

基于SBAS-InSAR技术的地表沉降规律分析—以贵州矿区为例

杨子英

瓮福（集团）有限责任公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i11.2037

[摘要] 贵州矿区地形条件复杂,矿体在爆破强扰动开挖后采场稳定性逐渐降低,导致地表发生不同程度沉降和变形,因此开展矿区的整体地表形变监测与时空演化研究至关重要。以贵州某磷矿山为例,利用SBAS-InSAR技术对2020年12月-2023年6月矿山64景Sentinel-1A影像进行处理,获取了矿区地表沉降信息和演化规律并对其进行分析研究。结果表明:矿体开挖后在采区上方出现了一定范围的沉降盆地,最大沉降速率约为22.3mm/a,最大累积沉降量达到55mm,总沉降面积0.085km²;随着时间推移沉降范围不断向外扩张,最终沉降趋势呈现类椭圆形形状。研究成果可为沉降防治提供数据支撑和重要决策依据,为贵州矿区地表移动变形预测提供参考意义。

[关键词] SBAS-InSAR; 地表移动; 地表形变监测; 时空演化; 贵州矿区

中图分类号: P426.64+2 **文献标识码:** A

Monitoring and evolution law analysis of surface subsidence in mining area based on SBAS-InSAR technology—Taking Guizhou mining area as an example

Ziying Yang

Wengfu (Group) Co., Ltd.

[Abstract] The terrain conditions of Guizhou mining area are complex, and the stope stability of the ore body is gradually reduced after the excavation of blasting strong disturbance, which leads to different degrees of surface subsidence and deformation. It is very important to carry out the overall surface deformation monitoring and space-time evolution research of the mining area. Taking a phosphate mine in Guizhou as an example, SBAS-InSAR technology was used to process 64 scenes of Sentinel-1A images of the mine from December 2020 to June 2023, and the surface subsidence information and evolution law of the mining area were obtained and analyzed. The results show that there is a certain range of subsidence basin above the mining area after the excavation of the ore body. The maximum subsidence rate is about 22.3 mm / a, the maximum cumulative subsidence reaches 55 mm, and the total subsidence area is 0.085 km². With the passage of time, the settlement range continues to expand outwards, and the final settlement trend shows an oval shape. The research results can provide data support and important decision-making basis for settlement prevention and control, and provide reference significance for the prediction of surface movement and deformation in Guizhou mining area.

[Key words] SBAS-InSAR; Surface movement; Surface deformation monitoring; Space-time evolution; Guizhou mining area

引言

磷矿资源作为人类社会发展的物质基础,矿产资源需求的持续增长与采矿技术的革新推动了开采活动向深部延伸,这已成为矿业工程领域的重要发展方向^[1]。值得注意的是,高强度、大范围的深部开采作业往往会诱发显著的地质环境效应,具体表现为地表沉降、岩层裂隙发育以及水土资源流失等一系列次生地质灾害现象^[2]。基于地下开采活动引发的地表形变特

征,构建科学的地表移动监测体系并建立相应的预测预警机制,对保障矿区生产安全性和维护区域生态环境稳定性具有重要的实践意义。

现阶段,地表形变监测主要依赖于传统技术方法,包括精密水准测量、全球导航卫星系统(GNSS)以及微震监测等技术手段^[3]。其中,精密水准测量虽可获得毫米级精度的形变数据,但其存在测量周期冗长、作业强度大、安全风险较高等局限性,

难以满足大区域监测需求^[4]; GNSS技术尽管具有实时监测优势,但其监测网络布设成本高昂,难以实现大尺度、高密度的空间连续监测^[5]。星载合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)作为一种先进的空间对地观测手段,凭借其独特的电磁波穿透特性、大范围覆盖能力以及不受昼夜和气象条件限制的优势^[6],在遥感领域获得了广泛应用。

