

# 基于 SBAS-InSAR 技术的六盘水神仙坡煤矿地表形变监测及特征分析

耿浩明<sup>1</sup> 邓小东<sup>\*1,2</sup> 张显云<sup>1</sup> 郑乃铨<sup>3,4,5</sup> 杨涛<sup>1</sup> 冉鹏飞<sup>6</sup>

(1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 浙江大学环境与资源学院农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310058; 3. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 4. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310; 5. 自然资源部海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590; 6. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 贵州岩溶地貌发育显著, 地质条件复杂, 地表形变往往具有隐蔽性、突发性和非线性特征。传统地面监测手段受限于地形和可达性, 难以全面覆盖监测区域, 差分干涉雷达技术在复杂地貌条件下易受时空失相干与大气误差干扰。本研究基于六盘水神仙坡煤矿的 54 景 Sentinel-1A 卫星数据, 采用小基线集干涉合成孔径雷达技术 (SBAS-InSAR) 对其地表形变特征进行时间序列分析, 研究结果表明, 矿区在 2023 年 1 月 12 日至 2025 年 1 月 1 日期间呈现出自西向东的非均匀沉降趋势, 最大累计沉降量约为 138mm, 最大沉降速率约为 62mm/a, 随着开采活动的持续进行, 地表沉降呈现加速态势, 沉降范围逐步扩大, 揭示了开采强度与地表形变之间的显著关联性。研究验证了 SBAS-InSAR 技术在矿区地表形变监测中的高效性和可靠性, 为西南类似矿区地质灾害早期预警与安全防治管理提供了参考案例。

**关键词:** SBAS-InSAR 技术; 矿区形变监测; 时序分析; 沉降漏斗

贵州作为我国西南地区矿产资源大省, 矿产资源开发与地质灾害矛盾突出。随着矿产资源开发活动日趋密集, 矿区地表沉降问题愈发凸显, 对居民房屋、道路交通、农田水利等基础设施造成持续损害, 给经济发展与社会稳定带来了不容忽视的风险<sup>[1]</sup>。因此, 对矿产开采引起的地表沉降进行监测具有重要意义。

水准测量、全球定位技术以及倾斜仪监测等地表形变传统监测技术<sup>[2]</sup>虽然能够提供高精度的形变数据, 然而, 它们的空间覆盖范围有限、工作量大, 且难以实现对大面积区域的连续性监测。时序 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术凭借其全天候、大范围、高精度的监测优势, 已逐步成为矿区地表形变监测的重要技术手段<sup>[3-7]</sup>。其中, SBAS-InSAR (Small Baseline Subset-Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR) 技术通过处理多时相 SAR (Synthetic Aperture Radar, SAR) 影像, 构建短基线干涉对, 能有效缓解单主影像干涉中常见的失相干问题, 显著抑制时空失相干和大气延迟影响, 从而提高形变监测的时空分辨率和可靠性<sup>[8-10]</sup>。近年来, 该技术在城市与矿区地面沉降监测中取得了一系列成果。赵伟颖等利用 SBAS-InSAR 技术实现了矿区及周边建筑沉降的可靠监测<sup>[11]</sup>; 王后望基于该方法成功获取了上海新成陆区地面的沉降分布规律, 为新成陆区的地质灾害治理和地下管线设施的维护、预警提供参考<sup>[12]</sup>; 王风云等利用 SBAS-InSAR 技术对 58 景 C 波段 Sentinel-1A 数据进行处理得到的矿区地表形变结果与水准监测结果一致<sup>[13]</sup>; 张香凝等基于 SBAS-InSAR 技术对蒲河煤矿开展地表形变监测, 揭示了研究期内采煤活动引发的地表形变时空演变规律<sup>[14]</sup>。现有矿区地表形变的研究多集中于山西大同、陕西神木等北方煤矿区, 西南喀斯特矿区因其薄层矿体、非均匀沉降、高坡度等特征造成监测困难, 难以揭示其时空形变演化规律。

