

Surface subsidence monitoring and analysis of goaf in Shaxi copper mine based on SBAS-InSAR technology

Jian Jiang¹ Song Xu² Nan Shen³ Jian Zhang¹

1. Anhui Tongguan (Lujiang) Mining Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231563, China

2. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211816, China

3. School of Geomatics Science And Technology, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211816, China

Abstract

With the further exploitation of underground mines, surface subsidence has gradually become one of the serious geological hazards in mining goaf areas. This study focuses on the area of the Shaxi Copper Mine in Lujiang. Based on 82 Sentinel-1A satellite radar images from 2022 to 2024, the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique was employed to monitor and analyze surface subsidence in the goaf, obtaining cumulative deformation in the study area and revealing the spatiotemporal evolution patterns of subsidence in the mining region. The results indicate that the annual subsidence rate in the mining area ranges from -16.26 to 9.32 mm/a, with the maximum cumulative subsidence at the main subsidence center reaching 329 mm. The subsidence exhibits a double-funnel morphology, and its spatial distribution closely aligns with the mining working faces. The study validates the effectiveness of SBAS-InSAR technology in large-scale, high-precision subsidence monitoring in mining areas, providing a scientific basis for early warning of mine geological hazards and ecological restoration.

Keywords

Surface subsidence in the goaf; Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar technique; Subsidence monitoring and analysis

基于 SBAS-InSAR 技术的沙溪铜矿采空区地表沉降监测与分析

江润¹ 徐嵩^{2*} 沈楠³ 张见¹

1. 安徽铜冠（庐江）矿业有限公司，中国·安徽 合肥 231563

2. 南京工业大学交通运输工程学院，中国·江苏 南京 211816

3. 南京工业大学测绘科学与技术学院，中国·江苏 南京 211816

摘 要

随着地下矿山进一步被开采，地表沉降逐渐成为矿区采空区的严重地质灾害之一。本研究以庐江沙溪铜矿所在区域为研究对象，基于2022~2024年的共82景Sentinel-1A卫星雷达影像，采用小基线合成孔径雷达干涉测量（SBAS-InSAR）技术对采空区地表沉降进行监测分析，获取研究区累计形变，揭示了矿区沉降时空演化规律。结果表明：矿区年均沉降速率范围为-16.26~9.32 mm/a，主沉降中心累计沉降量达329 mm；沉降呈现双漏斗形态，空间分布与开采工作面高度吻合。研究验证了SBAS-InSAR技术在矿区大范围、高精度沉降监测中的有效性，为矿山地质灾害预警与生态修复提供了科学依据。

关键词

采空区地表沉降；SBAS-InSAR技术；沉降监测分析

1 引言

矿山采空区的形成会导致地表沉降的发生，而传统的监测手段存在成本高、效率低、无法实时监测等问题，

难以及时准确地发现地表沉降。合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）技术的出现为地表沉降提供了一个全新的技术手段。InSAR技术是星载雷达遥感技术的应用之一，其凭借毫米级精度、全天候观测优势，已成为多个领域监测的重要手段，尤其是在地表沉降监测方面得到了广泛应用。例如董娟^[1]等采用双轨D-InSAR技术在矿区进行地表沉降监测，其监测结果与实际监测结果基本符合。针对老采空区沉降监测，D-InSAR能够快速获取微小沉降变形数据，监测结果帮助反演出了矿井地下开采空间的动态发展过程^[2]。李博^[3]等利用SBAS-InSAR监测

【作者简介】江润（1995-），男，中国江西上饶人，硕士，工程师，从事采矿工程研究。

【通讯作者】徐嵩（2001-），男，中国江苏无锡人，本科，从事岩土工程研究。

方法对红柳林煤矿采空区进行了地面沉降监测,监测结果表明工作面发生了明显沉降,且符合沉陷规律,有效证明了该技术能够在矿区开采沉陷监测中得到应用。

2 研究区现状

沙溪铜矿区位于安徽省合肥市庐江县泥河镇,地处长江中下游成矿带中部,是该成矿带内目前发现的规模最大的斑岩型铜矿床。矿区内出露地层主要为下、中志留统高家边组和坟头组,以及侏罗系下统罗岭组,主要分布在矿区的西北部和东部,东南部局部出露,岩性主要为粉砂岩、和石英砂岩等^[4]。

矿区主要由凤台山、铜泉山两个主要矿段组成,采场跨度大,植被覆盖率高,人工监测费时费力,成本过高,且存在大量误差,导致有些区域的沉降变形无法及时探明,严重威胁了井下人员的人身安全、影响了矿区的经济效益。