基于前述研究基础,本研究以贵州省典型磷矿开采区为研究对象,运用小基线集干涉测量技术(SBAS-InSAR)对试验采区进行系统性监测。研究重点在于获取矿体开采影响范围内的地表形变时空序列数据,实现大范围、长时间尺度的动态监测与分析。结合数值模拟手段,揭示强扰动开挖地表沉降时空演化规律,为试验矿区地表沉降监测及稳定性控制提供指导,同时也为磷矿资源绿色开采提供新的思路和方法。

1 研究区域概况

贵州省地处中国西南地区,地理坐标介于北纬24° 37' 至29° 13'、东经103° 36' 至109° 35' 之间,行政区域面积达17.6km²。研究区位于川黔南北向构造带内,具体处于背斜构造东翼16+260~17+150勘探线区间。区域水文地质特征表现为地表水系发育程度较低,主要分布季节性沟谷水系。矿区地貌以高山峡谷为主,地质构造复杂,岩体破碎程度较高,加之长期采矿活动产生的强烈扰动,形成了滑坡、泥石流及地表崩塌等地质灾害易发的脆弱地质环境。截止2024年底,贵州省在矿区范围内在册的地质灾害隐患点达到100余处,其中以矿区东南和西侧最为严重,矿区开采影响范围内构筑物发生不同程度的破坏,如道路开裂、土地塌陷、水土流失等,因此把矿区东南和西侧作为本文的具体研究区域。

2 SBAS-InSAR基本原理与数据处理

2.1 SBAS-InSAR技术原理

小基线集干涉测量技术(SBAS-InSAR)通过构建短空间基线的干涉对组合,有效降低了地形相位残差和去相干效应的影响。该方法首先根据空间基线阈值将SAR影像集划分为若干子集,随后在每个子集内部采用最小二乘平差算法进行相位解算,从而获取高精度的地表形变时序信息。这种基于小基线子集的处理方法显著提升了复杂地形区域和地表覆盖变化显著区域的形变监测精度与可靠性。从技术原理层面分析,SBAS-InSAR方法需要对获取的N+1景SAR影像(获取时间序列为 t_0, t_1, \dots, t_n)进行系统性处理。生成的差分干涉图数量M与原始SAR影像数量N+1满足以下关系:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (1)$$

2.2 数据处理

在SBAS-InSAR技术中,首先依据时间基线和空间基线的预设阈值,将SAR影像按照短时空基线的准则划分为若干短基线子集。随后,对每个子集内的干涉对依次实施差分干涉处理、

Goldstein滤波以及相位解缠操作,同时计算相干系数并筛选出高相干点,最终生成干涉图,从而获取各子集的地表形变序列,最后构建形变去除模型,并运用奇异值分解(SVD)技术求解形变值。采用时空域联合滤波方法,可有效消除大气延迟相位和非线性形变对监测结果的干扰。小基线集干涉测量(SBAS-InSAR)技术的数据处理流程主要包括:数据预处理、干涉图生成、相位解缠、时空滤波以及形变参数反演等关键步骤。

3 结果分析

3.1 SBAS-InSAR时序地表形变分析

基于时序数据分析方法,本研究获取了目标磷矿山在2020年1月6日至2023年6月7日监测周期内的地表形变数据集。研究区域的空间分布特征及监测网络布设方案如图1所示。研究结果表明,在持续采矿活动的影响下,研究区域形成了显著的地表沉降区,研究区域最大年均沉降速率达22.3mm/a,表现出显著的地表形变特征。空间分布分析显示,沉降中心主要集中于采区中下部区域,该区域形变速率分布在20~22.3mm/a区间内,其空间分布范围占累计沉降区的16.9%,呈现出明显的空间集聚效应。

