

# Coal Mineral Surface Element Monitoring Based on Time-series InSAR Technology

Bingrong Gou

China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Absrtact

In response to the unique landforms of the Loess Plateau, characterized by numerous gullies, and the issues related to the shallowly buried coal seams in northern Shaanxi with few high-correlation points and difficulties in inverting surface morphology, this study conducts temporal surface subsidence analysis based on time series InSAR technology over the entire mining area of Guojiawan Coal Mine of Guoneng Yulin Energy Co., Ltd., as well as a 200-meter extension beyond, to deeply analyze the spatiotemporal evolution patterns in the coal mining area, reveal the characteristics of the spatiotemporal evolution of surface deformation, and determine the extent of surface collapse caused by subsidence from historical small coal mine excavations.

## Keywords

InSAR; PS-InSAR; Coalminesurface; Settlementmonitoring

## 基于时序 InSAR 技术的煤矿地表沉降监测

苟丙荣

中煤科工西安研究院（集团）有限公司，中国·陕西 西安 710000

## 摘要

针对黄土高原沟壑纵横的特殊地貌，以及陕北浅埋煤层高相干点少、反演地表形态困难的问题，本研究基于时序InSAR技术对国能榆林能源有限责任公司郭家湾煤矿全井田范围及外延200米范围内进行时序地表沉降分析，深入分析煤矿区时空演化规律，揭示其地表形变的时空演化规律特征，并确定因历史小煤窑采煤沉降引起的地表塌陷范围。

## 关键词

InSAR; PS-InSAR; 煤矿地表; 沉降监测

## 1 引言

煤炭作为我国的主体能源，在国民经济和社会发展中占据举足轻重的地位，推动了社会进步和经济发展的步伐。但其引发的生态环境问题日益凸显。主要表现为：土地塌陷、耕地受损、土壤性质和植物产量下降；村庄房屋大面积损毁，地面交通线路受损；地下水位变化并受到污染，严重影响矿区的生态环境；并且引发山体开裂、崩塌、滑坡、泥石流以及地震等次生地质灾害<sup>[1]</sup>。这些灾害的根源在于开采导致的地表沉降，现已成为破坏矿区生态环境的主要因素之一。随着空间对地观测技术的发展，最初以水准测量为主、全站仪为辅的沉降监测手段逐渐被全球定位系统（GPS）所取代。然而，随着监测要求的不断提升，传统测量手段的局限性也日渐显现<sup>[2]</sup>，如监测周期长、工作量大、成本高；空间分辨率低，监测范围小、监测数据量少等。由于这些限制，对整

个矿区范围内的沉降规律进行全面研究面临挑战。近年来，合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）技术发展快速。作为一种主动成像式的微波遥感手段，并具备连续空间覆盖、高精度监测地表形变的能力。大量科研成果和应用实例表明，InSAR 测量手段已广泛应用于滑坡、地壳位移及地下资源开采引起的地表形变监测等领域<sup>[3]</sup>。因此，针对煤矿开采沉降的特点，研究基于时序 InSAR 技术的煤矿地表沉降监测，对于矿区开采沉降监测及生态环境保护具有重要的理论指导意义和现实应用价值。

## 2 数据处理及解译方法

### 2.1 InSAR 技术原理

InSAR 是一种高精度对地微波观测技术，利用同一地区的两幅具有相干性的 SAR（Synthetic Aperture Radar）影像的重复观测形成干涉图像，根据图像像元的相位信息获取地表形变信息，其测距原理类似高中物理课双缝干涉实验，利用条纹特性来测量缝与板间的距离，其公式表示为：

【作者简介】苟丙荣（1996-），男，中国甘肃天水人，硕士，研究实习员，从事透明地质保障相关研究。

$$\varphi_{int} = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{atmo} + \varphi_{noi}$$

其中：式中， $\varphi_{int}$ 为包含所有信息的相位， $\varphi_{flat}$ 为平地相位， $\varphi_{topo}$ 为地形相位，该相位可以用来恢复地形信息， $\varphi_{def}$ 为地表形变引起的相位， $\varphi_{atmo}$ 为大气延迟相位， $\varphi_{noi}$ 为观测噪声引起的相位<sup>[4]</sup>。将平地相位、地形相位、噪声相位、大气相位去除，即可得到地表形变相位。