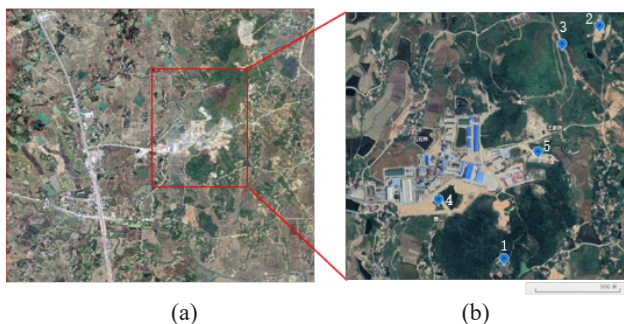


图1 沙溪铜矿平面图

3 数据与方法

3.1 实验数据

实验数据选择覆盖沙溪铜矿区域的82景 Sentinel-1A 卫星降轨数据进行研究,成像模式为IW模式,极化方式为VV,数据格式为SLC,空间分辨率为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$,时间跨度为2022年1月18日~2024年12月21日,时间间隔为12 d,辅以30 m SRTM DEM数据消除地形相位,利用POD精密轨道数据去除平地相位。

3.2 试验方法

2002年,Berarrlino P等人提出小基线集干涉测量(SBAS-InSAR)技术^[5]。该技术设定较短的时间基线与空间基线阈值,构建起由多个主影像构成的干涉对;借助POD精密轨道数据消除平地相位,利用SRTM数字高程数据去除地形相位,并运用Goldstein滤波法提升信噪比,成功弥补了PS-InSAR技术在山区地表形变监测方面的缺陷^[6]。鉴于此,本研究决定采用小基线集干涉测量(SBAS-InSAR)方法对目标区域展开研究。

4 结果与讨论

4.1 形变时序分析

运用 SARscape 软件对卫星数据进行处理,地理编码后

对结果进行分析。图2为沙溪铜矿及其附近区域的形变速率,图中负值表示沉降,正值表示抬升。如图所示,矿区位置有几处明显沉降区域,最大沉降速率可达到 -16 mm/a 左右。

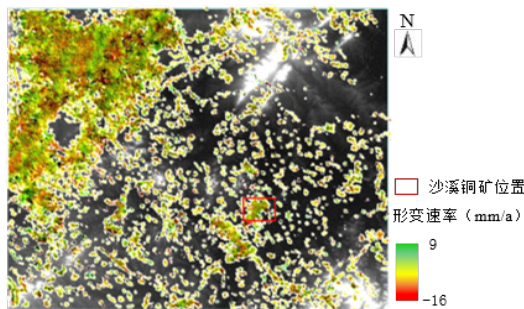


图2 矿区地表形变速率图

选取5个点(图1(b)所示)绘制地表的时序累积形变量图。

部分区域在2023年下半年至2024年初形变较为剧烈,反映了该区域在对应时段可能存在阶段性的地表形变活动。

尽管 SARscape 自带的形变结果时序分析功能可对 SBAS-InSAR 结果进行分析处理,当区域形变梯度超出 InSAR 可探测的最大范围时,会出现失相干现象,致使沉降中心等区域产生“监测空值”。相比之下,自主研发的沉降隐患区识别工具针对上述局限性进行了优化,能为地表沉降监测工作提供高效精准的解决方案,因此采用该工具对上述结果进行验证。

折线图中多色折线代表不同监测点的形变量,其中一条折线在2023年7月左右急剧下降至约 -40 mm ,表明该监测点所在区域发生显著形变。两图中多数线条集中在0值附近,但仍有部分数据超出 ± 10 范围,显示局部区域存在明显形变。

2022-2024年间矿区存在持续形变活动,尤其在2023年中至2024年初,部分区域形变剧烈,存在较高地质隐患风险,与 SARscape 软件分析结果相一致。

4.2 区域形变分析

研究表明矿区沉降呈现双漏斗形态,主沉降中心累计沉降量达 329 mm ,图5为区域形变平均值。

由图可知,正负值交替出现,反映矿区地表形变方向交替(上升与下降),且幅度相对较小但变化复杂,表明矿区地表在监测期内持续处于动态变化中,微小形变频繁发生。

图5揭示了矿区地表形变的复杂性与动态性:形变方向交替、幅度波动显著,部分时段出现极端或高频形变,暗示矿区开采活动、地质结构变化对地表稳定性影响显著。

5 结论

本研究基于小基线集干涉测量(SBAS-InSAR)技术,基于2022~2024年的共82景 Sentinel-1A 卫星雷达影像对庐江沙溪铜矿采空区地表沉降变形进行监测。监测分析结果如下:

