

# 基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测分析

缙少伟 程华伟

南京宝地梅山产城发展有限公司矿业分公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2332

**[摘要]** 铁矿石资源的合理开发利用对中国经济发展和生态环境意义重大。随着金属矿山开采深度增加,深部岩体呈现复杂现象,采用崩落法开采易引发地表沉降,带来严重经济、社会和环境问题,因此研究深部崩落法开采引起的地表沉降规律愈发必要。本文采用雷达差分干涉测量技术中的小基线集技术(SBAS)对江苏省南京市雨花台区梅山铁矿进行研究。以2021年1月25日至2024年7月30日共116景宽幅干涉模式Sentinel-1A SAR影像及SRTM1 DEM数据为数据源,阐述了SBAS-InSAR技术原理及处理流程。应用该技术提取了梅山矿业塌陷区地面年平均沉降速率,研究区内最大沉降速率为 $-75.6\text{mm/year}$ ,最大抬升速率为 $24.6\text{mm/year}$ ,分析研究数据可知,P1区域最大累计沉降量为 $-240.4\text{mm}$ ,沉降速率为 $-75.6\text{mm/year}$ ,沉降过程最为明显;P2区域最大累计沉降量为 $-144.6\text{mm}$ ,年平均沉降速率为 $-40.6\text{mm/year}$ ,变化过程较为平缓;塌陷区累计沉降量,呈现出明显季节性特征,春季较为稳定,夏秋季变化速率加快,冬季趋于平缓。研究表明,SBAS技术可为矿区地表变形监测与分析提供新的监测思路。

**[关键词]** 雷达差分干涉; SBAS-InSAR; 地表沉降

中图分类号: TN95 文献标识码: A

## Monitoring and Analysis of Mining Area Surface Subsidence Based on SBAS-InSAR

Shaowei Gou Huawei Cheng

Mining Branch of Nanjing Baodi Meishan Industry - City Development Co., Ltd.

**[Abstract]** The rational development and utilization of iron ore resources are of great significance to China's economic development and ecological environment. With the increase of mining depth in metal mines, deep rock masses exhibit complex phenomena. The adoption of caving method mining is prone to triggering surface subsidence, resulting in severe economic, social, and environmental problems. Therefore, it is increasingly necessary to study the laws of surface subsidence caused by deep caving method mining. In this paper, the Small Baseline Subset (SBAS) technique, a type of differential interferometric synthetic aperture radar (DInSAR) technology, is applied to conduct research on the Meishan Iron Mine in Yuhuatai District, Nanjing City, Jiangsu Province. Taking 116 Sentinel-1A SAR images in wide-swath interferometric mode and SRTM1 DEM data from January 25, 2021 to July 30, 2024 as data sources, the principle and processing flow of the SBAS-InSAR technology are elaborated. The technology is used to extract the annual average surface subsidence rate of the collapse area in Meishan Mining Area. The maximum subsidence rate in the study area is  $-75.6\text{ mm/year}$ , and the maximum uplift rate is  $24.6\text{ mm/year}$ . Analysis of the research data shows that the maximum cumulative subsidence in Area P1 is  $-240.4\text{ mm}$  with a subsidence rate of  $-75.6\text{ mm/year}$ , showing the most obvious subsidence process; the maximum cumulative subsidence in Area P2 is  $-144.6\text{ mm}$  with an annual average subsidence rate of  $-40.6\text{ mm/year}$ , presenting a relatively gentle variation process. The cumulative subsidence in the collapse area exhibits significant seasonal characteristics: it is relatively stable in spring, the variation rate accelerates in summer and autumn, and tends to be gentle in winter. The research indicates that the SBAS technology can provide new monitoring ideas for the monitoring and analysis of surface deformation in mining areas.

**[Key words]** Differential interferometry synthetic aperture radar; Small baseline subset(SBAS); Surface subsidence

## 引言

在全球资源竞争格局日益激烈的背景下,铁矿石作为钢铁工业的核心原材料,其合理开发与利用已成为关乎中国经济高质量发展与生态文明建设的重要命题。作为世界主要的钢铁生产与消费国,中国对铁矿石的需求持续处于高位,科学规划铁矿石开发,提升资源利用效率,是保障钢铁产业供应链安全、稳定工业经济增长的基础,对维持国民经济健康运行、提升国际竞争力具有不可替代的作用。深部岩体普遍具有高地应力、高地温和高岩溶水压等条件,这些因素显著改变岩体的力学行为,使其变形模式由浅部常见的脆性破裂逐步向延性乃至黏塑性变形演化。在此背景下,深部采动扰动下的岩体运动规律亦更加复杂,其诱发的空间变形传播、结构破坏以及地表沉陷特征均与浅部开采存在明显差异,表现出更高的非线性与不确定性<sup>[1]</sup>。当地下空间的发展超过围岩结构所能承受的稳定程度时,顶板岩体内部原有的支撑结构被破坏导致采空区上方形成冒落带和裂隙带<sup>[2]</sup>,此破坏过程不仅重塑地下空间结构,还通过应力传递与岩体变形的连续性,在地表形成与地下采动密切相关的沉降变形区域。当地下空间破坏带发育到一定高度并贯穿覆岩层时,原本稳定的地层结构被削弱,变形最终向地表传递,引发不同程度的地表沉陷。地表沉陷在空间上往往呈现出非均匀性特征,其沉降中心的下沉速率和幅度通常最为显著,而向边缘区域则逐渐减弱,这种差异化的沉降模式使地表形成交替分布的拉伸区与压缩区,进而诱发表面裂缝扩展、地层错动乃至局部塌陷等一系列地质灾害现象发生<sup>[3]</sup>。

