

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

"空天地"一体化技术在采空区形变监测中的应用

贾会会,薛建志,郭利召,宋江涛,张雨丛

Application of combined space, arial and ground based multiple technologies in deformation monitoring of mining areas JIA Huihui, XUE Jianzhi, GUO Lizhao, SONG Jiangtao, and ZHANG Yucong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202015

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

"空-天-地"一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用——以兰州普兰太公司滑坡为例

Application of "Air-Space-Ground" integrated technology in early identification of landslide hidden danger: taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example

侯燕军,周小龙,石鹏卿,郭富 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 12-20

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China #法 神母牙 沙娃 中国地质安全性 2021 22(5) 112 120

戴嵩,魏冠军,梁斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 113-120

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

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards 贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

三维激光扫描技术在阎家沟滑坡变形监测中的应用

\${suggestArticle.titleEn} 薛强,毕俊擘,李政国,黄玉华 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 108-112

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection 潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 徐文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202015

贾会会, 薛建志, 郭利召, 等. "空天地"一体化技术在采空区形变监测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 69-82. JIA Huihui, XUE Jianzhi, GUO Lizhao, et al. Application of combined space, arial and ground based multiple technologies in deformation monitoring of mining areas[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 69-82.

"空天地"一体化技术在采空区形变监测中的应用

贾会会^{1,2,3},薛建志^{1,2,3},郭利召^{1,2,3},宋江涛^{1,2,3},张雨丛^{2,3}

(1. 华北地质勘查局五一四地质大队,河北承德 067000; 2. 河北省地质灾害监测预警技术创新
 中心,河北承德 067000; 3. 河北华勘资环勘测有限公司,河北承德 067000)

摘要:河北滦平县张百湾镇周台子村由于多年矿山开采遗留下大量的采空区,部分采空区未做任何处理存在塌陷隐患, 严重制约当地的经济发展和社会稳定。对该地区采空区形变调查和实地监测十分有必要。文中综合应用合成孔径雷达 干涉测量技术、无人机摄影测量技术、三维激光扫描技术对采空区的空间分布进行划分确定和形变监测。首先应用小 基线集技术对采空区进行地表形变解算。然后应用无人机数据构建研究区的三维模型,并通过多期无人机航飞数据,计 算2次航飞间地表变化, 佐证 InSAR 技术的结果。最后应用三维激光扫描技术, 对部分重点区域进行三维激光扫描, 建立 采空区精细化模型。研究结果表明, 三种技术的联合监测结果表现出高度的一致性, 其中 InSAR 技术探测出研究区最大 形变速率-25 mm/a, 结合2 期无人机正射模型 DEM 与三维激光扫描数据差分结果确定出采空区 17 处的高风险区域, 部分 区域对居民区和道路有影响。基于"空天地"一体化技术具有较高的可靠性, 可应用于矿区采空区形变调查和地面沉降 监测。

关键词:采空区; InSAR技术; 无人机摄影测量; SBAS-InSAR; 三维激光扫描 中图分类号: P642.26 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2023)03-0069-14

Application of combined space, arial and ground based multiple technologies in deformation monitoring of mining areas

JIA Huihui^{1,2,3}, XUE Jianzhi^{1,2,3}, GUO Lizhao^{1,2,3}, SONG Jiangtao^{1,2,3}, ZHANG Yucong^{2,3}

 (1. 514 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Chengde, Hebei 067000, China; 2. Geological Disaster Monitoring and Early Warning Technology Innovation Center of Hebei Province, Chengde, Hebei 067000, China;
 3. Hebei Huakan Resource Environmental Survey Co. Ltd., Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: There are a large number of iron mine gobs due to many years of mining in Zhoutaizi Village, Zhangbaiwan Town, Luanping County. And some gobs have potential safety hazards of collapse, which seriously restrict the local economic development and social stability. So it is necessary to strengthen deformation investigation and field monitoring of existing gobs in this area. In this paper, the spatial distribution of gobs in the study area is determined and deformation of gobs is monitored by using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), UAV photogrammetry and 3D laser scanning technology. Firstly, Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR) technology is used to retrieve the surface deformation of gobs. Then, a three-dimensional model of the study area is constructed by using UAV data, and the ground surface changes between two flights are

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-04-26 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

第一作者: 贾会会(1983-), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质相关工作。E-mail: 280738145@qq.com

通讯作者:薛建志(1990-),男,河北保定人,本科,工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质相关工作。 E-mail: 824789223@qq.com

中国地质灾害与防治学报

calculated by using multi-period UAV flight data to support the results of InSAR technology. Finally, 3D laser scanning technology is applied to some areas, and the fine model of gobs is established. The results show that the joint monitoring results of the three technologies show a high consistency, the maximum deformation rate (-25 mm/a) of the study area are detected by InSAR method. Combined with the difference results of the DEM and 3D laser scanning data of the two periods of UAV, 17 high-risk areas of gobs are identified. The high-risk areas are distributed in various mining areas, and some areas have an impact on residential areas and roads. The based on Space, Sky and Ground multi-technology indicating that this method has high reliability and can be well applied to deformation investigation of goaf in mining area and the surface deformation monitoring

during inadequate mining.