**资助项目:** 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2024]一般 093); 中国博士后科学基金第 76 批面上资助课题 (2024M761845); 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金课题 (MESTA-2024-B001); 山东省博士后创新项目 (SDCX-ZG-202502046); 青岛市自然科学基金青年项目 (25-1-1-54-zyyd-jch); 2025 年度国家资助博士后研究人员计划 B 档 (GZB20250067); 贵州大学创新训练项目 (gzuxc2024075); 贵州大学实验开放项目 (SYSKF2025-081)。

**作者简介:** 耿浩明 (2005-), 男, 本科生, 研究方向为测绘工程, 从事矿区地表形变监测研究工作。

**通讯作者:** 邓小东 (1989-), 男, 实验师, 博士生, 研究方向为测绘工程, 从事矿山开采与地表形变、矿山采空区治理研究工作。

近年来,随着开采强度增大,六盘水市神仙坡煤矿地表形变问题日益突出,迫切需要对其地表沉降情况进行监测,探究其地表及岩层移动变形的成因。本研究选取覆盖该矿区的54景 Sentinel-1A SLC (Single Look Complex) 影像,采用 SBAS-InSAR 技术精确地获取了研究区域内地表累计沉降分布及平均沉降速率。研究结果揭示了矿区地表形变的时空演化规律,并针对三个显著沉降区域及两个剖面进行深入分析,以探讨其形变特征。监测期内,矿区地表最大累计沉降量达 138mm,最大沉降速率约为 62mm/a。矿区地表沉降的形成机制受地质构造、煤层赋存条件及开采工艺等因素综合影响,其变形特征呈现出明显的时空异质性。

## 1 SBAS-InSAR 技术原理

2002年, Berardino 等人<sup>[15]</sup>提出运用 SBAS-InSAR 技术,基于多幅 SAR 影像构建时空基线较短的干涉对集合,通过设定合理基线阈值以保持干涉对间相干性,基于最小二乘法对各小集合的形变序列进行解算,并通过奇异值分解(SVD, Singular Value Decomposition)对各小基线集合的形变序列进行联合解算,得到形变相位在最小范数意义下的最小二乘解<sup>[16]</sup>,最终获取整个观测时段内地表形变的时间序列信息,生成平均形变速率图和形变时间序列图。

对覆盖同一地区的  $N + 1$  景按时间序列  $(T_0, T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_N)$  获取的 SLC 影像,选择一景作为超级主影像进行配准,生成一系列干涉对。引入外部 DEM 消除地形相位后,得到  $M$  幅差分干涉图。其中  $M$  需满足<sup>[17]</sup>:

$$\frac{N+1}{2} \ll M \ll N \left( \frac{N+1}{2} \right) \quad (1)$$

用  $T_A$ 、 $T_B$  两时刻获取的 SAR 影像生成去除地形相位的第  $z$  幅干涉图,且  $T_A$  时刻滞后于  $T_B$  时刻 ( $T_B$  大于  $T_A$ ),则此干涉图的干涉相位可表示为

$$\delta\varphi_j = \varphi_A - \varphi_B \approx \frac{4\pi}{\lambda} (d_A - d_B) \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为雷达波长;  $d_A$  与  $d_B$  分别为  $T_A$ 、 $T_B$  时刻相对于参考时刻  $T_0$  沿雷达视线方向 (LOS, Line Of Sight) 的累计形变量,其中  $T_0$  时刻的形变量  $d_0 = 0$ 。

主影像和从影像对应的时间序列可分别定义为主影像序列  $V = [V_1, \dots, V_K]^T$  和从影像序列  $W = [W_1, \dots, W_K]^T$ ,在按时间顺序排列后,需确保每一对主从影像满足  $V_i > W_i, i = 1, 2, \dots, K$ ,则第  $i$  幅干涉图的相位可表示为<sup>[18]</sup>

$$\delta\varphi_j = \varphi(t_{V_i}) - \varphi(t_{W_i}), i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