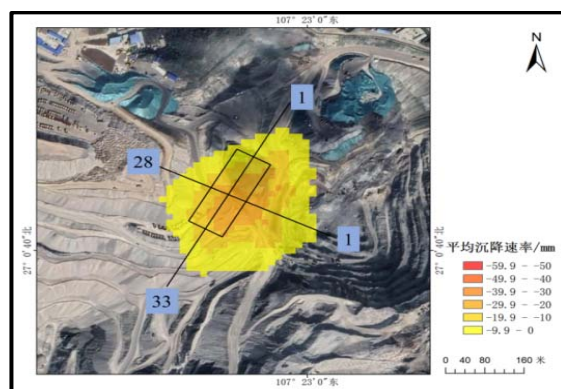
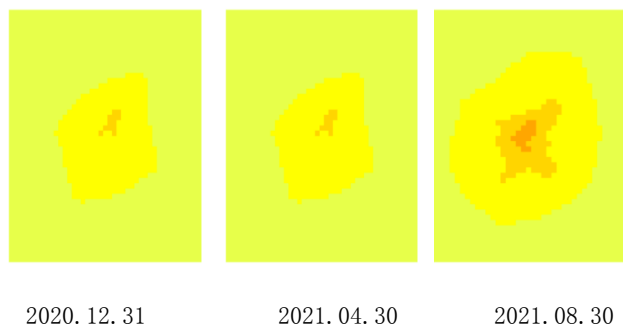


图1 研究区域地表平均沉降速率图

为深入探究矿区地表形变的累积效应,本研究基于时序InSAR技术,对2020年1月6日至2023年6月30日期间获取的遥感影像数据集进行了系统性分析,由此构建了研究区时序累积形变场,其空间分布特征如图3所示。研究结果表明,矿区范围内存在显著的地表沉降现象,且沉降中心与地下开采区域具有明显的空间对应关系。从形变演化特征来看,沉降区呈现持续扩展趋势,其空间展布形态符合典型开采沉降的椭圆形分布规律。



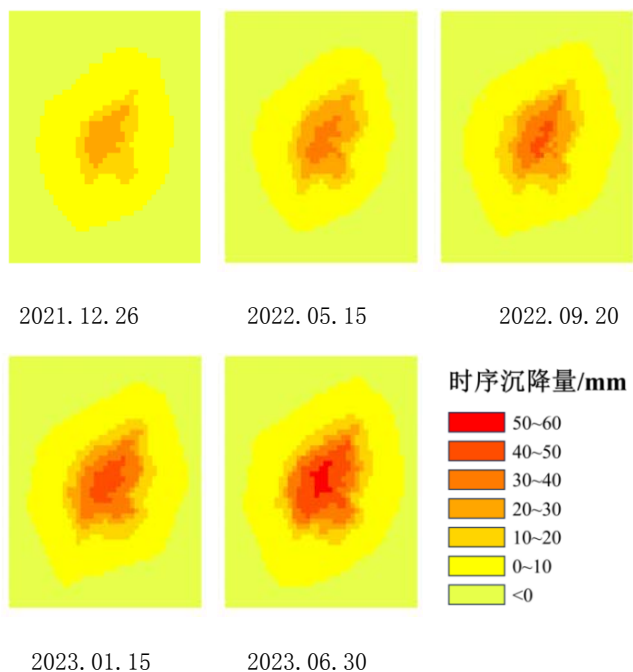


图2 研究区域地面时序累计沉降图

3.2 典型区域沉降分析

为定量评估矿区开采影响区的地表形变特征,本研究采用小基线集干涉测量技术(SBAS-InSAR)对典型区域进行了时序监测分析。基于监测数据,对形变量超过10mm的沉降点进行了空间统计分析,其统计特征如表1所示。进一步地,通过沉降点空间密度分析,计算得到矿区累积沉降面积,具体计算结果如表2所示。

基于时序监测数据分析表明,在2020年1月6日至2020年12月31日的观测周期内,研究区域地表累积沉降量呈现10~20mm的分布特征。延伸至2021年5月7日的监测数据显示,矿区累积沉降量始终维持在40mm阈值以下,且未观测到显著的地表形变现象。然而,自2021年5月7日后,研究区域开始呈现渐进式沉降特征,其最大沉降量呈现持续增长趋势,至2023年6月7日监测期末,最大沉降量已突破50mm。综合分析表明地下开采活动诱发的地表沉降效应相对较弱。监测数据显示,2020年1月6日至2022年5月15日期间,沉降区扩展速率呈现显著递增趋势,并于2022年5月15日达到最大值0.055km²/监测周期。至研究期末,累计沉降面积为0.085km²,扩展速率降至0.007km²/监测周期,表明沉降区空间扩展已进入相对稳定阶段。