采用时序 InSAR 技术研究煤矿地表沉降监测具有覆盖范围广、观测精度高、全覆盖、可回溯、全天时和非接触式测量的特点。广泛应用于地质灾害、矿山形变监测、冰川运动监测、城市沉降监测和大型建筑的形变监测等研究。

## 2.2 PS-InSAR 技术方法

PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR) 技术是对传统差分干涉方法 D-InSAR (Differential Interferometric SAR, D-InSAR) 技术所获取的解缠相位进行加权平均<sup>[5]</sup>，为提高其在煤矿地表沉降监测中的精度和可靠性，本研究对 PS-InSAR 技术流程进行了优化，并明确了关键参数设置。具体实施步骤如下所示。

### 2.2.1 影像配准

在重复观测同一区域时，受多种因素影响，影像会存在空间位置偏差。采用基于特征点匹配和图像灰度信息的配准算法，结合互相关系数最大化原则，确保配准误差小于 0.5 像素，保证影像数据的空间一致性，避免失真现象。

### 2.2.2 生成干涉图和相干图

在 PS-InSAR 技术处理中，单视复数影像 (SLC) 包含了雷达回波的幅度和相位信息，以复数形式存储。假设获取到同一区域不同时间的两幅 SLC 影像，分别记为  $S_1$  和  $S_2$ 。对这两幅影像进行复共轭乘法运算时，是对影像中每个像元对应的复数进行上述复共轭乘法操作。即对于影像  $S_1$  中坐标为  $(x,y)$  的像元  $z_{1(x,y)} = a_{1(x,y)} + b_{1(x,y)}i$  和  $S_2$  影像中相同坐标  $(x,y)$  的像元  $z_{2(x,y)} = a_{2(x,y)} + b_{2(x,y)}i$ ，计算  $z_{1(x,y)} \times z_{2(x,y)}^*$ ，得到一个新的复数结果。对所有像元完成这样的运算后，会生成一幅新的复数影像，该影像的相位分量就是干涉相位图。由上所述。计算每个像元的复数共轭乘积，即：

$$P_{(x,y)} = z_{1(x,y)} \times z_{2(x,y)}^*$$

其中： $z_{2(x,y)}^*$ 为 $z_{2(x,y)}$ 的复共轭，并对研究区内的像元进行统计，计算窗口内共轭乘积的均值  $\bar{P}$ ，及  $z_{1(x,y)}$  和  $z_{2(x,y)}$  各自窗口内的均值  $\bar{z}_1$ 、 $\bar{z}_2$ 。其相干系数计算公式为：

$$\gamma = \frac{|\bar{P} - \bar{z}_1 \times \bar{z}_2^*|}{\sqrt{(|z_1|^2 - |\bar{z}_1|^2)(|z_2|^2 - |\bar{z}_2|^2)}}$$

分子反映了窗口内像元共轭乘积均值与两幅影像均值乘积的差异程度，分母则是对影像自身波动情况的度量。该值越接近 1，表明两幅影像在该窗口内对应像元的信号越相似，干涉相位越可靠。

### 2.2.3 外部 DEM 模拟地形相位

本研究选择分辨率为 30m 的 SRTM DEM 数据，与主影像进行高精度配准，结合形变像对轨道和基线信息，利用

以下地形相位模拟算法生成外部 DEM 模拟地形相位：

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi B_{\perp} \sin \theta}{\lambda R} h$$

其中： $\varphi_{topo}$ 为地形相位， $\lambda$ 为雷达波长， $\theta$ 为入射角， $B_{\perp}$ 为垂直基线， $h$ 为地形高度， $R$ 为雷达与目标点的距离。通过将 DEM 中每个像元高程值代入以上公式，得到对应的地形相位值，进而生成模拟地形相位图。然后用干涉相位减去地形相位进行差分处理，即：