将式(3)写成矩阵形式为:

$$\delta\varphi = C\varphi \quad (4)$$

式中,  $C$  为  $K \times N$  矩阵。 $K$  行对应  $K$  幅干涉图,  $N$  列对应  $N$  个时间段的 SAR 影像。通过最小二乘与 SVD 方法,可计算出雷达 LOS 方向相邻时刻间的平均相位变化速率,进而对各时间段的平均形变速率进行积分,从而获得高相干点的时间序列形变结果。

## 2 研究区概况及实验数据处理

### 2.1 研究区概况

神仙坡煤矿位于贵州省六盘水市钟山区,是六盘水煤矿的重要组成部分,研究区地理位置如图 1 所示。矿山总面积达 7.2797km<sup>2</sup>,地理坐标为 104° 50' 57" ~ 104° 56' 23" E, 26° 45' 2" ~ 26° 49' 55" N,地势呈西北高、东南低的态势,距市区约 15 km,交通条件便利。研究区属亚热带湿润季风气候区,年均气温 12~14℃,雨热同季,降雨多集中在 5~9 月。

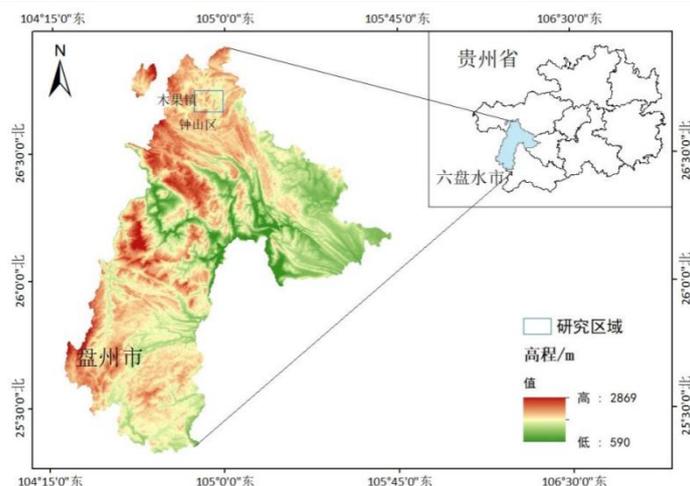


图 1 神仙坡煤矿位置

## 2.2 实验数据准备与处理

本研究选取 2023 年 1 月 12 日至 2025 年 1 月 1 日矿区仍处于正常生产状态的 54 景 Sentinel-1A SLC 数据，波段为 C，波长为 5.63 cm，地面分辨率为 5 m × 20 m，成像为干涉宽幅模式，考虑到 VV 极化方式对具有垂直极化特征的地物敏感度高，故影像极化方式均为 VV，轨道均为升轨方向。轨道数据采用欧空局发布的定位精度优于 5cm 的精密定轨星历数据（POD, Precise Orbit Ephemerides），获取美国航空航天局提供的 SRTM1 V3 DEM 数据以减弱地形引起的相位误差，帮助干涉相对配准。

表 1 实验数据信息

数据类型	数据名称	数据来源	精度/分辨率	作用	关键特性
SAR 影像数据	Sentinel-1A SLC	欧空局 (ESA) 哥白尼计划	方位向 5m× 距离向 20m	获取地表雷达后向散射信号，生成干涉相位图	C 波段 (5.63cm 波长)、IW 模式 (干涉宽幅)、VV/VH 极化、12 天重访周期 (单星)
精密轨道数据	POD (Precise Orbit Ephemerides)	欧空局 (ESA) 免费提供	定位精度 优于 5cm	校正卫星轨道误差，提高干涉相位精度	包含卫星位置和速度信息
数字高程模型	SRTM1 V3	美国航空航天局 (NASA)	30m 分辨率	去除地形相位，辅助地理编码和相位解缠	覆盖全球 60° N~56° S，高程精度 ±10m (90%置信度)

