 ~ 0.05、0.05 ~ 0.1 等)/ m^3 ;

$n(V_j)_i^{\text{RBSD}}$ ——区域 i 中体积为 j 的块体数量;

$n(V_j)_i^{\text{measured}}$ ——区域 i 中采样区域图像测量的块体体积为 j 的块体数量;

A_i ——区域 i 的面积/ m^2 ;

A_i^{sp} ——区域 i 中采样区域的面积/ m^2 ;

R_i ——区域 i 的采样比;

T_i^{sp} ——区域 i 中采样区域的厚度/ m ;

D_j^{sp} ——采样区域中体积范围 j 的块体粒径/ m 。

通过图像识别方法直接统计散落区中体积大于 0.01 m^3 的块体,与集中堆积区块体数量相加,即得到碎裂岩崩块体体积总体分布情况(式 5),从而估算出岩崩体积大小。

$$n(V_j)^{\text{RBSD}} = \sum_{i=1}^r n(V_j)_i^{\text{measured}} + n_{\text{LSB}}(V_j) \quad (5)$$

式中: $n(V_j)^{\text{RBSD}}$ ——岩崩块体体积为 j 的块体数量;

$n_{\text{LSB}}(V_j)$ ——散落块体中块体体积为 j 的块体数量。

2 实例应用与验证

2.1 姚河坝岩崩

2020年9月20日12时许,G5京昆高速公路雅西段成都至西昌方向2048 km+600 m,栗子坪至石棉路段姚河坝隧道出口200 m处发生碎裂岩崩,如图6(a)

所示。岩崩导致右幅桥1#桥墩和两跨40 m简支T梁垮塌,右幅2#桥墩也剪切破坏但未倒塌。岩崩堆积体掩埋高速公路下方的G108国道,造成雅西高速公路、G108国道断道,严重影响道路通车。岩崩区地质条件复杂,主要为第四系全新统崩坡积块石土(Qh^{dl+col}), 出露岩性为早震旦世(γ_2^2)花岗岩为主,其次为辉绿岩。

