

基于DS-InSAR的蒲河煤矿采空区地表形变监测 与开采参数反演

敖萌¹, 孙颖¹, 魏恋欢¹, 张化南²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术在有植被覆盖的矿区难以识别到足够多的监测点目标, 导致形变结果无法反映矿区真实形变特征. 采用分布式散射体InSAR分析方法, 能够有效提高植被密集区域雷达相干目标数量, 从而准确描述矿区形变的时间演化规律和空间分布特征. 矿区长期高强度开采会引发采空区的地表变形, 严重威胁矿区基础设施建设和人员生命财产安全. 基于沈阳蒲河煤矿采空区InSAR高精度监测数据, 通过地球物理建模反演得到矿区地下关键开采参数, 模拟的矿区形变场与InSAR监测结果较为一致, 且反演开采参数符合真实开采情况. 结合InSAR监测结果与Okada模型反演矿区参数, 能够准确描述由采矿造成的采空区地表形变, 为科学制定地下开采计划及矿区可持续开发提供重要信息.

关键词: 矿区地面沉降; 合成孔径雷达干涉测量; 分布式散射体; 地球物理建模; 形变监测

中图分类号: TP 722.6; P 228 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)06-0866-09

Surface Deformation Monitoring and Mining Parameters Inversion of Puhe Coal Mine Goaf Based on DS-InSAR

AO Meng¹, SUN Ying¹, WEI Lian-huan¹, ZHANG Hua-nan²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China. Corresponding author: WEI Lian-huan, E-mail: weilianhuan@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology has shown great application potential in monitoring geological disasters in mining areas. However, it is difficult for conventional time-series InSAR technology to detect enough radar targets in mining areas covered by vegetation, which causes underestimation or inaccurate estimation of deformation results. Aiming at the scarcity of measurement points in complex mining areas, the distributed scatterer InSAR analysis method can effectively increase the number of measurement points in the vegetation covered area, thereby accurately describing the temporal evolution and spatial distribution characteristics of deformation in mining areas. The long-term and high-intensity mining activities will cause the surface deformation of the goaf, posing serious threats to sustainable mining, infrastructure construction and the safety of lives and property. In order to understand the mining situation in the goaf of Puhe Coal Mine in Shenyang, based on InSAR high-precision monitoring data, the key underground mining parameters in the mine area are obtained through geophysical modeling inversion. The deformation field simulated based on the optimal parameters is consistent with the InSAR monitoring results, and the inversion mining parameters conform to the actual mining situation. Combining InSAR monitoring results with Okada model to invert mining area parameters can truly reflect the actual mining situation, accurately describe the surface deformation of goaf, and provide important information for

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304168, 42071453); 辽宁省地质灾害风险普查项目(2022020700179); 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家重点实验室基金资助项目(6142A01210407); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2401009); 中欧合作“龙计划”五期项目(58029).

作者简介: 敖萌(1989-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学讲师.

scientific formulation of underground mining plans and sustainable development of the mining area.

Key words: ground subsidence in mining area; interferometry synthetic aperture radar; distributed scatterer; geophysical modeling; deformation monitoring

21世纪以来,我国煤炭开采规模逐渐扩大,长期高强度煤层开采容易引发采空区地表形变,破坏矿区地质环境条件,损坏建筑群、道路等基础设施,危害矿区人民的生命财产安全.作为一种定量评估矿区开采进展的手段,地球物理模型反演可以获得可靠的矿区开采参数,有助于分析采空区地表形变机制,为矿区地质灾害防治提供有效支撑.然而,为了获得可靠的矿区开采参数,必须获取准确详细的矿区地表形变信息.因此,开展矿区大范围、长时序、高精度形变监测,结合地球物理模型反演矿区开采参数,对保障矿区安全生产有着非常重要的意义^[1].