利用 SBAS-InSAR 技术处理实验数据，具体流程如下：

1) 利用 ArcGIS 软件绘制出研究区适量边界，结合对应的 POD 精密定轨星历数据对 54 景 Sentinel-1A SLC 影像进行裁剪。

在 SARscape 软件中，空间基线阈值设定为最大临界基线的 2%，时间基线阈值设为 120 d，最大连接数限制为 6，共生成 220 个干涉对，最大空间基线为 113 m，最大时间基线为 120 d。干涉像对及时空基线分布如图 2 所示。

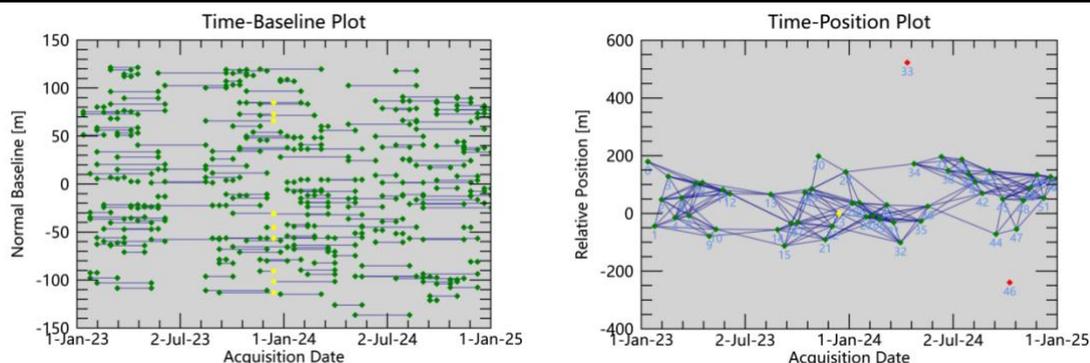


图2 (左) 干涉像对图和 (右) 时空基线图

2) 干涉处理阶段, 首先将所有影像配准至同一超级主影像。为有效抑制噪声并减少计算量, 对影像进行多视处理, 设置距离向与方位向的多视窗口分别为  $8 \times 2$ 。利用外部 DEM 去除地形相位后, 采用窗口大小为  $5 \times 5$  的 Goldstein 滤波器对差分干涉图进行滤波, 在抑制斑点噪声的同时提高干涉条纹的清晰度, 最终生成分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  的 SLC 数据影像。

3) 采用稠密最小费用流法 (Dense Minimum Cost Flow) 进行相位解缠, 通过多次实验, 确定解缠相干系数阈值为 0.15 时, 较多数据点得以保存, 经过严格筛选并剔除相干性低和干涉效果差的干涉对后, 得到 194 个差分干涉对组合用于时序分析。

4) 反演第一步: 在完成轨道精炼和采集 GCP 点重去平后, 估算初始形变速率与残余地形, 并对干涉图进行优化; 反演第二步: 基于第一步所得的形变速率结果, 进行定制的大气滤波, 以估算并去除大气相位, 从而获取更为可靠的时间序列位移信息。