为深入探究矿区地表沉降的时空演化规律,本研究基于走向和倾向主断面测线的监测数据,构建了地表移动变形曲线,其空间分布特征分别如图3、图4所示。分析结果表明,走向主断面的沉降中心主要分布于5~26号监测点区间。时序监测数据显示,该区域最大沉降值呈现持续增长趋势:2020年12月31日为-5.4mm,2021年4月30日增至-13.3mm,2021年8月30日达到-16.2mm,2021年12月28日进一步发展为-21.6mm。至2022年5月15日,最大沉降值突破-27.0mm,并于2022年9月20日达到-32.4mm。监测期末(2023年6月30日),最大累积沉降量已达

-48.0mm,较初始值增长近9倍。

表1 研究区域累计沉降点数统计表

沉降点个数					
日期	10~20 mm	20~30 mm	30~40 mm	40~50 mm	50~60 mm
2020.12.31	15	0	0	0	0
2021.04.30	54	0	0	0	0
2021.08.30	105	15	0	0	0
2021.12.28	108	60	0	0	0
2022.05.15	114	112	40	0	0
2022.09.20	126	95	60	18	0
2023.01.15	135	80	100	45	0
2023.06.30	138	60	90	92	22

表2 研究区域累计沉降面积统计表

沉降面积(km ²)						
日期	10~20 mm	20~30 mm	30~40 mm	40~50 mm	50~60 mm	总面积
2020.12.31	0.002	0	0	0	0	0.005
2021.04.30	0.01	0	0	0	0	0.01
2021.08.30	0.022	0.003	0	0	0	0.025
2021.12.28	0.022	0.01	0	0	0	0.03
2022.05.15	0.022	0.02	0.01	0	0	0.055
2022.09.20	0.025	0.02	0.012	0.005	0	0.065
2023.01.15	0.03	0.015	0.02	0.01	0	0.075
2023.06.30	0.028	0.015	0.021	0.03	0.005	0.085