$$\varphi_{diff} = \varphi_{int} - \varphi_{topo}$$

其中： $\varphi_{diff}$ 为差分干涉图相位， $\varphi_{int}$ 为干涉相位， $\varphi_{topo}$ 为地形相位。

采用以上差分算法，消除差分干涉图中由地形和几何关系导致的相位变化，有效去除平地效应，得到更准确的差分干涉图。

### 2.2.4 选择散射体点

目标点识别与筛选包含相位稳定点 (PS) 与分布式散射体 (DS)。对于 PS 点，通过 SAR 影像序列中的相位稳定性进行判别，基于幅度离差指数计算，本研究设定相干性阈值为 0.7。具体而言，幅度离差指数反映了 SAR 影像幅度值的离散程度，当幅度离差指数在特定计算模型下，使得对应点的相干性高于 0.7 时，该点被认为相位稳定性较好，可筛选为 PS 候选点；对于 DS 点，本研究利用 KS 测试进行选取，计算该集群像素数据分布与参考分布（可以是同一区域内典型地物的分布，也可以是根据经验设定的理想分布模型）之间的最大差异值 (D 值)。如果 D 值小于预先设定的阈值，就表明该集群像素的分布与参考分布相似，这些像素很可能属于同一地物类型，进而可将其识别为 DS 点。

### 2.2.5 滤波和相位解缠

针对差分干涉图中的斑点噪声，采用基于小波变换的自适应滤波方法。其小波变换定义为：

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

其中  $a$  是尺度参数，控制小波函数的伸缩； $b$  是平移参数，控制小波函数的平移； $\psi(t)$  是小波基函数。在该研究中，小波基选择具有良好时频局部化特性的 db4 小波基，分解层数设定为 3 层。通过这种设置，将差分干涉图分解为多个尺度的小波系数。根据每个尺度上小波系数的统计特性，计算自适应阈值。经过滤波，有效抑制了斑点噪声，提高了干涉图的清晰度和相位解缠的准确性，为准确获取研究区地表形变信息提供了更好的数据基础。滤波后需要进行相位解缠，为了得到真实相位值，需要给每个相位加上  $2\pi$  的整数倍<sup>[6]</sup>，然后将相位由缠绕值恢复到真实值。

### 2.2.6 形变信息提取和地理编码

依据卫星轨道参数、沿距离向分布的垂直基线量及其对应的人射角变化特征，采用改进的回归分析方法进行数据解算。利用高精度地理编码模型，将高程数据和形变场从雷达坐标系转换至基于地球椭球体的三维直角坐标框架中

(CGCS2000 坐标系)。

### 2.2.7 精度与可靠性评价

尽管利用 PS-InSAR 技术可以获取厘米级甚至毫米级精度的观测结果,但仍需利用常规观测结果对其可靠性进行评价。本研究利用野外实地调查地表位移特征与人工建筑物变形迹象进行了观测精度和可靠性验证,提升形变反演结果的可信度。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 研究区介绍

郭家湾煤矿地处陕北黄土高原北缘与毛乌素沙漠东南部过渡带。其地貌特征呈现显著分异:北部为风积沙黄土梁峁地貌区,呈现沙丘连绵的波状地貌特征;南部属于黄土丘陵沟壑地貌区,具有梁峁相间的地貌格局,植被覆盖度低,水土流失剧烈,沟谷深切且基岩局部出露,沙丘广泛分布。区域地形呈现东高西低态势,平均海拔约 1250 米,最大地形高差小于 250 米。矿区地层基岩层序自下而上依次为:上三叠统永坪组 (T3y)、下-中侏罗统延安组 (J1-2y, 含煤岩系)、中侏罗统直罗组 (J2z)、新近系三趾马红土层 (N2) 及第四系松散堆积物 (Q)。区域地质构造简单,未见明显褶皱发育,无岩浆活动记录。采矿活动引发的地表变形主要表现为采空区塌陷导致地表设施损毁,对周边居民生产生活造成严重影响。