5) 最后, 对 SBAS-InSAR 分析生成的形变结果进行地理编码, 将其由雷达坐标系转换至地理坐标系, 最终输出地表累计沉降量与年平均沉降速率。

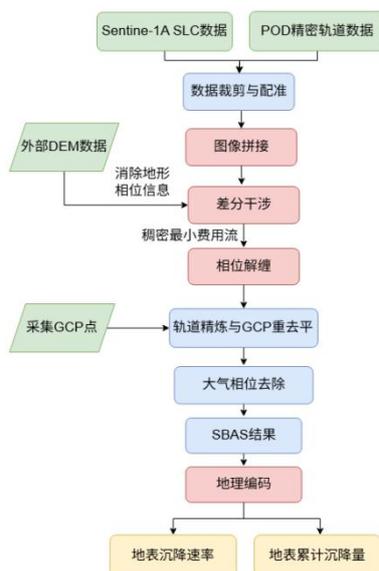


图3 SBAS-InSAR 数据处理流程图

### 3 SBAS-InSAR 形变监测结果与分析

#### 3.1 神仙坡煤矿年平均沉降速率

为深入揭示神仙坡煤矿地表形变的时序演变规律, 本研究选取了三个沉降特征显著的区域进行重点剖析, 分别为位于矿区中部的 N 区域、西南侧的 K 区域以及东南侧的 P 区域。此外, 在矿区中部绘制 A1A2、B1B2 两条剖面线, 矿区地表形变速率如图 4 所示。结果显示, 整个矿区范围内出现了大范围沉降现象, 最大年平均沉降速率超过  $60 \text{ mm/a}$ , 显著高于周边非开采区域, 这直接

印证了采矿活动对加速地表沉降的主导作用。具体而言,中部 N 区域的沉降速率最高,约为 62 mm/a;东南部 P 区域次之,约为 53 mm/a;西南部 K 区域相对较低,约为 46 mm/a。

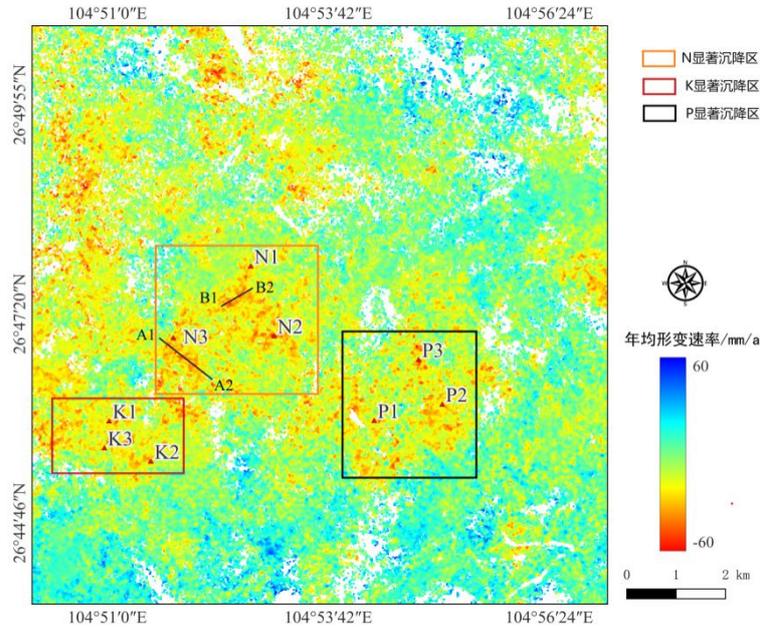
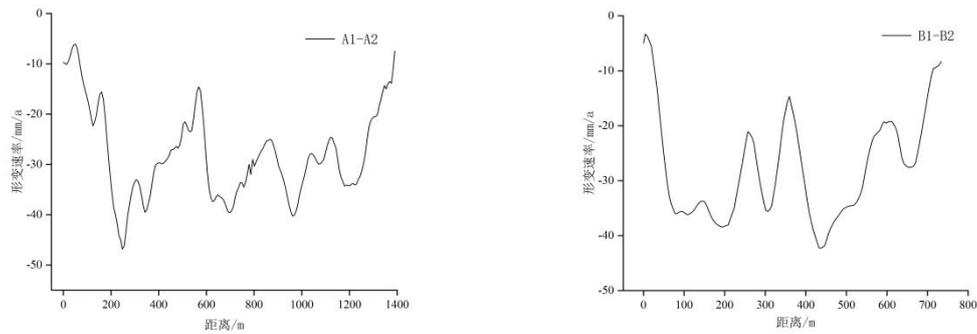