雷达差分干涉测量技术(Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, DInSAR)通过对同一区域获取的多时相SAR影像进行相干处理,从而提取地表形变信息<sup>[4]</sup>,是提取高精度、细空间分辨率和微量形变信息的地表形变监测技术。凭借相位信息处理与雷达回波分析的独特机制,DInSAR技术实现了对地表形变的毫米级监测精度,在城市、山体及矿区等复杂环境下,突破时间与天气限制,为沉降监测工作提供稳定可靠的技术解决方案。然而,DInSAR技术的测量精度会受到时空基线变化和大气效应等因素的影响。小基线集技术(Small Baseline Subset, SBAS)通过减弱时空失相关与大气延迟的干扰,即使利用数量有限的影像,也能够获取毫米级的时间序列沉降数据<sup>[5]</sup>,利用数量有限的影像得到毫米级的时序沉降量。在矿区等采矿活动频繁的区域,由于地表散射特性随时间变化不稳定,传统DInSAR方法难以实现长期监测<sup>[6]</sup>,相比之下,SBAS技术能够有效克服这些限制,实现矿区长期序列地表形变的有效监测。

本文基于小基线集(SBAS)技术,对116景Sentinel-1A卫星影像数据开展时序干涉处理,精确反演研究区域的地表沉降速率,并绘制累计沉降时序曲线。研究结果表明,SBAS技术凭借其高精度、高时空分辨率的监测特性,能够有效捕捉矿区地表形变的动态演化过程,为矿区沉降灾害预警与生态修复提供可靠数据支撑,在矿区地表沉降监测领域展现出显著的技术优势与广阔的应用前景。

## 1 研究区概况

梅山铁矿位于江苏省南京市雨花台区,地理位置独特。雨花台区属亚热带季风气候,温暖湿润的气候条件对矿区的水文地质和生态环境产生一定作用。梅山铁矿作为重要的矿产资源地,对于江苏省乃至全国的钢铁工业发展具有重要意义。对该研究区的深入研究,有助于揭示铁矿的成矿机制、资源潜力以及可持续开发利用的策略,为矿产资源的科学管理和高效利用提供坚实的理论基础和实践指导。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源

#### 2.1.1 Sentinel-1A SAR数据

本次实验所采用的SAR数据来源于Sentinel-1A卫星影像,该卫星的重访周期为12天,工作波段为C波段,Sentinel-1系列数据由欧洲航天局(ESA)免费向公众开放,已在地震、滑坡、火山活动、矿区监测以及城市地表变形等多个领域发挥了重要作用<sup>[1,7,8]</sup>。

#### 2.1.2 SRTM1 DEM数据

本文还使用SRTM DEM数据作为地形参考。SRTM DEM由美国国家航空航天局(NASA)与美国测绘局联合开发<sup>[9]</sup>。美国航天飞机搭载的干涉测量系统于2000年就获取了全球大半以上陆地面积的地形信息,为地表沉降及地形分析提供了可靠的数据支持<sup>[5]</sup>。本文采用的外部参考DEM数据为SRTM1 DEM。

### 2.2 研究方法

SBAS-InSAR技术能够有效解决时空基线引起的失相干问题。该方法遵循小基线原则,通过设定合适的时空基线阈值,将所有SAR数据划分为若干基线子集<sup>[10]</sup>。随后,对每个子集内的SAR数据进行干涉处理,生成包含形变信息的干涉相位图,基于这些干涉相位图,利用最小二乘法对基线集进行解算,得到时间序列的形变相位分布,最后,通过应用特定的高通与低通滤波对残余相位进行处理,从而获得研究区域的平均形变速率及累计沉降量<sup>[11]</sup>。