Keywords: gobs; InSAR technology; UAV photogrammetry; SBAS-InSAR; 3D laser scanning

0 引言

矿产资源的大规模开采虽然满足了我国经济建设 的需要,但是却造成了矿区生态环境的破坏,并引发一 系列地质灾害的发生,如矿区地表沉降、塌陷、滑坡以 及崩塌等灾害。据有关资料表明,矿井每采万吨矿产资 源,塌陷土地约 0.3 ha,对土地资源和矿区周边居民民 的生命财产安全造成了严重威胁。滦平县张百湾镇周 台子村由于多年民采阶段矿山开采遗留下大量的浅埋 采空区,一部分采空区进行了废石充填、尾砂胶结充填, 一部分采空区却未做任何处理从而形成了潜在塌陷的 安全隐患,严重制约了当地的经济发展和社会稳定。因 此对矿区采空区进行形变调查和实地监测势在必行。

采空区监测的难点在于地下的不确定性与采空区 的分布不均匀性,传统的监测方法无论是物探还是钻井 手段,对地形地貌和研究区的分布都有一定的要求。在 矿区采空区的实地监测技术中,常规外业测量手段如水 准测量^[1]、全站仪测量^[2]、GNSS测量^[3]等存在效率低、 成本高、点状测量、无法全天候观测、空间和时间分辨 率较低等问题。近些年,遥感技术凭借着大面积、高分 辨率、高精度的优势为矿区采空区的形变监测提供了 新的手段^[4]。光学遥感容易受到云雨天气影响,因此 一些研究学者开始采用 InSAR 技术对矿区形变进监 测,得到了高精度、大面积、长时序的矿区三维形变信 息^[5-6]。但是 InSAR 技术得到的形变结果取决于 SAR 图像的重返周期和分辨率,不能得到矿区以天为周期的 形变信息。另一方面,低空无人机遥感技术已在矿区环 境监测等领域开展多方面应用[7-8],如利用无人机遥感 技术可进行矿区沉陷地受损植被指数的反演和边坡的 精密测绘等。而地面的三维激光扫描通过对地面进行 周期性扫描,可获取矿区采空区高精度、高分辨率的 DEM,并通过对多期 DEM 进行叠加求差,可生成地表 高程变化量,从而对采空区的地表形变进行评估[9-10]。 上述的这些方法如 InSAR、三维激光扫描及无人机摄 影测量技术都可对地表形变进行高精度实时的监测,但 它们在探究的尺度上和分辨率存在一些优缺点,比如基 于运动结构重建算法的数字摄影测量技术获得的数字 地表模型在一定条件下可以达到激光雷达技术的超高 空间分辨率程度(如 0.2 m×0.2m), 但是数字摄影无法穿 透植被冠层,而激光雷达可以较好地穿透植被层从而获 取植被及地表信息。数字摄影测量技术设备简单、操 作方便、成本低廉且具有较高的空间分辨率,因而能够 和高精度、高耗费、大数据量的激光雷达技术形成优势 互补。InSAR 技术能以高精度和高空间分辨率大范围 地获取地表在雷达视线向上的位移,但无法获取目标真 实位移信息和运动方向,且结果易受到大气延迟、失相 干等因素的影响,因此它可与三维激光扫描及无人机摄 影测量技术进行联合观测,从空、天、地三个尺度上对 矿区采空区进行全方位、多尺度监测。综上,数字摄影 测量、三维激光扫描、InSAR 技术的联合处理可以弥补 各自的弊端,从而达到大范围、高精度观测采空区及局 部范围的精细测绘,进而综合识别潜在的隐患区。

因此本文融合地面三维激光扫描、无人机摄影测量、星载时序 InSAR 空天地三种技术对滦平县周台子 区域采空区进行形变调查和实地监测,以更好评估现状 条件下采空区的稳定性,为存在安全隐患的采空区治理 提供技术依据。具体来说,基于雷达三维激光扫描和无 人机倾斜摄影测量技术获取调查区的点云数据,建立数 字高程模型(DEM),并叠合正射摄影测量采空区数据 构建三维立体模型,将高分辨率 SAR 影像进行时序差 分处理,反演采空区地面沉降时空序列结果,并叠合到 采空区三维立体模型中,精确、立体、直观展示采空区 地表动态沉降监测结果^[11],并为后续矿区进一步研究奠 定基础。通过对多种技术综合应用不仅可以弥补各项 技术的不足,更可以由总体到局部,由低分辨率到高分 辨率的立体监测,实现矿区的高分辨率精细监测,节约 2023年