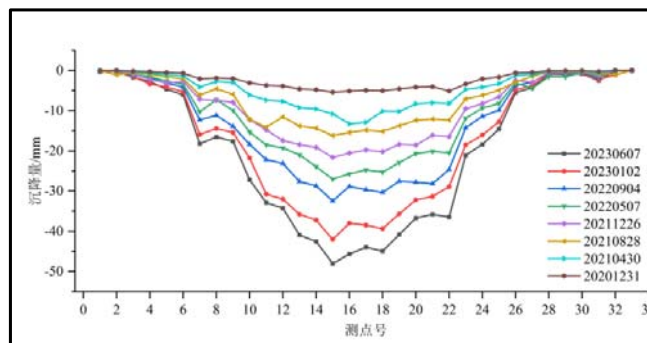


图3 走向主断面地表地表移动变形监测曲线

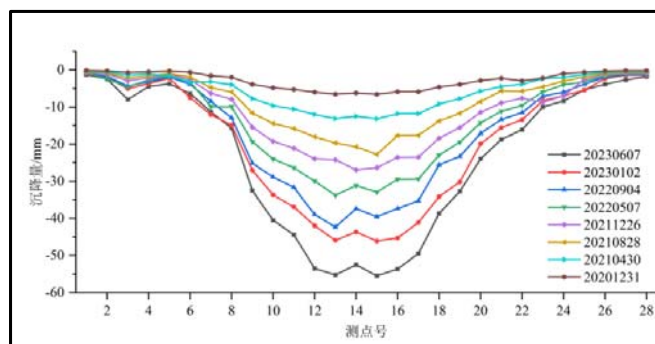


图4 倾向主断面地表地表移动变形监测曲线

监测数据分析表明,倾向主断面的沉降中心主要分布于6-22号监测点区间。时序监测结果显示,该区域最大沉降值呈现显著递增趋势:2020年12月31日为-6.6mm,2021年4月30日增至-13.2mm,2021年8月30日达到-22.8mm,2021年12月28日进一步发展为-26.9mm。至2022年5月15日,最大沉降值突破-33.0mm,并于2022年9月20日达到-39.5mm。监测期末(2023年6月30日),最大累积沉降量已达-55.5mm,较初始值增长约8.4倍。研究结果表明,走向与倾向主断面的最大沉降量及其变化速率均呈现持续增长特征,且未出现明显的拐点,这一现象与双向非充分采动的地表移动特征相吻合。

4 结论

采用2020年12月31日—2023年6月30日的64景Sentinel-1B数据,基于SBAS-InSAR技术对贵州某磷矿山地下开采地表沉降规律进行分析,并结合监测手段相互验证,分析了沉降区的时空演化特征,主要得到以下结论。

(1)基于InSAR技术的地表形变监测结果表明,研究区域累积沉降量主要分布在10-20mm区间范围内。2020年1月6日至2021年5月7日监测周期内,地表最大累积沉降量始终低于40mm阈值,且未观测到显著的地表形变特征。然而,自2021年5月7日后,研究区域开始呈现渐进式沉降趋势,其最大沉降量呈现持续增长态势,至2023年6月30日监测期末,最大沉降量已突破50mm。在累计开采面积达14km²的背景下,沉降区面积仅占0.086km²,且其空间扩展已进入相对稳定阶段。

(2)采动效应监测结果表明,矿体回采后在上覆岩层形成了典型的沉降盆地。时序观测数据显示,该沉降盆地呈现明显的空间扩展特征,其影响范围随时间推移持续向外延伸,且形变量自

边缘向中心呈现递增分布,形成典型的漏斗状沉降模式。定量分析显示,研究区域沉降面积及其扩展速率在2022年5月15日达到极值。走向与倾向主断面的最大沉降量及其变化速率均呈现单调递增趋势,且未出现拐点特征,这一现象与双向非充分采动理论具有良好的一致性。基于开采沉陷动力学理论,可以预见随着采出量的持续增加,研究区域的地表沉降效应将进一步加剧。

(3)基于地表沉降程度分级评估结果表明,研究区域内重度和极重度沉降区的空间占比为10.05%,对应面积为0.075km²。这一空间分布特征表明,在2020年12月至2023年6月的监测周期内,局部区域出现了显著的地表沉降现象。为确保矿山安全生产,建议加强对重点沉降区域的实时监测与预警,建立完善的地表形变监测体系。通过及时获取高精度的沉降数据,可为矿区地质灾害防治提供科学依据,有效保障周边居民的生命财产安全及区域生态环境安全。

【参考文献】

- [1]谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [2]康红普,徐刚,王彪,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J].采矿与岩层控制工程学报,2019,1(2):7-39.
- [3]QIN Shanlan, WANG Wenping, SONG Shangwu. Comparative study on vertical deformation based on GPS and leveling data[J]. Geodesy and Geodynamics,2018,9(2):115-12.
- [4]XIA Yuanping, WANG Yunjia, DU Sen, et al. Integration of D-InSAR and GIS technology for identifying illegal underground mining in Yangquan District, Shanxi Province, China[J]. Environmental Earth Sciences,2018,77(8):319.
- [5]ZHANG Lele, DAI Keren, DENG Jin, et al. Identifying potential landslides by stacking-InSAR in southwestern China and its performance comparison with SBAS-InSAR[J]. Remote Sensing,2021,13(18):3662.
- [6]LI Shaowei, XU Wenbin, LI Zhiwei. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges[J]. Geodesy and Geodynamics,2022,13(2):114-126.

作者简介:

杨子英(1997--),男,汉族,青海海东人,大学本科,主要从事井工矿山测量与露天矿山监测等方面的研究工作。