## 3 梅山矿业塌陷区沉降状况动态监测

### 3.1 年平均沉降速率

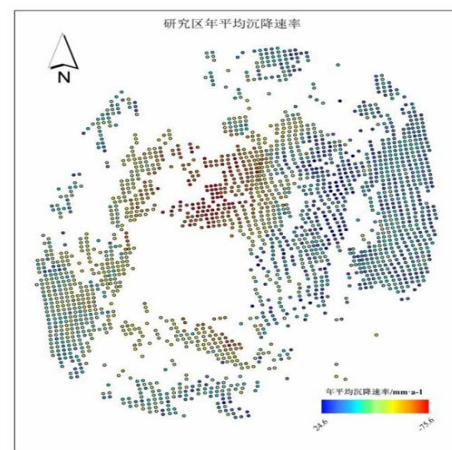


图3.1 研究区地面年平均沉降速率

应用SBAS-InSAR技术提取了2021年1月—2024年7月梅山矿业塌陷区的地面年平均沉降速率，研究区内越趋近于红色的部分，沉降速率越大。由上图3.1可知，研究区内最大沉降速率为-75.6mm/year，最大抬升速率为24.6mm/year，研究区内变化较明显的区域为塌陷区P1~P3区域。

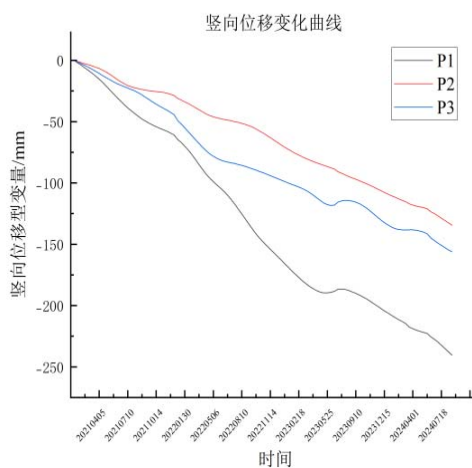
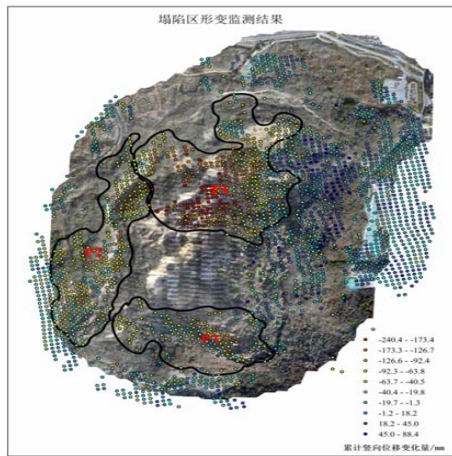


图3.2 塌陷区地面年累计竖向位移变化量

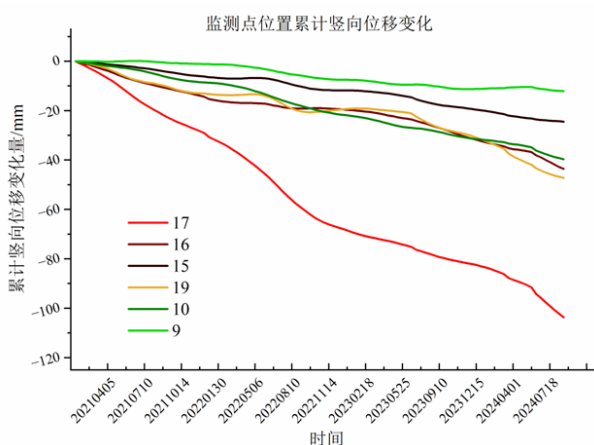


图3.3 GNSS监测点附近区域沉降变化曲线

据图3.2可知，P1区域为塌陷区北部，该区域竖向位移变化

较大，是最开始塌陷坑形成的位置，多年以来受地下采矿活动影响，位移变化较大，最大累计沉降量为-240.4mm，沉降速率为-75.6mm/year；P2区域位于塌陷区西部，变化相对较小，区域内最大累计沉降量为-144.6mm，年平均沉降速率为-40.6mm/year，变化过程较为平缓；P3区域在塌陷区南部，区域内最大累计沉降量为-153.0mm，年平均沉降速率为-53.2mm/year。P1区域在2021年1月至2023年4月份一直处于快速沉降变化过程，2023年4月至2023年9月有短暂的缓慢变化期，后又开始快速沉降，P2变化趋势与P1类似，但速度较慢，P3区域在研究期间内沉降速度一直比较稳定，一直在缓慢沉降。