大量时间和人力成本。

1 研究区和数据集

1.1 研究区介绍

研究区域位于河北省承德市滦平县。铁矿采区位 于滦河北岸。研究区的地理位置见图 1,该地区地貌类 型为低山侵蚀构造地貌,高程范围为 269~1 650 m。研 究区气候属大陆季风气候,冬长寒冷,夏短炎热,多年平 均气温 9.1 °C,最热月(7月)平均气温 24.4 °C,最冷月(1月) 平均气温-9.4 °C,极端最高气温 41.5 °C,极端最低气温 -24.2 °C,最大日温差 23.8 °C。研究区历年最大降水量 835.9 mm,最小降水量 326.7 mm,平均降水量 557.9 mm。 1.2 数据集介绍

为了有效地实现矿区沉陷的长时序形变监测,研究 区首先收集 TOPS 干涉模式的 Sentinel-1A/B SAR 图像 数据集进行 SBAS-InSAR 技术处理(表 1),反演采空区 地面沉降时间序列形变结果。其次利用地面三维激光 扫描和无人机摄影测量技术获取的点云数据来构建高



图 1 实验区基本概况 Fig. 1 Basic overview of the experimental area

分辨率、高精度 DEM, 并叠合无人机获取的采空区正 射摄影测量数据制作采空区三维立体模型。

表 1 研究区 Sentinel-1 数据 Table 1 Sentinel-1 data in the research area

Sentinel-1A升轨影像数据集					
编号	成像日期	垂直基线/m	时间基线/d	多普勒频差/Hz	高程模糊度/m
0	2018-11-06	0.00	0	0.00	0.00
1	2018-12-12	57.96	36	-4.61	262.75
2	2019-01-05	-8.46	60	7.27	1 799.97
3	2019-02-10	95.92	96	3.33	158.75
4	2019-03-06	113.21	120	5.57	134.52
5	2019-04-11	125.46	156	-3.34	121.38
6	2019-11-01	128.02	360	-5.10	118.96
7	2019-12-07	74.24	396	-3.10	205.13
8	2020-01-12	61.75	432	0.86	246.60
9	2020-02-05	62.86	456	0.54	242.27
10	2020-03-12	141.33	492	2.36	107.75
11	2020-04-05	97.92	516	3.22	155.52
Sentinel-1A降轨影像数据集					
编号	成像日期	垂直基线/m	时间基线/d	多普勒频差/Hz	高程模糊度/m
0	2018-11-05	0.00	0	0.00	0.00
1	2018-12-11	32.79	36	1.49	518.88
2	2019-01-04	-30.31	60	3.69	561.38
3	2019-02-09	17.13	96	1.14	993.06
4	2019-03-05	-39.30	120	-7.84	432.96
5	2019-04-10	61.11	156	-14.1	278.41
6	2019-11-12	-31.83	372	-2.95	534.49
7	2019-12-06	47.26	396	4.70	360.03
8	2020-01-11	-58.43	432	-3.82	291.19
9	2020-02-04	-9.43	456	1.16	1 805.11
10	2020-03-11	-5.50	492	-7.30	3 095.02

(1) SAR 数据

研究区获取升轨和降轨的 Sentinel-1A/B SAR 数据

集采集时间为 2018 年 10 月—2020 年 4 月, 模式为干 涉 IW 模式, 地面分辨率为 30 m。SAR 图像的距离向和

方位向分辨率约为 2.3 m 和 13.9 m, 入射角为 41.1°, 重 访周期为 12 d。使用 SRTM 分辨率为 30 m 的 DEM

进行差分干涉流程中的 DEM 配准和地形相位去除等 步骤,具体 Sentinel-1A/B 数据信息见图 2。







(c)无人机影像数据放大图(区块3)

图 2 研究区全区正射影像图及细节展示 Fig. 2 Orthophoto map and detail display of the whole study area

(2)无人机影像数据

矿区范围 工作区范围

0.75

1.5 km

(a) 矿区范围和无人机工作区范围

研究区选用大疆精灵 4 无人机进行点云数据采集, 无人机飞行路径基于谷歌地球图像规划,具体工作区 范围见图 2(a)和 2(c)。无人机搭载有定位系统(POS) 和数据记录器,将在不同飞行高度以 4 m/s 的速度飞 行,以产生高精度点云,并确定最佳飞行高度。图像在 Agisoft PhotoScan Professional v 1.4.3 中进行处理,点云 的分辨率将降低到每米 10 点,进一步对每个点云图像 进行滤波,去除植被覆盖等地表物体,生成裸地数字地 形模型(DTM)。本次研究共获取周台子区无人机影像 1 399 张像片,正射影像图细节见图 2(b)和 2(d),生成 密集点云 437 009 634 个点,控制点误差 0.059 335 5 m, 生成白模共 86 849 221 个面,43 449 261 个顶点三维模 型大小约 3.4 km²。