传统变形监测技术(如水准测量、GNSS等)存在工作效率低、监测范围小、人工成本高、仅能获得少量稀疏点位的变形参数等缺点.基于对高效、准确、近实时地质灾害监测技术的需求,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术以其监测范围大、重访周期短、测量精度高、受气象条件影响小等特点,在矿区形变监测领域具有不可替代的优势^[2].Perski等采用差分雷达干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术分别监测了波兰Silesia矿区、德国鲁尔区煤矿、法国沃韦尔附近矿区以及澳大利亚新南威尔士州煤矿的地表沉降,分析了合成雷达干涉测量(synthetic aperture radar, SAR)数据对最大形变梯度矿区的监测能力,评估了D-InSAR在矿区地表变形监测中的潜力和局限性^[3-6].Walter等将永久散射体雷达干涉测量(persistent scatterers InSAR, PS-InSAR)技术用于德国鲁尔地区Prosper Haniel矿、法国Lorraine矿、韩国盖恩煤矿、唐山矿区等区域的沉降监测,并与传统测量手段进行了交叉验证^[7-9].Nadudvari等利用小基线集(small baseline subset, SBAS)技术进行了开采沉降监测^[10-12].Xing等将人工角反射器(corner reflector, CR)与永久散射体结合,获取了白沙水库煤矿2007—2010年4年的矿区地表形变^[13].然而,上述InSAR形变监测方法仅在植被稀少的区域得到了可靠的形变参数,无法提取植被覆盖度较高的复杂矿区的地表形变.

近年来,地球物理模型反演在形变机制模拟中发挥着重要的作用,证明了地球物理模型在地

下矿产资源开采中的适用性.Lu等基于InSAR技术获取了采空区形变参数,利用Okada位错模型反演了位错张量与开采深度、厚度的关系,合理解释了矿区塌陷的产生机制^[14-15].刘一霖基于时序InSAR技术获取了地表形变参数,利用Mogi模型和椭球模型反演了东营油田的储层深度,与探明的油田储备深度相近,证明了地球物理模型在地下资源开采参数估计中的适用性^[16].杨崇等基于2007—2010年间的InSAR监测结果,利用Mogi、椭球体等模型反演了辽河油田的储层参数,反演结果与实际监测值接近^[17].Dai等评估了Mogi, PIM, Okada三种地面沉降模型反演矿区地表形变的效果,研究结果表明Okada模型对于大梯度形变反演更加准确^[18].

针对地表被密集植被覆盖的矿区,传统时序InSAR技术识别到监测点(measurement points, MP)目标数量稀少,难以准确反映复杂矿区形变的分布特征,容易出现形变参数低估甚至错估的现象.本文采用分布式散射体雷达干涉测量(distributed scatterer InSAR, DS-InSAR)方法^[19]进行矿区形变监测,能有效增加低相干区域监测点目标数量,获取更加准确详细的地表形变分布特征,为地球物理建模提供更加可靠的数据支撑.针对蒲河煤矿开采情况的相关研究较少,仅从部分资料可以推算煤层埋藏深度,其他开采参数难以准确获取,而矿区长期高强度开采会引发采空区的地表变形,严重威胁矿区可持续开采、基础设施建设和人员生命财产安全等问题.本文基于DS-InSAR监测结果,选择适合大梯度形变的Okada位错模型反演矿区关键开采参数,并利用模型正演矿区形变场,与InSAR监测结果相互验证,为揭示矿区地表形变时空演化规律和地下开采规划提供有效支撑.

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

蒲河煤矿位于沈北煤田东部,1969年2月14日移交生产,矿井设计能力为年产60万t.含煤地层主要由煤层、油页岩、深灰色泥岩、粉砂岩、砂岩组成.随着采空区开采深度的不断增大,在

掘进和回采期间深部巷道出现底鼓和顶板下沉、两帮收缩量大等严重变形事件,直接影响了矿井的有序生产和人员安全^[20].

