引文格式：唐伟,胡宝俊,刘凯,等. 京西山区关闭矿井残余地表形变的InSAR监测与规律分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 1-5. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.001

# 京西山区关闭矿井残余地表形变的InSAR监测与规律分析

唐　伟[1]，胡宝俊[2]，刘　凯[1]，阎跃观[1]，赵　晨[1]
（1. 中国矿业大学（北京） 地球科学与测绘工程学院，北京 100083；2. 新疆天池能源有限责任公司，新疆 昌吉 831100）

**摘　要：**京西山区老采空区残余地表形变将影响上方设施的安全，并诱发山区崩滑灾害。由于现场观测数据时间短、空间分辨率低，因此对采空区残余地表形变的空间分布和长期演变规律认识不足。以北京京西山区大台关闭矿井为研究对象，采用SBAS-InSAR技术处理2014—2023年Sentinel-1升降轨数据，构建矿区二维形变监测融合分析方法。结果表明，垂直向最大沉降速率为-54.49 mm/a，闭坑后沉降速率降低53%；水平向呈现东移主导特征，最大速率为21.3 mm/a；InSAR与水准数据的相关系数为0.96，均方根误差为2.08 mm。研究揭示了闭坑矿区残余地表形变的时空演变规律，提出的监测方法可为类似矿区提供技术参考。

**关键词：**京西大台矿区；关闭矿井；InSAR监测；残余形变；时空演化规律
**中图分类号：**P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0001-05

# InSAR Monitoring and Law Analysis of Residual Surface Deformation of Closed Mines in Mountainous Area of the West of Beijing

TANG Wei[1], HU Baojun[2], LIU Kai[1], YAN Yueguan[1], ZHAO Chen[1]
(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Xinjiang Tianchi Energy Co., Ltd., Changji 831100, China)

**Abstract:** The residual surface deformation of old goaf area in mountainous area of the west of Beijing will affect the safety of above facilities, and induce mountainous collapse and slip disasters. Due to the short time and low spatial resolution of on-site observation data, there is insufficient understanding of the spatial distribution and long-term evolution laws of residual surface deformation in goaf area. Taking the closed mine of Datai in mountain area of the west of Beijing as the object, we used SBAS-InSAR technology to process the ascending and descending orbit data of Sentinel-1 from 2014 to 2023, and constructed a two-dimensional deformation monitoring and fusion analysis method for mining area. The results showed that the vertical maximum settlement speed reached -54.49 mm/a, and the settlement speed decreased by 53% after closing the pit. The horizontal direction showed the dominant feature of eastward movement, with a maximum speed of 21.3 mm/a. The correlation coefficient between InSAR and level data reached 0.96, and the root mean square error was 2.08 mm. The research reveals the spatio-temporal evolution law of residual surface deformation in closed mine, and the proposed monitoring method can provide technical reference for similar mines.

**Key words:** Datai mine area of the west of Beijing, closed mine, InSAR monitoring, residual deformation, spatio-temporal evolution law

随着2020年北京最后一个煤矿——大台煤矿退出历史舞台，北京近千年的采煤史宣告结束。京西山峦正面临矿业撤出后的战略转型和能力建设任务。“一线四矿”及其周边区域将在生态的底色上谋求更高质量发展。京西山区因地形地质条件复杂且降水集中，是大型崩塌、滑坡和泥石流的高易发区。长期采矿活动产生的工程扰动效应导致山体出现局部采空沉陷，引发岩土体应力重分布；坡体沿顺倾构造面发生松弛变形，形成向采空区方向持续蠕滑的复合型滑坡，并导致古滑坡局部复活[1]。典型案例包括门头沟戒台寺滑坡（下伏胜利主井煤矿、石厂煤矿和10余处小窑采区）和赵家台滑坡（下伏潭柘寺联矿），其失稳机制表现为煤层开采诱发山梁岩体松弛，叠加强降雨渗透作用导致稳定性阈值突破[2]。针对老采空区的土地开发规划，地表稳定性评估具有工程优先性。尽管当前采矿活动已终止且地表进入准稳状态，在无外部荷载扰动下地表移动形变速率显著衰减；但受岩层内部应力调整和外营力耦合作用的影响，仍会产生具有持续