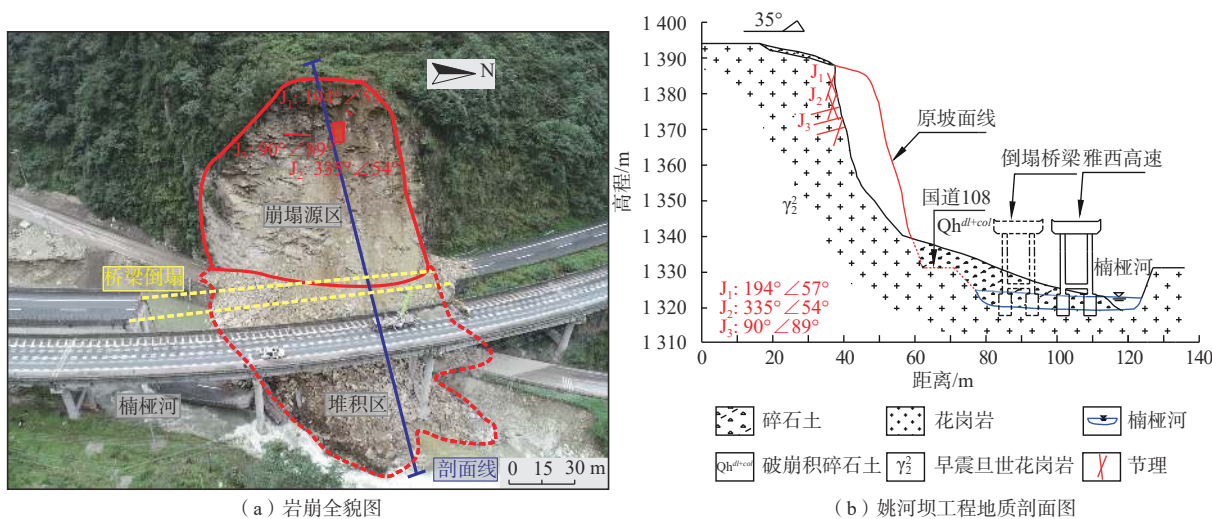


图 6 姚河坝碎裂岩崩概况

Fig. 6 General information of Yaohe Dam rockfall

姚河坝崩塌坡脚高程1331 m,坡顶高程1390 m,相对高差约55~65 m。边坡总体较陡,坡度75°~85°,下部近直立,出露基岩为花岗岩,岩体呈碎裂结构,边坡顶部植被覆盖率高,有薄层覆盖物。综合无人机倾斜模型和现场调查,岩崩源区岩体节理发育,有3组主控结构面:J₁产状194°∠57°,J₂产状335°∠54°,J₃产状90°∠89°,结构面相互组合将边坡岩体切割成独立块体(图6b)。在长期降雨作用下,山体失稳发生岩崩,并在重力作用下撞击碎裂掩埋国道108,继续向前运动撞击G5京昆高速右幅桥墩,导致桥梁垮塌,前缘冲入楠桧河中。堆积体长约37 m,中部宽50~60 m,前缘距对岸约12 m,现场调查预估方量1.5×10⁴ m³。

2.2 岩崩堆积体粒径分布特征

现场调查发现,堆积体后缘小粒径块体含量较多,均位于国道108上。随运动方向,块体粒径逐渐增大,根据上文提出的分区方法将堆积体后缘、中部和前缘划分为3个面积大致相等的区域(I区、II区、III区)。每个区域选取两个大小相同的采样区,其中II区中大块石较多,因而选择面积较大的采样区,具体情况如图7所示。

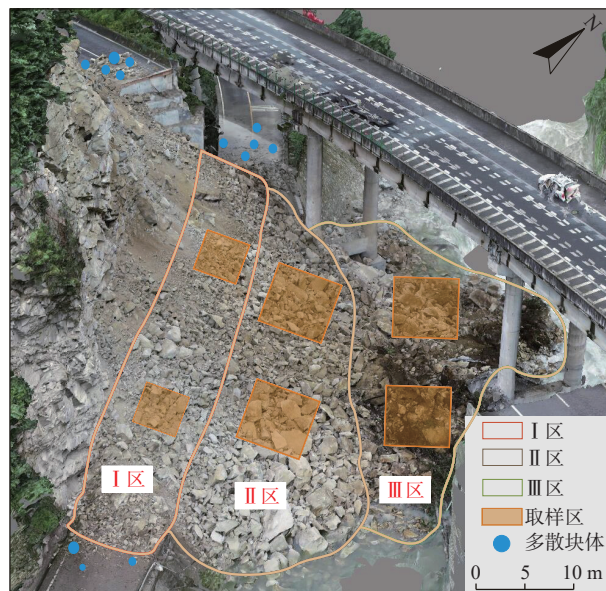


图 7 堆积区分区图

Fig. 7 Partition diagram of the congeries

通过图像识别获取块体面积、编号、协方差等特征参数,统计块体体积,划分为9组块体范围,即:0.01~0.02,0.02~0.05,0.05~0.1,0.1~0.2,0.2~0.5,0.5~1,1~2,2~5,5~10 m³。可见,块体体积分布包