实地调研发现,蒲河煤矿区已被列为地质灾害易发区,当地政府已设立警示标志(见图1①).受地表沉降灾害的影响,区域内房屋结构均已被破坏(见图1②),大部分居民已迁走,但仍有个别散户在此居住.该区域内的多根电线杆出现了倾倒现象,且均倾向形变中心方向(见图1③).部分建筑围墙呈现大角度倾斜现象,只能借助外力艰难支撑(见图1④).大量房屋开裂、破损严重,裂缝遍布,出现明显失稳现象,需要引起高度重视(见图1⑤~⑧),图③和④中的白色虚线表示建筑物的倾斜方向,图⑤~⑧中的白色虚线和圆圈标示物体的破裂位置.

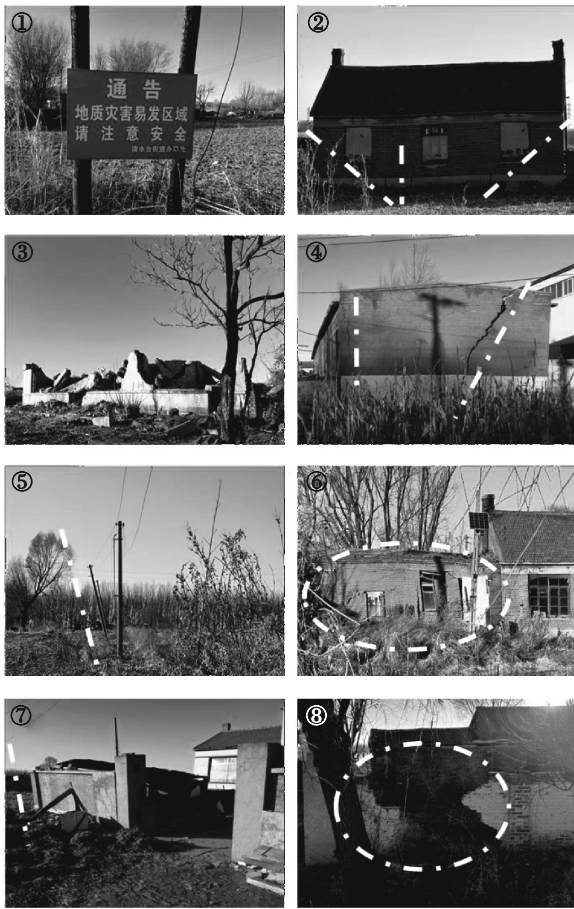


图1 实地调研现场照片

Fig. 1 Photos of on-site investigation

1.2 数据集

本研究采用覆盖蒲河煤矿的27景X波段 TerraSAR-X升轨数据,时间跨度为2015年8月至2017年6月,数据集详细参数如表1所示,时空基线分布如图2所示,数据覆盖范围如图3所示.

表1 SAR数据参数列表
Table 1 Parameter list of SAR data

数据集	TerraSAR-X
轨道方向	升轨
模式	SM
获取时间	20150825—20170421
影像数/景	27
波长/m	0.031
入射角/(°)	23.9
方位角/(°)	348.71
极化方式	HH
分辨率/m(距离向/方位向)	2.89/3.30