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42374023）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2024ZKPYDC06）。
第一作者简介：唐伟（1987—），博士，副教授，研究方向为空间大地测量与遥感技术（SAR/InSAR/GNSS）及其应用，E-mail：weitang@cumtb.edu.cn。

性的残余形变（响应周期可达数十年量级）[3]。尤其是在地形复杂的矿区群（如京西“一线四矿”区域），采空区残余形变的时空累积效应将加剧边坡渐进式破坏，遇极端降水事件可能触发链式滑坡灾害，该类残余地表形变虽位移速率低，但其诱发的地质灾害具有显著滞后性与突发破坏力，亟待开展系统性监测与成灾机制研究。

传统矿区形变监测主要采用水准测量与GNSS技术，但受限于长周期、高成本、测点布设稀疏和作业效率低等，难以实现高时空分辨率的周期性监测需求[4]。近年来，合成孔径雷达干涉（InSAR）技术凭借亚厘米级监测精度、全天候成像能力和大范围覆盖等优势，为矿区地表形变监测提供了革新性技术手段[5-6]。随着SAR卫星数据资源的不断丰富和处理方法的创新，小基线集（SBAS）干涉测量[7]等时序InSAR技术通过多主影像组合策略，优选短时空基线高相干性干涉对构建形变序列，并基于相位解缠与参数反演算法精确分离大气延迟、地形残差和非线性形变信号，最终实现矿区厘米级的累积形变速率提取[8]。

本文以北京市京西矿区闭坑工程典型代表——大台关闭煤矿为研究对象，首先系统采集2014—2023年覆盖研究区的Sentinel-1 A卫星升降轨雷达影像数据集，并利用SBAS-InSAR技术定量反演了矿区闭坑前后地表沿雷达视线方向（LOS）的形变时间序列；再通过构建升降轨形变场二维解算模型，分离出东西向水平位移和垂直沉降分量，并结合地面水准测量数据开展交叉验证；最后基于二维形变速率场和时序演化特征，揭示了京西老采空区闭坑后残余形变的分布特征及其长期地表动态响应规律。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文选取的研究区位于北京市门头沟区大台乡（图1），地处太行山北麓向华北平原过渡的构造带，属京津冀生态屏障区；地貌以中低山丘陵为主，海拔高程为200~800 m，沟谷发育强烈，地表覆盖层薄且基岩广泛出露。研究区邻近永定河水系，作为京西采空区重要组成部分，大台煤矿与杨坨、城子、门头沟、王平、木城涧、千军台以及大安山等矿区共同构成典型采煤集群[9]。大台煤矿始建于1958年，设计年产能60万t（实际达80万t），历经61 a开采历程后于2019年9月关闭，是我国急倾斜煤层开采的典型代表[10]。矿井沿走向延伸10.8 km，开采标高+400~-500 m，含8层可采煤层（累计厚度12.5 m），煤层倾角为45~88°。现阶段已完成资源回采并实施闭坑，矿区地表现存铁路专用线、公路网络、河道系统、工业建构筑物等人工地物。