图 4 神仙坡煤矿年均形变速率图

图 5 展示了沿 A1A2 和 B1B2 剖面的年平均沉降速率变化曲线。A1A2 剖面的最大年平均沉降速率为 46.823 mm/a, 其速率变化表现出多次起伏的格局, 形成了数个明显的沉降漏斗。在 0~250 m 范围内, 年平均沉降速率逐渐攀升至峰值; 随后在 250~570 m 间, 年平均沉降速率转为递减趋势, 构成了该剖面上最主要的沉降漏斗; 自 570 m 处至剖面末端, 年平均沉降速率又经历了两次“上升-下降”的波动过程, 其局部最大沉降速率分别达到 39.593 mm/a 和 40.274 mm/a。B1B2 剖面的年平均沉降速率变化同样呈现出波动态势。在 0~300 m 内, 年平均沉降速率整体增长, 于 195 m 处达到首个峰值 38.4 mm/a, 之后下降至 14.7 mm/a 左右; 随后在 437m 附近, 年平均沉降速率急剧上升至第二个峰值 42.3 mm/a; 在 440~800m 间, 年平均沉降速率整体表现为逐步递减的趋势。



(a) A1A2 剖面平均形变速率

(b) B1B2 剖面平均形变速率

图 5 神仙坡煤矿 A1A2 剖面和 B1B2 剖面年平均形变速率图

### 3.2 神仙坡煤矿累计沉降量

为深入揭示不同沉降区的时空演化规律与内在机制, 在 N、K、P 三个区域内各选取三处代表性沉降点展开分析, 沉降点的位置如图 4 所示, 矿区累计沉降量随时间的变化如图 6 所示。监测期内, 所有特征点的累积沉降量均表现为持续增长趋势。N 区域的最大累计形变量达到-138 mm, K 区域和 P 区域分别为-125 mm 和-129 mm。

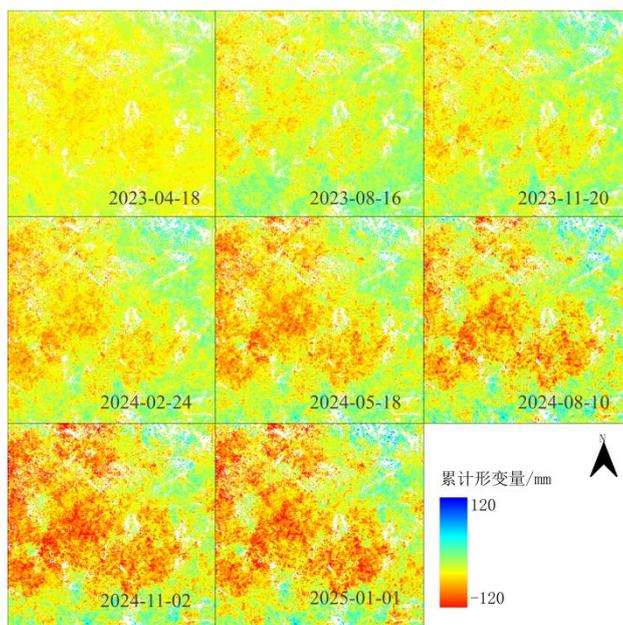
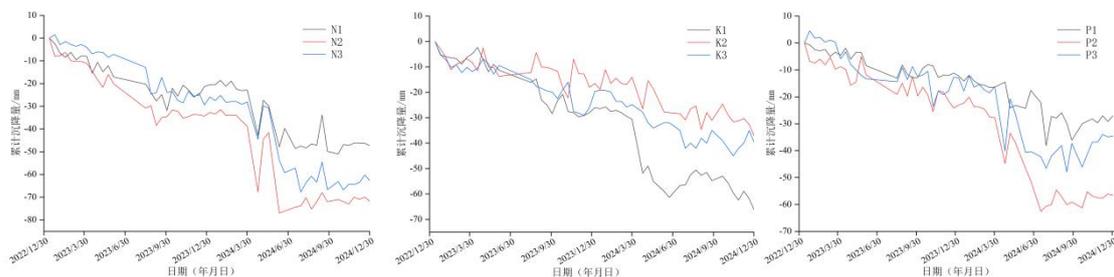