(1) 2022~2024年该矿区地表形变速率为-16.26~9.32mm/a;其中开采区形变较大,形变速率为-16.26~9.87mm/a;其余区域形变相对较小,形变速率为-9.87~9.32mm/a。主沉降中心累计形变量达329mm,空间分布与开采活动高度相关;

(2) 时序分析及区域形变分析揭示了2023年7月、

2024年1月为形变突变期,沉降可能受开采强度、地质结构及降水等的影响;

(3) 本研究验证了SBAS-InSAR技术在沙溪铜矿采空区地表稳定性的长期监测的可行性,为沙溪采空区长期保护提供了新的思路和方法。

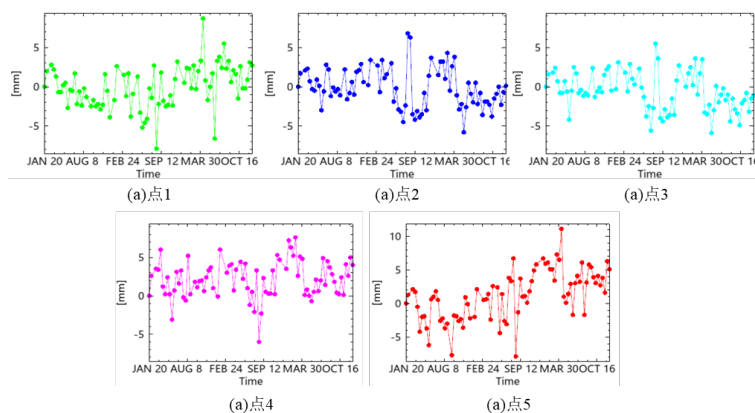


图3 时序累积形变量图



图4 矿区形变时序折线图与直方图

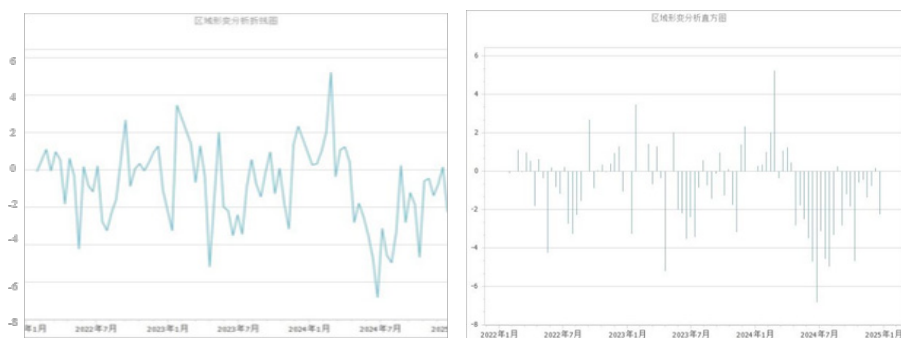


图5 区域形变平均值折线图与直方图

参考文献

- [1] 董娟,柯飞,牛昆,等.双轨D-InSAR技术在矿区地表沉陷监测与分析[J].能源技术与管理, 2024, 49 (01): 1-6.
- [2] 王远坚,齐麟,姜岳,等.基于D-InSAR技术的金矿老采空区下沉监测与位置反演[J].金属矿山, 2019, (10): 68-73.
- [3] 李博,张雨欣,白喜成,等.红柳林煤矿采空区地面沉陷InSAR监测与分析[J].中国矿业, 2023, 32 (08): 55-62.
- [4] 汤诚,周涛发,袁峰,等.安徽省庐江县沙溪铜矿床地质特征及形成时代[J].矿物学报, 2011, 31 (S1): 91-92.
- [5] BERARDINO P,FORNARO G,LANARI R,et al.A new algorithm for surface deformation monitoring basel on smallbaseline differential SAR interferograms[J].IEEE Transactions onGeoscience &Remode Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [6] 肖洪敏,张文江,田云锋,等.基于SBAS-InSAR方法的岷江上游峡谷区地表沉降的坡向分异规律研究[J].遥感技术与应用: 1-11.
- [7] 张宏雪,曾润强,孙萍萍,等.基于SBAS-InSAR的延安新区地表沉降监测与分析[J].兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 185-193.