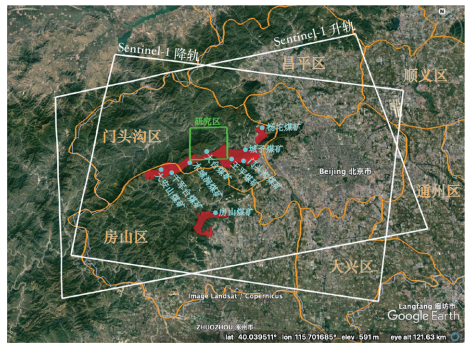



图1 京西山区煤矿老采空区与SAR数据覆盖范围
审图号：GS(2024)0650

### 1.2 数据来源

本文收集了2014—2023年的升轨（Path142）和降轨（Path47）数据，其中升轨数据为2015年7月—2023年4月共208幅影像，降轨数据为2014年10月—2021年11月共153幅影像。数据类型为干涉宽幅模式的单视复数数据，地面分辨率为5 m×20 m，极化方式为VV同向极化。本文同时采用30 m分辨率的SRTM高程数据消除地形相位，利用各影像对应的精密定轨星历数据减少轨道误差。为监测大台矿区地面形变，研究团队布设了走向观测线和倾向观测线地面水准观测路线（图2）。倾向观测线包括两条测线：①灰地家属区倾向观测线，从灰地小学附近以30 m间隔沿主干公路布设至3#煤露头，总长1.4 km，设置57个监测点（编号I1~I57）；②唐家坟家属区倾向观测线，从木材厂附近的铁路管制道口沿下山公路以30 m间隔布设至唐家坟小桥，总长0.5 km，设置17个监测点（编号Z1~Z17）。2011年4月—2020年12月共完成34期水准测量，本文采用该实测数据对InSAR的形变结果进行精度验证。