2 技术方法

本研究结合研究区特点,创新性地制定了结合 InSAR、无人机摄影测量以及三维激光扫描技术的具体 的监测方案,联合应用 InSAR、无人机摄影测量、三维 激光扫描等技术建立矿区三维数字模型并进行采空区 高风险区的确定,具体技术路线见图 3。首先针对研究 区利用 InSAR 技术进行地表形变监测,通过确定形变 的异常值,来评估可能存在的采空区。然后利用无人机 三维摄影测量从多角度调查矿区采空区周边的情况,主 要通过控制点布设、联测,特征点选取,航线设计,数据 采集以及数据处理等步骤,建立区域采空区高风险地区 三维模型。在此基础上,进一步采用三维激光扫描技 术,以基础测量为主,采集采空区地形数据,通过对获 取的点云数据进行降噪处理等操作,生成二期数据成 果—滑坡体 DEM 模型,最后开展立体等高线的生成和 多结果叠加等研究。

2.1 InSAR 技术

由于研究区采空区分布密集且地表植被覆盖茂密, 本研究选取 SBAS-InSAR 技术进行地表形变监测,这种 方法利用短时空基线的干涉对避免了空间失相关,同时 减小地形对差分干涉的影响,与 PSInSAR 方法相比,极 大提高了地表形变点的密度和干涉图的相干性^[11-13]。 其主要流程包括 Sentinel-1 SAR 预处理,即图像配准,



Fig. 3 Technical roadmap

Burst 和子带拼接, 差分干涉处理, 相位滤波和相位解 缠, 时序形变解算等, 具体流程图见图 4。



图 4 SBAS 投小加柱 Fig. 4 SBAS technical process

该技术的具体流程如下:

Sentinel-1 SAR 图像配准:首先对 Sentinel-1 数据进 行预处理生成单视复数据,然后进行图像配准过程,主 要分为 Burst 级数据处理、子带拼接等,由于 Sentinel-1 数据方位向天线摆动,多普勒频率随 Burst 时间线性变 化,不再保持常量,此时对数据进行插值和滤波会出现 较大问题,必须先对该多普勒频率变化引入的线性调频 信号进行补偿,即在配准过程进行之前,先进行去斜 Deramp 处理, 然后再进行 DEM 配准和增强普分集(ESD) 配准^[13], 在进行配准处理后, 还需要将去除的 Deramp 相 位重新进行补偿, 即 Reramp 操作, 再进行后续的干涉 处理。

Burst 和子带拼接:对配准好的 Burst 数据进行拼接,去除重叠区域和黑边(无效值),生成完整的子带影像数据。然后将三个独立的子带数据进行拼接,去除子带间重叠区域,生成完整 SLC 影像数据。

差分干涉处理:在 N+1 景重复轨道时序 SAR 数据 中,根据不同研究区及研究目标可以设置不同时空基线 阈值选择 M 对干涉对(N 为 SAR 图像个数, M 为干涉对 个数),然后进行差分干涉处理流程,由于平地相位和地 形相位引起的干涉条纹会掩盖形变信息,需要利用 DEM 和轨道参数生成平地和模拟地形相位,然后从干 涉图中减去这部分相位,最终得到了差分干涉图^[14-16]。

相位滤波和相位解缠:由于相位噪声的影响干涉相 位图会出现"毛刺"等现象将严重影响解缠速度和精 度,通过相位滤波将干涉条纹处理清晰。采用最小费用 流算法对相位进行解缠解决损失的以 2nπ 为模的整周 缠绕数从而得到真实的干涉相位。

时序形变解算: SBAS-InSAR 方法的核心算法是矩阵的奇异值分解求出最小范数意义上的最小二乘解。 首先利用式(1)的线性模型估计其他 *M*-1 幅干涉图像的 形变:

$$A\Phi = \delta\Phi \tag{1}$$

式中: ϕ ——待求相干点上的N个未知相位组成的矩阵; $\delta \phi$ ——M个干涉图上相位值组成的矩阵。

系数矩阵A[M×N]每一行对应于一个干涉图,每一 列对应于一个时间上的 SAR 图像,主图像所在列为+1, 辅图像所在列为-1,其余列为 0。将矩阵A[M×N]进行 奇异值分解:

$$A = USV^{T}$$
(2)

式中: *U*——*M*×*M*的正交矩阵, 由*AA*^{*T*}的特征向量*u*_{*i*}组成; *V*——*N*×*N*的正交矩阵, 由*A*^{*T*}A的特征向量*v*_{*i*}组成; *S*——一个*M*×*M*的对角矩阵, 对角线元素是*AA*^{*T*}的 特征值*λ*_{*i*}。 定义A的伪逆矩阵为A+,则有,

$$A^{+} = \sum_{i=1}^{R} \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} v_i u_i \tag{3}$$

式中矩阵A的秩为 R,则最小范数意义上的最小二乘相 位估计为: $\hat{\Phi} = A^+ \delta \Phi$ 。

2.2 无人机摄影测量建模技术

为解决 InSAR 技术中存在失相干和无法监大梯度 形变的问题,本研究利用无人机摄影测量技术来提供研 究区的正射影像,同时通过多期无人机生成的 DEM、DSM 的差分准确的定位大规模形变区,通过与 InSAR 技术 的结合确定可能的采空区范围。具体无人机三维建模 的流程见图 5^[17-19]。