图6 神仙坡煤矿累积沉降量时序分布图

各沉降区内特征点的具体累积形变曲线如图7所示。在N区域，三个特征点的沉降趋势相同，但沉降量存在差异。其中，2号点的累积形变量最大，最终累积沉降值为72 mm；3号特征点次之，累计沉降值达到62.9 mm；1号特征点的沉降情况相对最轻，累计沉降值为47.41 mm。这种空间差异可能与各点下方煤层的开采顺序、厚度以及顶板岩性有关。2号点可能位于开采强度最大或覆岩最易塌陷的区域。

K区域的形变时序特征揭示了开采活动的阶段性影响。1号点的沉降态势最为显著，累计沉降值达66.61 mm。在2023年期间，其沉降曲线相对平缓，表明该时段的开采扰动较弱；自2024年4月起，其沉降曲线陡降，沉降速率显著加快，这与该区域下方工作面的推进或开采强度的陡然增加相关。相比之下，位于矿坑边缘的2、3号特征点因受开采直接影响较小，其累计沉降曲线在整个监测期内均变化平缓，累积沉降量分别为37.51mm、40mm。

P区域各特征点的沉降曲线自2024年3月起均呈现急剧下降趋势，尤以2号点最为显著，最大累计沉降量达62.6mm。这种同步加速沉降现象，一方面表明该时期东南区域开采活动的集中进行，另一方面也可能受到同期季节性降水的叠加影响。降水入渗会软化上覆岩土体、增加荷载，还可能对地下水位产生潜在影响，进而与采矿活动共同作用，加剧地表沉降。



(a) N 沉降区域累计形变曲线 (b) K 沉降区域累计形变曲线 (c) P 沉降区域累计形变曲线

图7 神仙坡煤矿各沉降区域特征点沉降曲线

#### 4 结束语

本研究基于54景Sentinel-1A SLC数据，采用SBAS-InSAR技术有效提取了神仙坡煤矿在观测时段内的时序地表形变信息，包括累积沉降分布与平均沉降速率等。主要结论如下：