### 3.2 监测点附近竖向位移变化分析

由图3.3在线监测点区域沉降变化曲线可知，17号监测点附近区域在研究期间内变化最为明显，累计沉降量为-106.5mm，变化速率为-27.5mm/year，2021年1月~2022年9月份变化速度较快，从2022年10月份开始，该监测点附近区域沉降速度有所降低，2024年6月份又开始加快，总体变化明显，表明该区域地表活动较为明显，极不稳定，在线监测数据为-90.9mm；10号、16号以及19号点位置整体变化也比较明显，累计竖向位移变化量分别为-9.7mm、-43.6mm、-47.2mm，16号在线监测系统中竖向位移量为-34mm，15号点附近区域位移变化较小，累计位移变化量为-24.5mm，在线监测累计位移变化为-22.1mm，相对较稳定，与在线监测点数据较为接近，变化过程较为一致。

通过以上数据可知，塌陷区时序累计沉降量与时间有一定的线性关系，随着时间的推移，累计形变量增加。进一步分析沉降的变化曲线图可知，大部分区域在春季变化较为稳定，在夏季和秋季变化速率明显加快，而冬季又趋于平缓，变化呈现出明显的季节性特征。

## 4 结束语

基于SBAS-InSAR(小基线集合成孔径雷达干涉测量)技术，根据研究区域内覆盖时间跨度适宜的多景SAR影像数据，通过预处理，包括去除噪声、辐射校正和几何校正等操作，运用干涉处理技术生成干涉图，同时考虑地形因素，利用外部数字高程模型(DEM)去除地形相位，以突出地形形变信息。再从干涉图序列中选取具有较小空间和时间基线的子集，构建小基线集，有效降低了大气延迟和地形误差等因素的影响。随后，采用最小二乘法等方法对小基线集中的干涉图进行相位解缠，获取真实的形变相位信息。最后，依据SAR成像几何关系和相位与形变量的转换关系，将相位信息转化为地表沉降量，并通过地理信息系统(GIS)技术进行空间分析与可视化表达，直观呈现了研究区域的沉降分布特征与变化趋势。

针对传统监测方法在时间和空间上存在失相关的问题，本研究采用SABS方法处理了116幅Sentinel-1A影像。通过分析这些影像，我们获得了研究区高空间分辨率的时间序列地表形变数据，包括年平均沉降速率及累积沉降量等关键指标，并针对与矿区较为接近的几个变化较为明显的监测点附近区域进行了分析。研究表明，矿区塌陷区内沉降变化较为明显，P1区域最大累

计沉降量为-240.4mm, 沉降速率为-75.6mm/年, 沉降过程较为明显; P2区域最大累计沉降量为-144.6mm, 年平均沉降速率为-40.6mm/年, 变化过程较为平缓; P3区域最大累计沉降量为-153.0mm, 年平均沉降速率为-53.2mm/年; 在区域沉降变化曲线中分析得知, 塌陷区累计沉降变化呈现出明显的季节性特征, 大部分区域在春季变化较为稳定, 在夏季和秋季变化速率明显加快, 而冬季又趋于平缓。通过以上分析表明, SBAS技术可以为矿区地表的变形监测与分析提供新的监测思路。

#### [参考文献]

[1]张桂香,王志远.基于时序SBAS-InSAR技术的地面沉降分析及预测[J].工程勘察:1-11.

[2]李新亮,邢斌,陈文聪.基于SBAS-InSAR的深部煤层群开采地表沉陷规律研究[J].华北科技学院学报,2024,21(06):37-44+96.

[3]仝云霄,胡晓佳,杨俊泉.基于SBAS-InSAR技术的天津地区地表沉降监测研究[J].地球学报:1-14.

[4]王鹏,赵月.联合SBAS-InSAR技术和概率积分法的矿区地表沉降监测及分析[J].山东煤炭科技,2024,42(10):154-159.

[5]闫高翔.联合升降轨SBAS-InSAR技术对茂县滑坡二维变形监测[J].甘肃水利水电技术,2024,60(09):11-15.

[6]戴振中,饶建东.基于SBAS-InSAR的人类活动对加沙地表形变影响研究[J].水利水电快报:1-5.

[7]夏璐文,徐佳,肖儒雅.基于时序InSAR技术的常州市地表形变监测与影响因素分析[J].测绘工程,2025,34(01):53-61.

[8]李长山,迟帅.基于时序InSAR遥感监测的中山市软土地面沉降特征及成因研究[J].地质灾害与环境保护,2024,35(4):31-38.

[9]孙云强,邱鑫鹏,陈常勇.GNSS和InSAR约束的2023积石山MS6.2地震同震滑动分布[J].地震工程学报,2024,46(4):867-879.

[10]孙军,张锦.基于SBAS-InSAR和偏移追踪技术的露天煤矿地面形变监测[J].煤矿安全,2022,53(03):162-169.

[11]周小龙,石鹏卿,张娟.基于SBAS-InSAR技术的平川矿区形变监测与分析[J].地理空间信息,2024,22(06):53-56+60.

#### 作者简介:

缙少伟(1995--),男,汉族,河南省西华县人,研究生,论文方向(具体): 矿山测量。