Fig. 5 Flow chart of UAV 3D modeling

该技术的具体流程如下:

本技术使用 Agisoft PhotoScan Professional v 1.4.3 软件进行三维建模处理使用软件加载影像,同时将整理 好的控制点文件导入对空中三角测量成果进行控制加 密。通过初步选取少许几个边缘控制点运行空三并基 于空三结果预测其他控制点位置,为快速完成控制点的 添加应将控制点设置在影像中心,添加完有控制点再次 运行空三直至加密成功。采用光束法区域网平差得到 每张影像的精确外方位元素,然后采用合适的影像匹配 算法进行点云密集匹配三维点云生成三角网 TIN 生成 白模。通过配准 TIN 模型的每一个三角面片与对应纹 理影像进行模型自动纹理映射从而得到三维模型。分 瓦片处理后建立 S3C 索引文件在同一坐标系最终的三 维模型^[11]。

2.3 LiDAR 三维模型构建技术

为解决传统监测技术监测点密度小、监测精度低、 监测周期长、监测点易损坏以及人员安全难以保证等 问题,本研究使用三维激光扫描技术对研究区的采空区 进行监测具体扫描建模流程图见图 6。利用 GPS RTK 测量的大地坐标系将不同站点采集的点云数据配准到 同一坐标系中。其次,采用多站点扫描采集数据,利用 标靶拼接功能进行点云拼接。然后进行云滤波,该过程 包括点云噪点剔除、植被剔除及点云密度抽稀。最后 进行三维建模,基于三角形建模方法构建 DEM,根据塌 陷坑空间相邻三点可生成一个平面三角形,构成不规则 三角网(TIN),三角网所覆盖的区域即为塌陷坑的地表。



Fig. 6 Flow chart of 3D laser scanning modeling

2.4 风险区圈定的方法

本研究利用 InSAR 技术采用 SBAS 方法求得研究 区的地表年平均 LOS 形变速率,根据其形变量初步确 定矿区形变较大的区域为采空风险区。在此基础上,通 过多期无人机摄影测量影像经过数据预处理、空三加 密、DTM 提取、正射影像生成对上述采空风险区进行 精确分析(图 7)。同时联合三维激光扫描地表位移形 变结果进行交互验证,通过对比不同时间段形变速率变 化、累积形变量的变化对潜在的采空风险区进行最终 圈定,并结合调查区以往工程地质情况、矿山开采历 史、矿山采矿作业方法等,如调查区形变速率异常增大 且累积形变量明显高于其他区域即为潜在的高风险区。

3 结果与分析

3.1 多技术联合监测结果

图 8显示了研究区 SBAS 技术的形变速率结果图, 形变速率范围为-14.3~6.37 mm/a。研究区呈现出该 4 处沉降区域,其中最大形变速率为-14.3 mm/a,该区域



Fig. 7 The risk area of study area determination flowchart.

可能为采空风险区。由于研究区植被覆盖,地表起伏较 大,见图 9(b)(c), InSAR 结果可能会受到时间去相干和 部分大气延迟的影响,因此采用无人机监测结果对初步 确定的隐患区进行精细分析。图 9(a)为两期无人机监 测期间影像上显示为多处大梯度形变区域,且沉降区形 变为5~6m,形变量较大的区域位于山坡区域,部 分位为山间植被导致,滤除极值后,塌陷区上方仍有几 处形变量较大区域,为开采岩壁边缘,有较大崩塌发生风 险。无人机结果极大程度上克服了 C 波段的 Sentinel-1 数据在自然地表穿透能力差而造成的监测误差,且对于 一些大梯度形变区域可进行有效监测。图 10 为研究区 三维激光扫描处理结果图,此区域共扫描测站8站,点 云 9.6 亿, 通过点云拼接、去噪、滤除植被、及抽稀处理 后,生成 TIN 三角网,并获取研究区高精度(10 cm) DTM 栅格数据见图 10(b)。通过 LiDAR 生成 DTM 与二期 无人机生成 DTM 做差见图 11, 图中色块为无人机结果 与 LiDAR 结果的差分沉降量。研究区 5—6月、6— 7月趋势相同,交叉验证了 InSAR 结果与无人机差分结 果的准确性。

3.2 高风险区域的确定

图 12 为 InSAR 形变的结果与无人机生成的三维实



图 8 InSAR 地表形变图 Fig. 8 InSAR surface deformation map



(c)无人机实景模型 (整体图)

图 9 无人机 DTM 差分地表形变图及实景模型(区块三) Fig. 9 UAV DTM differential surface deformation diagram and real scene model in block 3