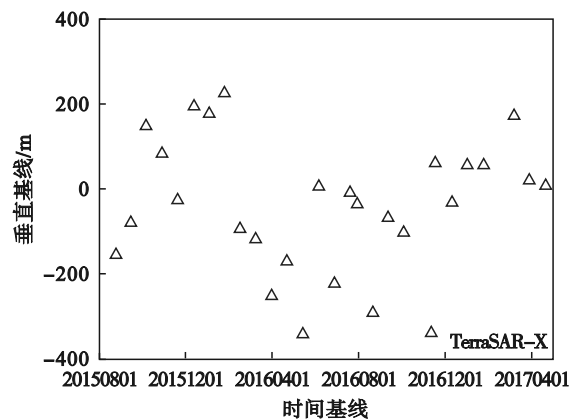


图2 数据时空基线分布图

Fig. 2 Illustration of temporal-spatial baseline distribution

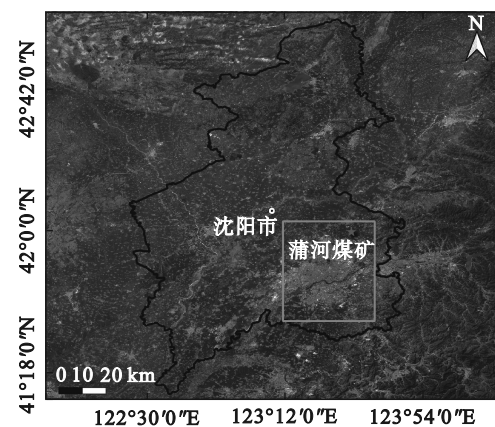


图3 SAR数据覆盖范围

Fig. 3 Coverage of SAR dataset

2 方法

2.1 SBAS-InSAR

随着SAR卫星影像数量和质量的提升,为了弥补差分干涉测量技术受时空失相干和大气影

响大的劣势,发展出了众多时间序列 InSAR 方法,包括永久散射体方法^[21],SBAS 方法^[22],干涉图堆叠法(stacking InSAR)^[23]等,其中 SBAS 方法应用最广泛.它采用多级主影像的方式充分利用了时空基线都较短的高质量差分干涉图,减弱了时空失相干的影响,提高了形变监测的精度.

假设获取了覆盖研究区 t_0 到 t_N 共 $N+1$ 幅 SAR 影像,由小基线集原理可生成 M 幅差分干涉图($\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N+1}{2}\right)$). 经过相位解缠后,对于任一像元,其解缠相位与平均形变相位速率的关系可以表示为^[24]

$$Bv = \delta\varphi. \quad (1)$$

其中: $\delta\varphi^T = [\delta\varphi_1, \dots, \delta\varphi_M]$ 为解缠相位; $\varphi^T = [\varphi(t_0), \dots, \varphi(t_N)]$ 为 SAR 影像相位; $v^T = \left[v_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right]$ 为平均形变相位速率, $\varphi_0 = 0$; B 是 $M \times N$ 维系数矩阵. 奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法可用来求解系数矩阵 B 的伪逆矩阵.

2.2 DS-InSAR

由于研究区地表覆盖类型为农田,地面平坦起伏较小,但植被茂密且物候变化较大,导致传统的时序 InSAR 技术(如 SBAS-InSAR, PS-InSAR 等)识别到的监测点目标数量稀少,而低空间密度的测量点目标会引起干涉相位跳变进而产生相位解缠误差,降低形变监测精度. 为了有效增加监测点目标的数量,本文采用分布式散射体 InSAR 方法进行监测.

2.2.1 同质像元识别

传统时序 InSAR 方法均采用基于 SAR 信号统计特性的监测点目标识别方法(如振幅离差阈值指数法、相位离差指数阈值法、相干系数阈值法等),此类方法容易受到振幅或相位稳定性的影响,导致识别到的监测点目标数量稀少,提取的形变参数难以反映形变区的整体空间分布规律. 因此,本文采用分布式散射体(distributed scatterer, DS)识别方法. 当两个像元的振幅时间序列近似服从某一分布函数时,通常认为这两个像元具有相同的后向散射特性,从而将其识别为同质像元(spatial homogeneous pixel, SHP)^[25].

KS (Kolmogorov-Smirnow) 检验经常用于估计两组数据样本矢量之间累积分布函数(cumulative distribution functions, CDF)的差值^[26]:

$$D_N = \max_x \left| \hat{F}_p(x) - \hat{F}_q(x) \right|. \quad (2)$$

其中: D_N 表示两个 CDF 之间的最大垂直距离; $\hat{F}_p(x)$ 和 $\hat{F}_q(x)$ 代表像元 p 和 q 振幅的经验累积分布函数.

2.2.2 最优相位估计

特征值分解法(EVD)、主成分分析法(PCA)、奇异值分解法(SVD)等均可用于估计最优相位,但这些方法解算结果并不稳定,容易出现跳变现象^[27]. 与其相比,Phase linking 采用迭代计算的方法,能更好地恢复相位趋势^[28].