### 3.2 数据源

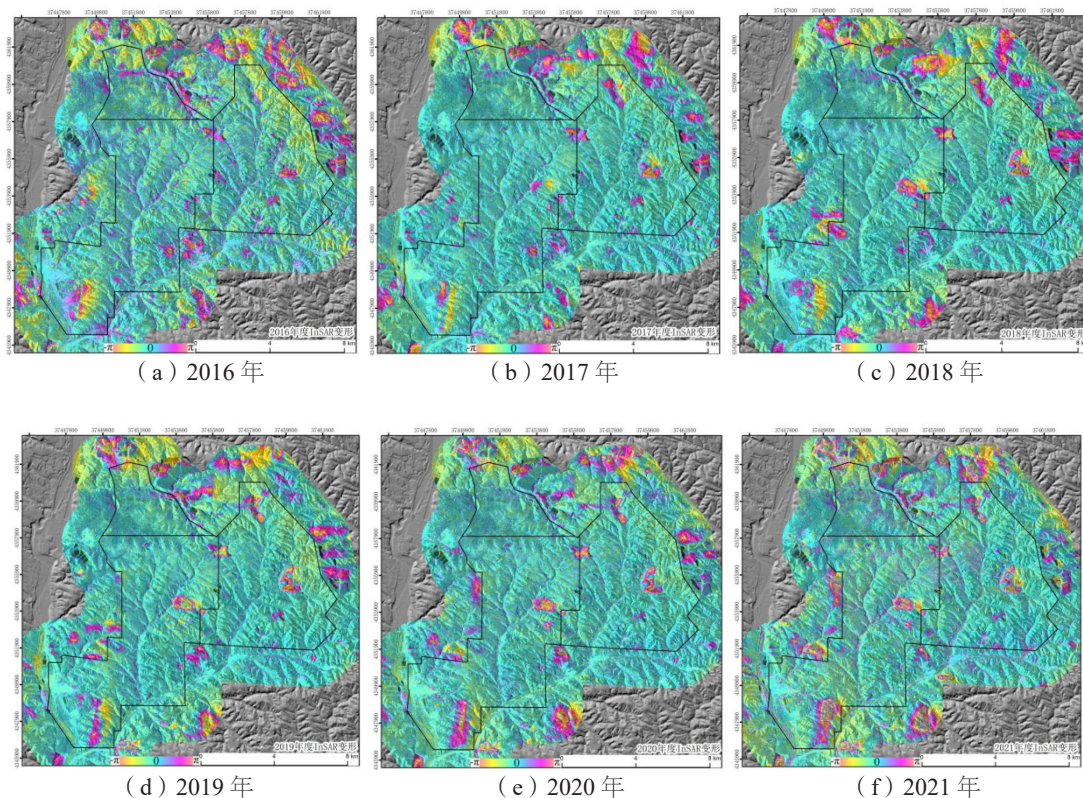
Sentinel-1 卫星目前有两颗卫星组成 (Sentinel-1A/B),

均为 C (波长 5.6cm) 波段多极化合成孔径雷达,可提供全天时、全天候连续成像。Sentinel-1 具有多种成像方式,可实现单极化、双极化等不同的极化方式。提供四种工作模式:条带模式、超宽幅模式、宽幅干涉模式和波模式<sup>[7]</sup>。其中宽幅干涉模式影像幅宽为 250km,距离向分辨率为 2.3m,方位向分辨率为 13.9m,空前的成图能力足以满足研究区域多时相 InSAR 处理和应用需求分析。本研究选取了 Sentinel-1 从 2016 年 3 月截至 2024 年 6 月底共计 132 景影像数据进行研究区时序地表沉降分析。

### 3.3 实验分析

为保证地物散射特征的共继性和影像干涉相位质量,提高形变监测的精度和可靠性,本研究选取了 2021 年 8 月 18 日的影像为主影像进行主、从影像配准。基于以上技术对研究区进行了沉降形变监测,最终得到 2016 年至 2024 年间郭家湾矿区及外延 200 米范围内的时序地表沉降监测变形图,如下图所示:

如图 1 所示,2016—2024 年间郭家湾煤矿全井田范围及外延 200 米范围内表现为各种变形、高程变化的持续发展。研究结果表明,矿区在观测期内存在显著的地表沉降现象,沉降区域呈现出明显的时空分布特征。从空间上看,沉降中心主要集中在煤矿开采活动频繁的区域,且随着与开采工作面距离的增加,沉降量逐渐减小;在时间维度上,地表沉降速率与煤矿的开采进度密切相关,开采高峰期往往伴随着较高的沉降速率。