景模型叠合图,全区整体形变情况较为稳定。图 12(d) 显示研究区基于升轨 Sentinel-1 数据视线向形变速率范 围为-25~16 mm/a,图 12(e)显示基于降轨 Sentinel-1 数据视线向形变速率范围为-19~12 mm/a,整体体现为 微弱下降趋势。以 InSAR 的结果为基础,将形变区间 大于±5 mm/a 区域划分为高风险形变区域。根据 SAR 数据升轨形变反演结果共识别高风险形变区域 22 处,主要分布在区块一、区块二、区块四和区块八,见 图 12(b),部分位于矿区范围外即研究区域的东南侧。 根据降轨形变反演结果识别高风险形变区域 21 处,主 要分布在区块一、区块二、区块三、区块四和区块八, 部分位于矿区范围外即研究区域的东南侧。由于数据 集的观测周期、LOS 向和研究区域度方向原因,升降轨 的结果之间存在微小差异,但是基于 Senttinel-1 数据升



图 10 LiDAR 三维模型及 DTM Fig. 10 LiDAR 3D model and DTM



图 11 LiDAR 与二期无人机差分图 Fig. 11 Difference diagram between LiDAR and phase II UAV

降轨结果形变趋势一致,且根据形变信息确定的高风险 区域符合。

3.3 区域的精细分析

将 InSAR 探测出的密集高下降速率点分区,对八 个采区分别进行了局部区域监测,识别形变幅度大 于±5 mm/a确定为高风险形变区,形变幅度虽小于 ±5 mm/a确定为潜在隐患区域。本文将对形变隐患严 重的区域区块一、区块二、区块三和区块八进行精细 分析。

3.3.1 采空区局部监测结果:区块1(启泰采区)

区块1位于周台子西北方,其中包括启泰采区和部 分华兵采区。图 13(a)(c)显示该区块升轨结果的形变 速率范围为-12~6mm/a。根据形变结果识别高风险形 变区6处,其中4处位于矿区内部,2处位于矿区外部 西南处;潜在隐患区域1处,位于矿区南处。图13(b) (d)显示该区块降轨结果的形变速率范围-11~12 mm/a。 根据形变结果识别高风险形变区6处,潜在隐患区域 3处。基于多期无人机测量、LiDAR扫描差分结果、 InSAR 形变速率结果综合分析, 圈定高风险区域处见 图 13 红色圆圈区域,升轨识别得到的高风险区域主 要在采空区西测山坡和矿井处,降轨识别得到的高风 险区域主要分布于采区矿井处和东部山坡。此外,采区 外同样分布有高形变速率区域存在,主要位于采区外西 侧和东侧的山坡处,通过无人机与 LiDAR 差分 DTM 结 果对比,仍存在较大形变,具有潜在发生滑坡和塌陷的 风险。

3.3.2 采空区局部监测结果:区块2(华兵老达子沟 采区)

区块2位于周台子西北方,其中包括华兵矿区和 老达子沟矿区。图 14(a)(c)显示升轨 SAR 数据的形变 速率范围为-11~9 mm/a,整体稳定。该区域植被覆盖 茂密,形变结果可能会受到去相干的影响。图 14(d)表 明降轨数据由于入射角与坡向较吻合,其结果可更好地 探测出该区域形变位置。但是升降轨结果探测的风险 区地理位置基本一致。根据形变结果识别高风险形变 区6处;潜在隐患区域5处,其中4处位于矿区内部, 1 处位于矿区外部东北处。图 14(b)(d)显示降轨 SAR 数据形变速率范围为-13~9mm/a,整体稳定。根据形 变结果识别高风险形变区8处,其中6处位于矿区内 部,2处位于矿区外部东北处和西南处;潜在隐患区域 4处。基于多期无人机测量、LiDAR 扫描差分结果、 InSAR 形变速率结果综合分析, 圈定高风险区域处见 图 14 红色圆圈区域,主要分布于采区内中部区域,以建 筑物和山坡为主。此外,采区外同样分布有高形变速率 区域存在,主要位于采区西南处,该区域为山体,有着较 大的沉降速率,同样存在着较大形变。

3.3.3 采空区局部监测结果:区块3(大矿采区)

区块3为于周台子村北部,内有一条西北-东南向 大沟谷。经无人机三维建模测量,长约 670 m,宽逾百 米,最深处超80m,两侧峭壁非常陡峭,几近垂直,上坡 边缘大量碎石堆积,周边坡体破坏严重,植被覆盖度 低。图 15(a)(c)显示升轨 SAR 数据的形变速率范围为 -8~5mm/a,整体稳定。根据形变结果识别潜在隐患区 域 12 处,其中 8 处位于矿区内部,4 处位于矿区外部东 北处和西南处。图 15(b)(d)显示降轨 SAR数据的形变 速率范围为-8~11 mm/a。根据形变结果识别高风险形 变区4处,其中3处位于矿区内部,1处位于矿区外部 东北处;潜在隐患区域11处,其中6处位于矿区内部, 5处位于矿区外部东北处和西南处。应用无人机和 LiDAR 三维激光扫描可监测出高形变区域,此区域地 表破坏较为严重,亦有植被覆盖。差分 DTM 结果显示 此处有形变明显,沉降程度大,最大形变值可达10m. 位于坡顶及沿着峭壁边缘,极大可能为不稳定坡体滑塌 所致。基于多期无人机测量、LiDAR 扫描差分结果、 InSAR 形变速率结果综合分析, 圈定高风险区域处见 图 15 红色圆圈区域,主要分布于采区内中部沟谷处,同 时采区北侧也为高沉降速率区域,有坍塌风险。采区外 西部及南部区域同样有着高沉降速率。