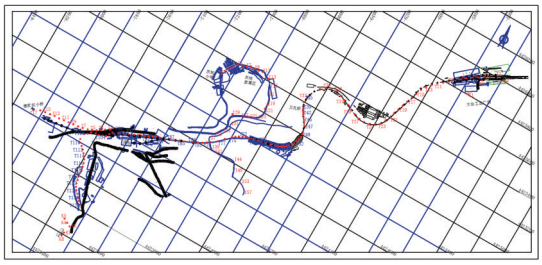


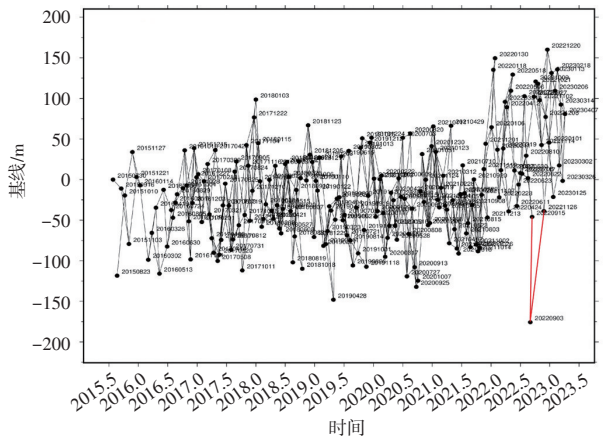
图2 大台煤矿地表移动观测线布置图

## 2 InSAR数据时序处理

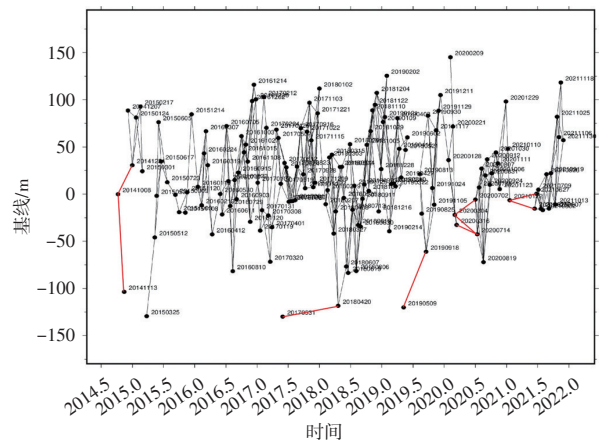
### 2.1 SBAS-InSAR数据处理过程

SBAS-InSAR技术是Berardino等于2002年提出的时序InSAR方法，基于分布式目标算法实现[11]。该方

法通过控制时空基线阈值，有效缓解时空失相关效应，提升时间采样密度与空间覆盖度，同时可分离大气延迟相位并抑制地形残差。对于差分干涉，本文采用GMTSAR[12]对Sentinel-1A数据进行处理，形成差分干涉图。为抑制时空失相干影响，设置100 m的垂直基线和50 d的时间基线阈值；针对时空基线不相连的情况，特别是在降轨影像间，需手动增添相关干涉对（图3中红色线）。升轨数据共生成485个（387个前期、98个补充）干涉对，降轨数据共产生336个干涉对。GMTSAR在卫星精密轨道数据支持下采用增强谱分集配准方法进行SAR影像配准，满足TOPSAR影像方位向配准精度0.001个像素的要求；在干涉处理过程中，采用SRTM 30 m分辨率DEM数据去除地形相位，采用Goldstein滤波抑制干涉图噪声；另外，在方位向和距离向进行8×2的多视处理，进一步提高干涉相位信噪比；采用SNAPHU软件进行相位解缠，为提高计算效率和解缠精度，解缠过程中设置0.12的相干系数阈值对低相干区域进行掩膜。




a 升轨




b 降轨

图3　干涉对组合时空基线图

### 2.2　升降轨融合处理方法

对升降轨数据进行融合分解可获取地表水平东西向和垂直向形变分布信息[13]。SAR侧视成像几何与三维坐标下的角度参数见图4。

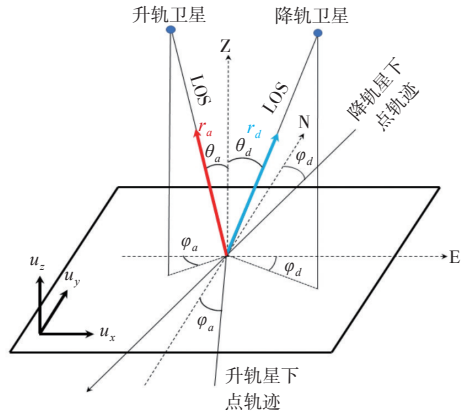



图4　SAR侧视成像几何与角度参数

InSAR干涉图中某个像素LOS向的形变实际上是该像素点三维位移分量在视线向的投影之和，即

$$r_{\mathrm{LOS}}=u_x\cos\varphi\sin\theta-u_y\sin\varphi\sin\theta-u_z\cos\theta \tag{1}$$

式中，$\theta$为雷达信号入射角，即LOS向与垂直方向的夹角；$\varphi$为卫星航向角；$\boldsymbol{u}=[u_x\ u_y\ u_z]$为地面的位移矢量；$u_x$、$u_y$、$u_z$分别为沿东西、南北、垂直方向的形变分量。

将LOS向的沉降量分解为：

$$\boldsymbol{r}=\hat{\boldsymbol{p}}\times\boldsymbol{u}'=\left[p_x\ p_y\ p_z\right]\left[u_x\ u_y\ u_z\right]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{p}}=\left[p_x\ p_y\ p_z\right]=[\cos\varphi\sin\theta\ -\sin\varphi\sin\theta\ -\cos\theta]$。

由于InSAR对垂直方向位移的敏感度最高，东西方向次之，南北方向最低，因此忽略南北方向分量，即令$u_y$为零，且考虑升降轨两个LOS向形变，列出以下方程，即

$$\begin{aligned}r_a&=p_{ax}\times u_x+p_{az}\times u_z\\ r_d&=p_{dx}\times u_x+p_{dz}\times u_z\end{aligned} \tag{3}$$

将式（3）转化为矩阵形式，则有：

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{P}\times\boldsymbol{u}' \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{r}=[r_a\ r_d]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{u}'=[u_x\ u_z]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}p_{ax} & p_{az}\\ p_{dx} & p_{dz}\end{bmatrix}$。