含4个数量级图8(a)所示,获得堆积体块体数量与块体体积的关系如图8(b)所示。

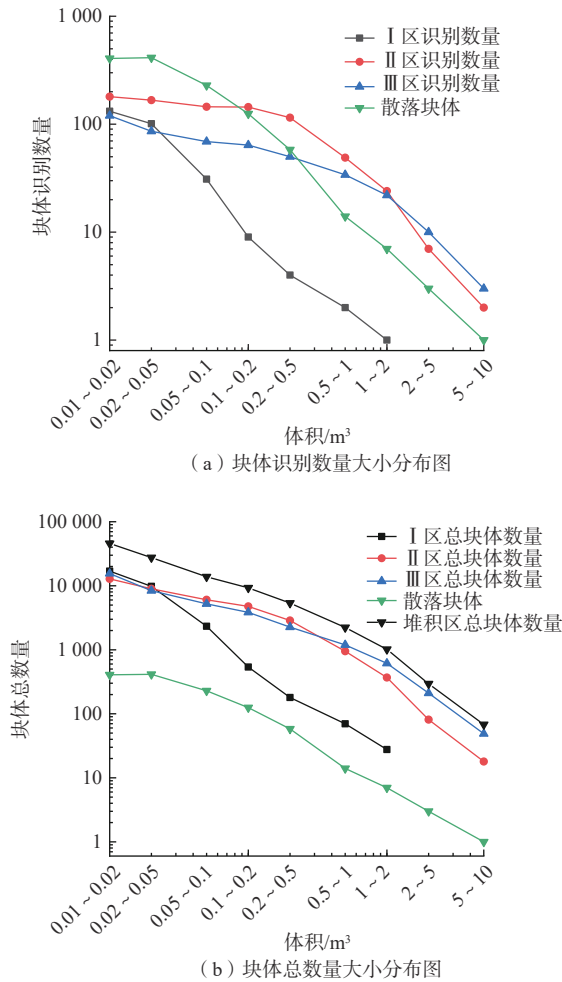


图8 块体统计结果
Fig. 8 Statistical results of block volume

可见, I区最大块体体积处于1~2 m³范围,小于II区和III区; II区和III区块体体积分布特征相似,且各区块体体积分布曲线斜率相近。这与Ruiz等对Cadi岩崩堆积体块体体积现场测量结果一致(图9a),说明本文方法得到的统计结果可靠^[14]。据此,可得碎裂岩崩体积约为8 974 m³,共105 336个体积大于0.01 m³的块体。Dussauge^[10]通过统计大量的岩崩案例块体体积,提出岩崩体积在10²~10¹⁰ m³范围内适用的经验公式(式6),其拟合b值范围为0.5~1.2。该规律在Cadi岩崩^[14]、Mon. de Piedra岩崩^[21]、Santana岩崩等得到了较好的验证。为此,利用获取的姚河岩崩堆积体数据进行曲线拟合(图9b)。拟合结果R²=0.985, b值为1.14,表明利用图像识别技术分区统计结果符合碎裂岩崩块体体积分布的一般规律。

$$P(V_{\min} \leq V_0) = C \times V_0^{-b} \quad (6)$$

式中: C——与最小有效块体体积(V_{min})有关的常数;
b——曲线分布的斜率。

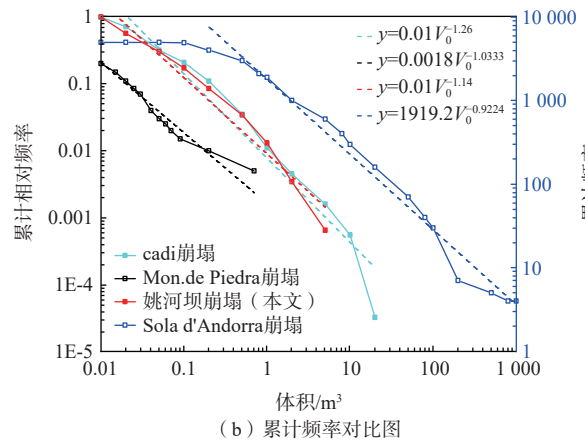
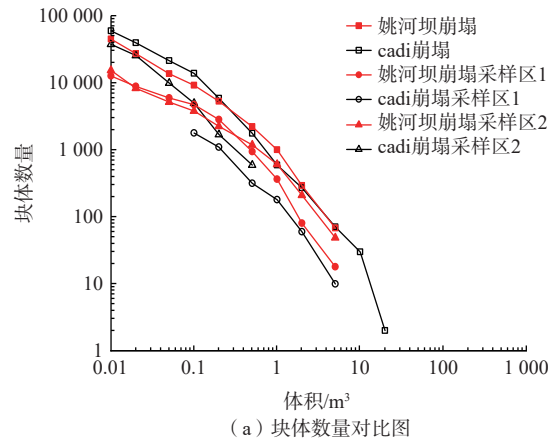
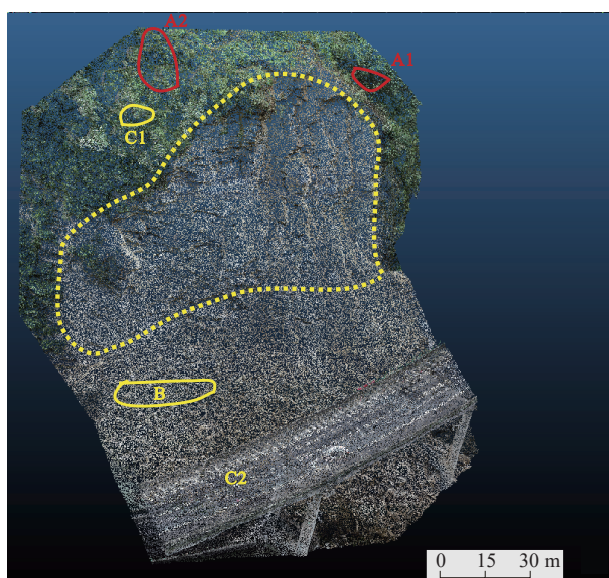