1) 矿区地表整体呈现出由西向东的差异性沉降格局，监测到的最大累计沉降量达138mm。累

计沉降量与时间呈现近似线性增长关系,最大沉降速率约为 62 mm/a。

2) 地表沉降的时空演变特征与矿区开采活动的时空分布具有显著一致性, SBAS-InSAR 技术通过时序分析可有效克服传统 DInSAR 方法中解缠相干阈值设定及干涉数据对选择对监测结果的影响,能够准确体现沉降区域与非沉降区域之间的对比关系,完整揭示开采扰动影响下地表形变的动态响应过程,垂直形变监测精度可达毫米级,时间连续性满足矿区月度监测需求,可为矿区地表稳定性评估提供可靠的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 马立龙,蔡瑞庆,张帆,等.基于 D-InSAR 技术的杨伙盘矿区地表形变监测与分析[J].河南科技,2024,51(03):37-41.
- [2] 张国振.基于 Sentinel-1A 数据的矿区地表沉降监测研究[D].内蒙古工业大学,2023.
- [3] 胡晓宁,宋闯,余琛,等.基于时序 InSAR 技术的长白山天池火山长周期形变监测与分析[J].地球物理学报,2025,68(05):1660-1677.
- [4] 郭捷,张功海,宋焯炜,等.联合 Sentinel-1A 升降轨的 DS-InSAR 金川矿区形变提取[J].测绘通报,2025,(03):1-7.
- [5] 张熠斌,宋金红,徐誉维,等.基于时序 InSAR 的吉林省煤炭采空区地表形变监测及时空演化态势分析[J].水文地质工程地质,2025,52(01):202-213.
- [6] 辛楚冰,张金彪,杨长益. InSAR 技术原理及应用分析[J].信息记录材料,2025,26(01):198-200+227.
- [7] 徐思瑜,张熠斌,徐誉维,等.基于时序 InSAR 的长春市九台区煤炭采空区地表沉降监测及时空演化态势分析[J].中国煤炭,2024,50(08):212-222.
- [8] 周小龙,石鹏卿,张娟,等.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.
- [9] 陈宏,江峻毅,纪成亮,等.基于 SBAS-InSAR 技术的高山峡谷区滑坡隐患早期识别[J].安全与环境工程,2024,31(03):206-216.
- [10] 穆景涵.面向小基线型堆栈的多基线 InSAR 处理方法研究[D].重庆大学,2023.
- [11] 赵伟颖,邓喀中,杨俊凯,等.基于 SBAS 技术的采动区形变对建筑物的影响监测[J].煤矿安全,2015,46(02):205-208.
- [12] 王厚望.基于时序 InSAR 的上海新成陆区地表沉降监测分析[J].测绘与空间地理信息,2025,48(01):33-36.
- [13] 王风云,陶秋香,郭在洁,等.基于 SBAS-InSAR 技术的矿区地面沉降监测与分析[J].中国科技论文,2022,17(05):571-580.
- [14] 张香凝,贺黎明,刘翠芝,等.基于 SBAS-InSAR 技术的煤矿开采沉陷监测与分析[J].遥感技术与应用,2022,37(04):1021-1028.
- [15] P. B ,G. F ,R. L , et al.A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2002,40(11):2375-2383.
- [16] 胡乐银,张景发,商晓青. SBAS-InSAR 技术原理及其在地壳形变监测中的应用[J].地壳构造与地壳应力文集,2010,(00):82-89.
- [17] 陶勇,张熠斌,孔祥雪,等.基于 SBAS-InSAR 技术的辽源西安煤田地表沉降监测及时空演化态势分析[J].勘察科学技术,2025,(02):54-59+65.
- [18] 杨志强.融合 InSAR 校正和深度学习的滑坡易发性评价[D].应急管理部国家自然灾害防治研究院,2023.

## Monitoring and Genesis Analysis of Surface Deformation in Shenxianpo Coal Mine, Liupanshui Using SBAS-InSAR Technology

GENG Haoming<sup>1</sup>, DENG Xiaodong<sup>\*1,2</sup>, ZHANG Xianyun<sup>1</sup>, ZHENG Naiquan<sup>3,4,5</sup>,  
YANG Tao<sup>1</sup>, RAN Pengfei<sup>6</sup>

*(1. College of Mining Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 3. College of Surveying and Geo-Informatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 4. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou, Guangdong 510310, China; 5. Key Laboratory of Marine Surveying and Mapping, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266590, China; 6. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)*

**Abstract:** The karst landscape of Guizhou is notably developed, with complex geological conditions where surface deformation often exhibits characteristics of concealment, abruptness, and nonlinearity. Traditional ground-based monitoring methods are limited by terrain and accessibility, making it difficult to achieve comprehensive coverage of the study area. Differential interferometric radar technology is prone to interference from temporal-spatial decorrelation and atmospheric errors under complex topographic conditions. Based on 54 scenes of Sentinel-1A satellite data from the Shenxianpo Coal Mine in Liupanshui, this study applied the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique to analyze the time-series characteristics of surface deformation. The results indicate that during the period from January 12, 2023, to January 1, 2025, the mining area exhibited a non-uniform subsidence trend from west to east, with a maximum cumulative subsidence of approximately 138 mm and a maximum subsidence rate of about 62 mm/a. As mining activities continued, surface subsidence showed an accelerating trend, and the affected area gradually expanded, revealing a significant correlation between mining intensity and surface deformation. This study verifies the efficiency and reliability of the SBAS-InSAR technique in monitoring surface deformation in mining areas, providing a reference case for early warning of geological hazards and safety management in similar mining regions in southwestern China.

**Keywords:** SBAS-InSAR; Mining-induced deformation; Time-series displacement analysis; Subsidence depression