通过最小二乘法即可得到垂直方向与东西方向的位移量，即

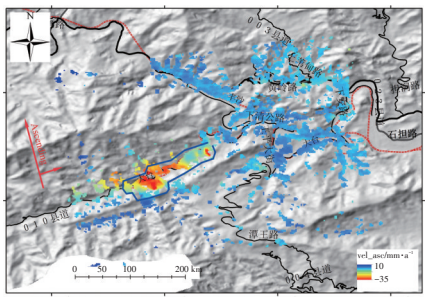
$$\boldsymbol{u}'=\left[\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\right]^{-1}\times\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\times\boldsymbol{r} \tag{5}$$

## 3　大台矿区地表形变结果分析

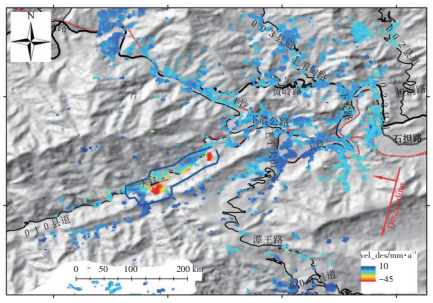
### 3.1　升降轨LOS向形变结果分析

本文基于SBAS-InSAR技术对大台矿区升降轨Sentinel-1数据进行处理，获得升降轨LOS向的累积形变速率场（图5），其中正值（蓝色）表示地表向靠近卫星方向移动，负值（红色）表示地表向远离卫星方向移动，空值区域主要由植被茂密区失相干导致。

矿区升轨数据LOS向形变速率为−35.61～+11.47 mm/a，显著形变区集中于大台街道周边；降轨数据形变速率为−46.66～+6.95 mm/a，对比二者发现，升降轨形变空间格局高度一致，地表沉降中心主要位于矿区开采沉陷区（图5a红色区域）和煤矸石堆积区（图5b红色区域）。



a 升轨数据



b 降轨数据

图5　京西区域升降轨LOS向形变速率

### 3.2　地表垂直形变结果分析

由垂直形变速率场（图6）可知，宅台南侧、唐家坟、段地、灰地、三孔桥和矸石山区域存在显著沉降。沉降中心主要分为两类：①采矿诱发沉陷区，宅台邻近区域最大速率达−54.49 mm/a，段地—西洼区域次之（−38.12 mm/a），灰地、三孔桥和唐家坟沉降速率最小（−5.23～−12.67 mm/a），均位于采空区上覆岩层移动影响范围内；②矸石固结沉降区，图6右上角煤矸石堆积体形成漏斗状沉降区，最大速率超过−60 mm/a，主控因素为矸石自重压密与孔隙水消散引发的自然固结效应。

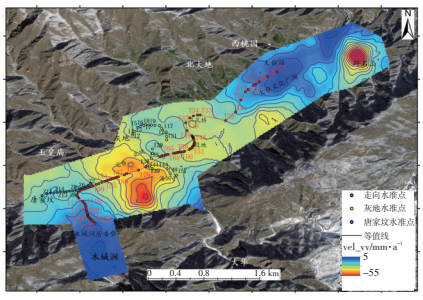


图6　大台矿区InSAR升降轨融合的垂直向形变速率

注：红色线K3~K129为走向水准线，黄色线I1~I57为灰地倾向观测线，蓝色线Z1~Z17为唐家坟倾向观测线。

2015年7月—2021年11月走向观测线垂直向累积沉降剖面见图7，可以看出，2015—2019年沉降呈现显著阶段性分异（分界面清晰），2019年后分界渐趋模糊。以2019年9月30日闭坑时间（图7红线）为界，闭坑后时段（2019—2021年）较闭坑前（2015—2019年）沉降速率降低约53%，表明矿井关闭后地表下沉趋缓。由沿灰地倾向线的形变剖面（图8）可知，灰地走向线在2016年1月出现7.2 mm抬升异常，随后转为持续下沉；倾向线最大沉降点位于I41监测站（2021年底累积沉降131 mm），I19~I21监测点周边形成直径约为80 m的局部沉降漏斗（最大深度为23 mm），闭坑前年均沉降量逐年递增（2015—2019年增幅18%），闭坑后沉降速率显著衰减（2020—2021年降幅41%）。