图9 研究数据对比分析图
Fig. 9 Comparative analysis chart of research data

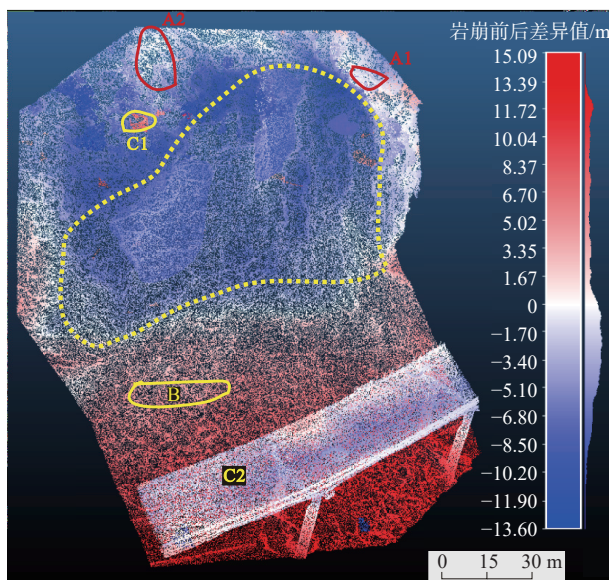
2.3 可靠性验证

为验证分区图像识别岩崩体积估算方法的实用性和准确性,采用崩塌前后地形数据差分方法获取的体积进行对比分析。崩塌前边坡地面模型采用资源三号卫星三线阵立体影像数据和现场调查数据制作,崩塌后边坡坡面模型根据无人机三维点云数据制作。利用CloudCompare软件,对崩塌发生前后数字地表模型进行差异分析,根据分析结果修补岩崩后地表模型,以此估算岩崩体积,结果如图10、图11所示。

图10(a)中黄色虚线框表示岩崩疤痕范围,图10(b)中渐变蓝色区域代表崩源区范围,与疤痕范围完全贴合,对应色带中负值;渐变红色代表堆积体范围,对应色带中正值。根据图10(b)和三维点云模型估算崩塌体和堆积体面积和体积的变化情况(图11)。可见,岩崩区域深度变化范围为-10~10 m,其中崩塌体主要



(a) 岩崩后倾斜摄影模型



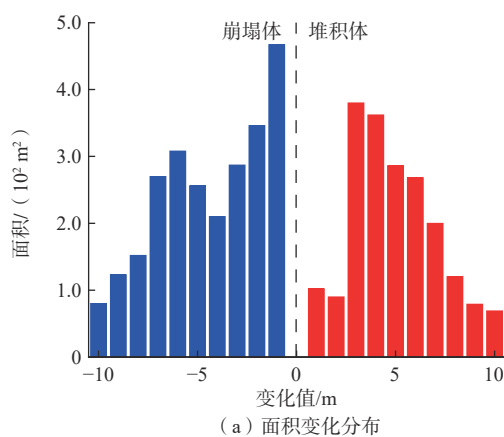
(b) 差异分析结果图

图 10 碎裂岩崩前后对比图

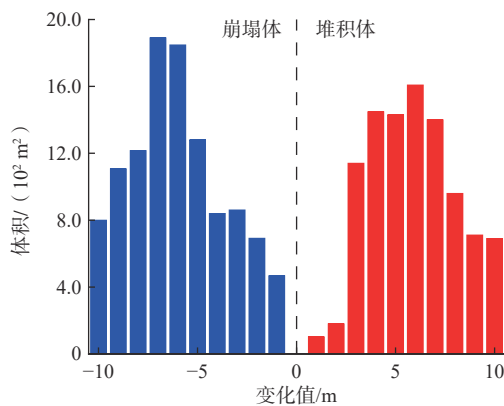
Fig. 10 Pre- and post-failure changes in the slope surface elevation