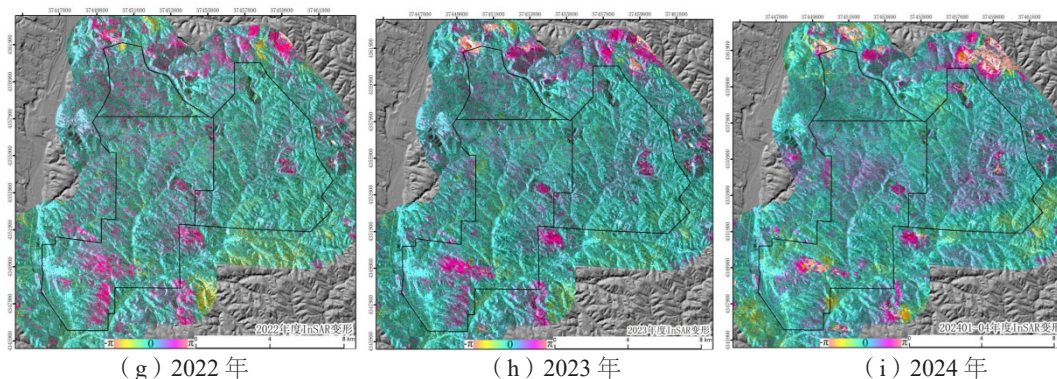


图1 郭家湾煤矿 2016—2024 年时序地表沉降监测变形图

郭家湾煤矿采煤方法为走向长壁式综合机械化采煤法，顶板管理采用全部垮落法，属于极高强度开采区，易形成严重的大面积采煤地面塌陷。且研究区所处在黄土覆盖区，其特点为大孔隙，水敏性，力学性质差节理裂隙发育，依照2016—2024年间郭家湾采掘图及历史小煤窑区域范围图对比分析发现，2016年度矿区内有地下开采工作面掘进变形，同时地表出现多处堆渣和土地复垦的高程变化与自然沉降变形；2017—2024年度表现为各种变形、高程变化的持续发展，年份间的对比可以显示出地下工作面开采的进度和采面的扩展。此外，对历史小煤窑的调查发现，部分小煤窑遗留的采空区未进行有效处理，在长期的应力作用下，采空区顶板逐渐垮落，形成局部地表沉降漏斗。通过实地地表调研，还观察到地表裂缝的发育情况，裂缝走向与地下开采巷道分布基本一致。进一步结合矿区地表水文监测、地质资料及地表调研等多源监测数据融合分析后发现，地下水水位的下降与地表沉降具有同步性，同时，地质资料显示研究区域内存在多个软弱夹层，这些软弱地层在开采扰动下极易发生压缩变形，加剧了地表沉降。

#### 4 结论

本研究选取 Sentinel-1 研究区时序影像数据，基于 PS-InSAR 地表沉降监测技术方法，对 2016—2024 年间郭家湾煤矿全井田范围及外延 200 米区域展开了系统性的地表沉降研究。综合分析了矿区地表水文监测、地质资料、历史小煤

窑及地表调研等多源监测数据与时序地表沉降监测变形图的对应耦合关系，明确了郭家湾煤矿地表沉降是由煤矿开采、地下水疏干、历史遗留采空区以及地质条件等多种因素共同作用的结果。本研究成果不仅为郭家湾煤矿的安全生产和灾害防治提供了科学依据，还为类似矿区的地表沉降监测与防治工作提供了可借鉴的技术方法和实践经验，对保障矿区周边生态环境安全、维护人民群众生命财产安全具有重要的现实意义。

#### 参考文献

- [1] 刘一霖. 矿区开采沉陷大量级形变监测与反演分析[D]. 长安大学, 2013.
- [2] 张红月, 王道顺. 相邻工作面开采下的矿区地表沉陷InSAR监测与分析[J]. 煤矿安全, 2023, 54(06): 184-192.
- [3] 冷红伟. InSAR技术在矿区大梯度沉降监测中的应用研究[D]. 山东科技大学, 2020.
- [4] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [5] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(07): 1485-1519.
- [6] 周立凡, 张世奇, 夏瑜, 等. 基于间断自适应MRF的相位解缠算法[J]. 测绘通报, 2020, (12): 6-10+26.
- [7] 赵现仁, 庞蕾, 马永, 等. 基于GPS实测数据和PS-InSAR技术的北极Pedersenbreen冰川表面运动特征分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(03): 381-389.