### 3.3　地表水平形变结果分析

升降轨融合的水平方向平均形变速率结果见图9，蓝色代表向东移动、红色代表向西移动，可以看出，大台矿区的地表水平向移动以向东移动为主，其中2015年—2018年2月水平移动逐年缓慢增加，2018年7月—2021年水平移动显著增加。除向东的水平移动外，研究区内存在两个向西的水平移动区域，分别在矸石山和宅台以南、潘涧子以西的区域，前者是由矸石山的压实作用所致，后者是由开采沉陷区导致的沉降漏斗引起的地表自东向西移动所致。大台矿区向东最大水平形变速率出现在宅台区域（21.3 mm/a），向西移动最大形变速率出现在矸石山（−11.2 mm/a）。

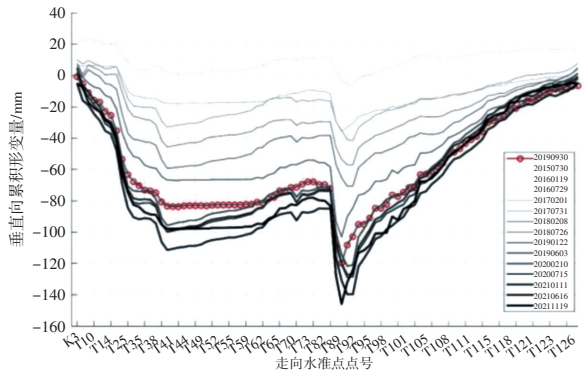



图7　沿水准走向观测线剖面的InSAR垂向累积沉降

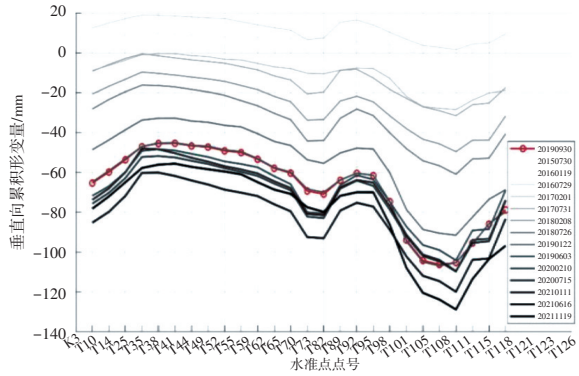



图8　沿水准倾向线剖面的InSAR垂向累积沉降

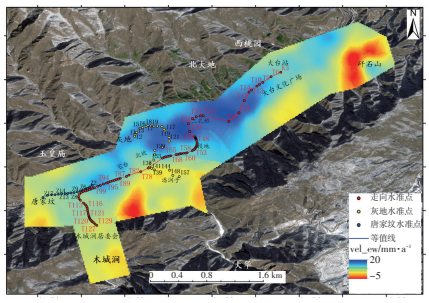



图9　大台矿区地表水平形变速率（东西向）

### 3.4　InSAR形变结果的精度验证

为验证SBAS-InSAR技术获取的大台矿区形变结果的可靠性，本文选取了沿走向线布置的90个水准点数据进行验证，主要分布在大台铁路沿线，东起大台文化广场、西至木城涧居民委员会附近，基本覆盖了大台街道矿区范围。由于InSAR获取的是LOS向形变，因此在与水准数据结果进行比对时，需通过升降轨数据将一维LOS形变信息融合为二维形变信息，继而提取垂直向形变与之对应。对于InSAR沉降值，本文采用点与点验证的方式，在由时序InSAR技术获取的2016年10月—2020年11月融合后的形变图上，选取缓冲区域内形变点均值与同名水准点对应，对累积形变量信息进行相关性和均方根误差分析。水准点获取的形变结果与InSAR形变结果的相关性见图10，可以看出，二者的绝对误差在10 mm以内，均方根误差为2.08 mm，相关系数达到了0.96，具有较高的相关性。