集中在斜坡中上部,变化范围-5 ~ -10 m,估算岩崩体积为 11 001 m³;堆积体主要集中在前缘,变化范围 3 ~ 10 m,部分块体滚入河中,估算体积为 9 669 m³。

对比图 10(a)和图 10(b),可发现坡顶植被区域(A1、A2)等崩塌前后不受影响的区域差异分析结果接近 0,符合实际。但在部分区域仍存在误差,如边坡红色渐变处及 C1、C2 区域,考虑是由于崩塌前后采用的地面模型精度不同以及点云数据出现空洞导致的。这些误差部位并不是研究重点,现场调查时对源区疤痕部位已进行无人机加密拍摄,由图 10 可见疤



(a) 面积变化分布



(b) 体积变化分布

图 11 岩崩前后变化值分布

Fig. 11 Distribution of the elevation changes based on the area and volume

痕部位误差非常小。可见,此次岩崩前后差异分析结果可运用于下一步建模分析。

根据图 10(b)对应色带中岩崩源区各部位差异值,在 Rhinoceros 软件中基于岩崩后 3D mesh 模型对岩崩源区进行修补。在 Rhinoceros 软件中测量修补模型体积约为 11 500 m³,大于根据图像识别统计估算的体积。造成结果差异主要是岩体撞击碎裂会产生小于 0.01 m³ 的灰尘和块体,部分岩崩块体也会飞散落入楠桤河中,本文没有进行测量估算。通过对比两种方法得到的岩崩体积,其相对误差接近 20%,这与 Ruiz 等^[14]提到的大约 20% 岩崩块体运动过程中形成灰尘的说法近一致,表明本文提出的岩崩精细估算方法的可行性与可靠性。

3 讨论

对于岩崩体积估算方法研究,国内外学者以现场人工测量方法和岩崩疤痕三维激光扫描方法为主,与本文提出的基于图像识别的估算方法对比可知。

(1) 图像识别方法以岩崩堆积体块体为基础统

计,突破了疤痕法的局限性,不易出现漏统计或重复统计现象,在精确性与高效性方面具有显著优势。从图 8 中可见,块体统计数据平滑可靠,符合岩崩堆积体颗粒粒径分布的一般规律。经过验证,根据图像识别估算的岩崩体积与真实体积拟合度可达 80%,可快速应用于岩崩灾害风险量化评估。

(2)在应用该方法对其它碎裂岩崩体积进行估算时,仍有两点问题有待关注。①块体图像识别可靠性取决于堆积体图像质量,由于光照、噪声和拍摄角度等因素影响,可能出现个别岩块漏统计现象。解决办法是在高精度正射影像中辅以人工识别未分割块体(图 4d),也可利用 ImagePy 二次开发技术,研发块体精准分割识别插件,实现块体高效、准确识别。②本文设定的厚度比例因子是参考前人有关运动距离较近的岩崩堆积体下部块体和表面覆盖层粒径分布接近一致的认识。该规律是否具有普遍意义,或适用于何种条件的碎裂岩崩,仍然是一个不确定性问题。因此,在后续研究过程中,需进一步通过案例收集,现场实测方法验证。

4 结论

(1)建立崩塌堆积区分区统计思路,将堆积区分为几个亚区,对各亚区中采样区块体进行图像识别统计块体体积,通过公式可计算出崩塌体积。

(2)通过图像识别统计的块体体积分布与其他崩塌案例现场实测获取的结果近一致,且幂次函数拟合度较高,证明了图像识别的高精确性。

(3)利用三维点云数据模型差分法获得的姚河坝岩崩体积超过图像识别方法结果 20%,与前人研究结论一致,可见,利用图像识别方法进行碎裂岩崩体积估算是可行的,能为碎裂岩崩灾害风险量化评价提供可靠支撑。