1 ig. 12 white angle comparison and comprehensive analysis of morrie

3.3.4 采空区局部监测结果:区块8(三采区)

区块 8 位于周台子村南部,隶属于三采区。内有居 民住宅、学校和主要路段等人群密集处,区域内路基 断裂,山体破坏,植被稀疏。图 16(a)(c)显示升轨 SAR 数据的形变速率范围为-10~9 mm/a,由于建筑区在 SAR 图像上表现为强散射体,受到时空去相干影响较 小,因此该区域形变趋势整体稳定。根据形变结果识别 高风险形变区 2 处;潜在隐患区域 2 处。图 16(b)(d) 显示降轨 SAR 数据的形变速率范围为-14~11 mm/a, 整体稳定。根据形变结果识别高风险形变区 3 处;潜在 隐患区域 1 处,位于矿区外部东北处,为采空区的可能 性极高。区块 8 在无人机影像主要体现大量级大规模 形变,两期无人机监测期间,塌陷区沉降明显,断裂路基 处最大可达 5~6 m,无人机探测区块 8 内部形变量较 大区域以山坡区域为主,为山间植被导致,滤除极值后, 塌陷区上方仍有几处形变量较大区域,有较大滑坡发生 风险。基于多期无人机测量、LiDAR 扫描差分结果、 InSAR 形变速率结果综合分析,圈定高风险区域处见 图 16 的红色圆圈区域,主要分布于采区内西部区域,不 稳定坡体、周边居民区及道路处同样有着较大的沉降 速率,有一定塌陷的风险性。

4 结论

通过时序 InSAR 监测分析、2 期无人机正射模型



图 13 区块 1 多结果叠合高风险采空区区域图 Fig. 13 Regional map of high-risk goaf with multi result superposition in block 1



图 14 区块 2 多结果叠合高风险采空区区域图 Fig. 14 Regional map of high-risk goaf with multi result superposition in block 2



图 15 区块 3 多结果叠合高风险采空区区域图

Fig. 15 Regional map of high-risk goaf with multi result superposition in block 3



图 16 区块 8 多结果叠合高风险采空区区域图 Fig. 16 Regional map of high-risk goaf with multi result superposition in block 8

DEM 与三维激光扫描数据差分得出以下结论:

(1)研究以 SBAS 技术反演的形变结果同时结合多 期无人机、LiDAR 差分结果确定出 17 处高风险形变区 域,并逐一对 4 个区块内的高风险形变区域和潜在隐患 区域进行分析。

(2)高风险区域分布在各个矿区,部分对居民区、 道路、广场等有影响。升轨 SAR 数据形变结果显示高 风险形变区域主要分布在区块一、区块二、区块四和区 块八,部分位于矿区范围外即研究区域的东南侧。降 轨 SAR 数据形变反演结果显示高风险形变区域主要分 布在区块一、区块二、区块三和区块八,部分位于矿区 范围外即研究区域的东南侧,基于 Sentinel-1 升降轨 SAR 数据形变趋势基本一致。后续将利用不同波段的 SAR 数据进行研究区地表形变精细化监测,同时利用 升降轨数据进一步求出研究区的三维形变,与 GPS 数 据进行联合监测。

(3)C波段的 Sentinel-1数据由于波长较短, InSAR 技术在植被茂密和形变梯度较大区域由于失相干原因 导致形变结果存在较大误差。通过无人机和 LiDAR 技 术极大提高了研究区监测点的密度, 加强了高风险形变 区域的精确评估。基于空天地的 InSAR、无人机摄影 测量以及三维激光扫描技术展示了在矿区采空区形变 调查中的应用潜力。

参考文献(References):

- [1] 孙健.基于二等水准测量的矿区沉降监测研究分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(8): 979-981. [SUN Jian. Research and analysis of mining area settlement monitoring based on secondclass measurement [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(8): 979-981. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 范发龙.变形监测技术在矿井采空区沉降观测中的应用研究[J].山东煤炭科技,2019(6):175-176.[FAN Falong. Application of deformation monitoring technology in mine goaf settlement observation [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2019(6):175-176. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 唐凯.基于单机站CORS的矿区开采沉陷监测研究[J]. 测绘与空间地理信息,2017,40(11):162-164.[TANG Kai. Research on mining subsidence monitoring based on CORS single station [J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2017,40(11):162-164.(in Chinese)]
- [4] 李丽,杨金中,陈栋,等.长江经济带江苏段废弃露天矿 山分布与生态修复遥感调查研究[J].水文地质工程 地质, 2022, 49(1): 183-190.[LILi,YANG Jinzhong, CHEN Dong, et al. Remote sensing investigation on the distribution and

ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of Yangtze River Economic Belt [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 183 – 190. (in Chinese)]

- [5] 刘童谣,胡海峰,廉旭刚,等.时间相邻-四轨法的D-InSAR矿区沉陷监测研究[J].测绘科学,2020,45(2): 121-127. [LIU Tongyao, HU Haifeng, LIAN Xugang, et al. Research on mining area subsidence monitoring by time-adjacent four-pass D-InSAR technology [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(2): 121-127. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 朱建军,杨泽发,李志伟. InSAR矿区地表三维形变监测 与预计研究进展[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 135-144.
 [ZHU Jianjun, YANG Zefa, LI Zhiwei. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displace-ments using InSAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 135-144. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 胡晓,李新举.基于无人机的高潜水位煤矿区沉陷耕地提取方法比较[J].煤炭学报,2019,44(11):3547-3555.
 [HU Xiao, LI Xinju. Comparison the extraction methods of subsided cultivated land in high-groundwater-level coal mines based on unmanned aerial vehicle [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3547-3555. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 朱海斌,王妍,李亚梅.基于无人机的露天矿区测绘研究[J].煤炭工程,2018,50(10):162-166.[ZHU Haibin, WANG Yan, LI Yamei. Surveying and mapping of open-pit mining area using unmanned aerial vehicle[J]. Coal Engineering, 2018, 50(10):162-166. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈朋.应用三维激光扫描同步监测矿区地表与建筑物形变的研究[D].徐州:中国矿业大学.[CHEN Peng. Study on synchronous monitoring of ground surface and building deformation in mining area by three-dimensional laser scanning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 何荣,陆广.基于三维激光扫描的矿区地表倾斜值提取 方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(11):199-205.
 [HE Rong, LU Guang. Study on extraction method of surface deformation tilt based on 3D laser scanning [J]. Coal Science and Technology,2020,48(11):199-205. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 多晓松. 基于 INSAR与 TRT的某小区地下采空区分析
 [J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(5): 58-62. [DUO Xiaosong. Analysis of underground goaf in a small area based on InSAR and TRT [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(5): 58-62. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 韩旭东, 付杰, 李严严, 等. 舟曲江顶崖滑坡的早期判识 及风险评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6):

180 – 186. [HAN Xudong, FU Jie, LI Yanyan, et al. A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 180 – 186. (in Chinese with English abstract)]

- [13] YAGÜE-MARTÍNEZ N, PRATS-IRAOLA P, RODRÍGUEZ GONZÁLEZ F, et al. Interferometric processing of sentinel-1 TOPS data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(4): 2220 – 2234.
- [14] 张晓波,刘凯,蒋鹏,等.基于约束条件的深圳市南山 区地下空间开发地质适宜性评价[J/OL].水文地质 工程地质:1-12[2023-05-23].[ZHANG Xiaobo, LIU Kai, JIANG Peng, et al. Geological suitability evaluation of underground space development in Nanshan District of Shenzhen City based on constraint conditions [J/OL]. Hydrogeology and engineering geology: 1-12[2023-05-23] (in Chinese with English abstract)]
- [15] 叶俊能,尹铁锋,杜培贞.基于压差传感技术的坑底隆 起监测方法及应用[J].水文地质工程地质,2017,44(6): 96-101. [YE Junneng, YIN Tiefeng, DU Peizhen. Monitoring method of bottom heave based on pressure difference sensing technique and its application [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 96-101. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张凯翔.基于"3S"技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):
 1-11. [ZHANG Kaixiang. Review on geological disaster

monitoring and early warning system based on "3S" technology in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 1 - 11. (in Chinese with English abstract)]

- [17] 宋京雷,郝社锋,岳翎,等.采矿引起的将军崖岩画区倾 倒变形机理及治理措施分析[J].中国地质灾害与防 治学报,2017,28(4):40-46. [SONG Jinglei, HAO Shefeng, YUE Ling, et al. Deformation mechanism and treatment measures of the mining-induced toppling deformation in rock painting area in Jiangjun cliff [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4):40-46. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 芦彦霖,张森,汲姣.低空无人机倾斜摄影测量测图精 度实证[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):
 1921-1931. [LU Yanlin, ZHANG Sen, JI Jiao. Real evidence of mapping accuracy of low-altitude UAV tilt photogrammetry [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2021,51(6):1921-1931. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 吴志春,郭福生,林子瑜,等.三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(6):1895-1913.[WU Zhichun, GUO Fusheng, LIN Ziyu, et al. Technology and method of multi-data merging in 3D geological modeling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2016,46(6):1895-1913. (in Chinese with English abstract)]