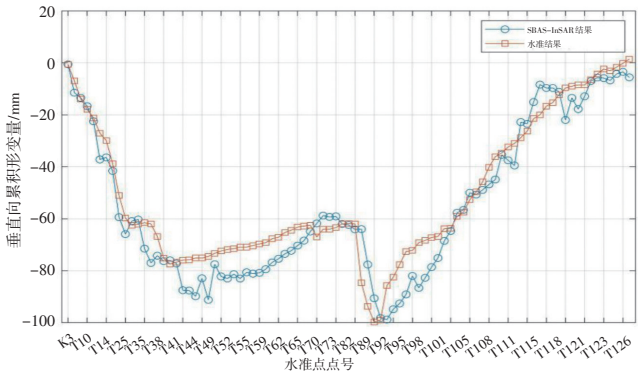



图10　InSAR垂直向形变与水准沿走向观测线点位精度对比

## 4　结　论

本文基于SBAS-InSAR技术，利用升降轨Sentinel数据获取了大台关闭矿井的地表形变场，并对时空形变特征进行分析，得到的结论为：

1）垂直形变特征。大台矿区闭坑后呈持续沉降趋势，最大速率达−54.49 mm/a。闭坑后年均沉降速率降低53%，沉降中心主要分布于采空区上覆岩层移动带和矸石堆积区。时序分析显示，2018年后沉降范围显著扩展，矸石山区域因自重压密形成漏斗状沉降区。

2）水平移动规律。地表呈东西向差异运动特征，宅台区域最大东移速率为21.3 mm/a，矸石山区域因固结作用产生最大西移速率为−11.2 mm/a。闭坑后水平形变速率先增后减，与垂直向形变呈现显著的时空耦合性。

3）技术可靠性验证。InSAR垂直向形变与水准监测结果具有高度一致性，误差小于10 mm，验证了SBAS-InSAR技术监测矿区残余形变的可靠性。

本文建立的升降轨融合监测体系可有效捕捉矿区缓慢残余形变，揭示的时空演变规律为闭坑矿区灾害风险评估和生态修复提供了科学依据。未来将结合采矿地质条件、现场观测和地形资料对山区老采空区的残余形变规律进行模拟和预测，并对可能诱发的崩滑灾害隐患进行综合识别，进一步完善京西山区地质灾害隐患库，支撑京西“一线四矿”区域的高质量发展。

## 参考文献

[1]　李腾飞，李晓，苑伟娜，等. 地下采矿诱发山体崩滑地质灾害研究现状与展望[J]. 工程地质学报，2011，19(6)：831-838

[2]　李文军，杨让宏. 北京门头沟区戒台寺滑坡的变形机理与特点[J]. 中国地质灾害与防治学报，2006，17(2)：140-146

[3]　孙富强. 山区煤矿老采空区地表残余移动变形预测模型研究[D]. 徐州：江苏师范大学，2018

[4]　姜德才，张继贤，张永红，等. 百年煤城地表沉降融合PS/SBAS InSAR监测：以徐州市为例[J]. 测绘通报，2017(1)：58-64

[5]　李德仁，廖明生，王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2004，29(8)：664-668

[6]　龚卉，魏以宽，唐晓霏，等. 省级地质灾害监测体系关键技术应用研究[J]. 地理空间信息，2020，18(3)：27-30

[7]　Berardino P, Fornaro G, Lanari R, 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): 2 375-2 383

[8]　陈亮，姚硕强，马润霞，等. 应用Sentine1-1A卫星数据对宁东煤炭基地进行沉陷监测试验研究[J]. 矿山测量，2017，45(3)：45-49

[9]　戴林达，张永亮，阎跃观，等. 京西大台矿区2013—2020植被净初级生产力演变规律分析[J]. 煤炭科学技术，2024，52(增刊2)：445-457

（下转第26页）