(4)图像识别统计方法在精确性和高效性方面具有优势,但对于块体图像质量以及堆积体实际厚度假设两方面仍有待改进。

参考文献 (References) :

[1] 何思明,沈均,吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应 [J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 781 - 788. [HE Siming, SHEN Jun, WU Yong. Rock shed dynamic response to impact of rock-fall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 781 - 788. (in Chinese with English abstract)]

[2] 李娟,何亮,苟晓慧. 强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 157 - 163. [LI Juan, HE Liang, XUN Xiaohui. An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 157 - 163. (in Chinese with English abstract)]

[3] 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 Yun Kun, et al. A study of the risk ranking method of landslides and collapses[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 184 - 192. (in Chinese with English abstract)]

[4] 李任杰,胡富杭,石豫川,等. 基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 145 - 152. [LI Renjie, HU Fuhang, SHI Yuchuan, et al. A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 145 - 152. (in Chinese with English abstract)]

[5] 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. (in Chinese with English abstract)]

[6] EVANS S G, HUNGR O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30(4): 620 - 636.

[7] 马泽栋,马雷,李科,等. 基于岩石图像深度学习的多尺度岩性识别 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 316 - 322. [MA Zedong, MA Lei, LI Ke, et al. Multi-scale lithology recognition based on deep learning of rock images[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 316 - 322. (in Chinese with English abstract)]

[8] NOCILLA N, EVANGELISTA A, SCOTTO DI SANTOLO A. Fragmentation during rock falls: two Italian case studies of hard and soft rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, 42(5): 815 - 833.

[9] PEDRAZZINI A, HUMAIR F, JABOYEDOFF M, et al.

- Characterisation and spatial distribution of gravitational slope deformation in the Upper Rhone Catchment (Western Swiss Alps)[J]. *Landslides*, 2016, 13(2): 259 – 277.
- [10] DUSSAUGE C, GRASSO J R, HELMSTETTER A. Statistical analysis of rockfall volume distributions: implications for rockfall dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B6): 2286.
- [11] CROSTA G B, FRATTINI P, FUSI N. Fragmentation in the Val Pola rock avalanche, Italian Alps[J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2007, 112(F1): F01006.
- [12] RUIZ-CARULLA R, COROMINAS J, MAVROULI O. A fractal fragmentation model for rockfalls[J]. *Landslides*, 2017, 14(3): 875 – 889.
- [13] XING Aiguo, WANG Gonghui, YIN Yueping et al. Investigation and dynamic analysis of a catastrophic rock avalanche on September 23, 1991, Zhaotong, China[J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1035 – 1047.
- [14] RUIZ-CARULLA R, COROMINAS J, MAVROULI O. A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits[J]. *Landslides*, 2015, 12(4): 815 – 825.
- [15] SANTANA D, COROMINAS J, MAVROULI O, et al. Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner[J]. *Engineering Geology*, 2012, 145/146: 50 – 64.
- [16] MAVROULI O, COROMINAS J. Comparing rockfall scar volumes and kinematically detachable rock masses [J]. *Engineering Geology*, 2017, 219: 64 – 73.
- [17] WANG Anliang, YAN Xiaolong, WEI Zhijun. ImagePy: an open-source, Python-based and platform-independent software package for bioimage analysis[J]. *Bioinformatics*, 2018, 34(18): 3238 – 3240.
- [18] 杨仕教, 彭贯军, 朱忠华, 等. 基于 ImagePy 工具的岩块图像二值化分割研究 [J]. *爆破*, 2018, 35(4): 129 – 135. [YANG Shijiao, PENG Guanjun, ZHU Zhonghua, et al. Rock fragmentations image binarization and segmentation based on ImagePy tool[J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 129 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [19] JIANG Zhuodong, WANG Qiubing, ADHIKARI K, et al. A vertical profile imaging method for quantifying rock fragments in gravelly soil[J]. *CATENA*, 2020, 193: 104590.
- [20] MAERZ N H, FRANKLIN J A, RUTHENBURG L, et al. Measurement of rock fragmentation by digital photoanalysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(4): A182.
- [21] COROMINAS J, MATAS G, RUIZ-CARULLA R. Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls[J]. *Landslides*, 2019, 16(1): 5 – 21.

编辑: 王支农