对于每一个同质像元,其最优相位序列 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ 可以用极大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)的方法进行解算:

$$\theta_{ML} = \arg \max_{\theta} \left\{ \eta^H \left(-|\Gamma|^{-1} \circ \Gamma \right) \eta \right\}. \quad (3)$$

其中: $\eta = [e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}]^T$, 这里 $\theta_1 = 0$; \circ 为哈达玛积. 采用 Phase linking 的方法进行最优相位估计,公式(3)可以表示成闭合形式:

$$\hat{\theta}_n^k = \arg \left\{ \sum_{m \neq n}^N \left\{ |\Gamma|^{-1} \right\}_{mn} \left\{ \Gamma \right\}_{mn} \exp \left(j \hat{\theta}_m^{k-1} \right) \right\}. \quad (4)$$

其中, k 为迭代次数. 迭代起始点假设相位矢量 $\eta_0 = \mathbf{1}$.

同质像元识别方法可以增加监测点目标的空间密度,有效解决复杂地区雷达相干目标数量稀少的问题. 最优相位估计可改善干涉图质量,提高 DS 点目标相位信息的可靠性. 在处理过程中, SAR 数据预处理(包括裁剪、配准、基线估计、去除平地效应、去除地形相位等)在 Doris 软件中进行,自行开发的 DS 点目标选取和最优相位估计模块用于识别 DS 点目标和提取相应的最优相位,并作为输入数据导入到标准的 StaMPS 软件^[24]中进行时序分析处理,数据处理流程如图 4 所示.

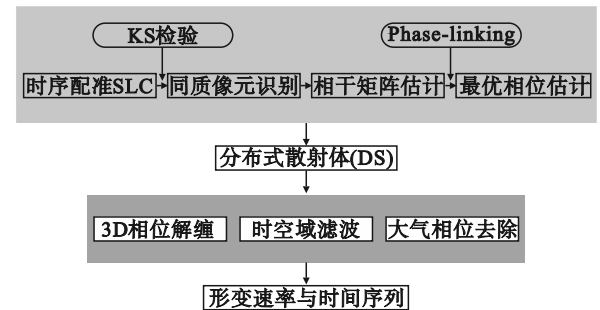


图 4 DS-InSAR 数据处理流程

Fig. 4 Flowchart of DS-InSAR data processing

2.3 Okada 模型

地下采矿造成的大梯度沉降一直是限制 InSAR 技术在矿山形变监测中实际应用的一个

重要因素.已有研究表明,在矿区地表形变反演常用的 Mogi, PIM, Okada 三种模型中, Okada 模型对于大梯度形变反演更加准确^[18].考虑到本文研究区域形变较大(形变速率超过 -6 cm/a),因此选择 Okada 位错模型反演矿区开采参数.

Okada 矩形位错模型^[29]由日本学者 Okada 提出. Okada 在前人关于弹性半空间断层引起的形变反演研究成果的基础上,提出了用于描述均匀弹性半空间的有限矩形位错的新模型.根据弹性半空间各向同性位错理论,当某矩形几何面在弹性半空间内发生错动时,对应地表某点的位移量与错动面错动量呈正比关系,比例系数由该点与错动面的相对位置、错动面的几何尺度、倾角、深度和弹性介质所唯一确定.如图 5 所示,利用 Okada 矩形位错模型反演错动面形变信息主要涉及 7 个参数,包括错动面的几何中心 M 点在地表的投影坐标 $M'(x_0, y_0)$,错动面与水平方向的夹角(倾角 θ),错动面与北方向的夹角 φ ,错动面沿走向的长度 l ,沿倾向的宽度 w ,错动面的几何深度 d .

本文基于 DS-InSAR 获得的蒲河煤矿区大梯度形变场信息进行开采参数反演,再利用模型参数正演矿区地表形变场.通过将反演结果与 InSAR

监测结果进行相互验证,可以评估模拟结果的准确性,判断模型在矿区形变监测中的适用性.

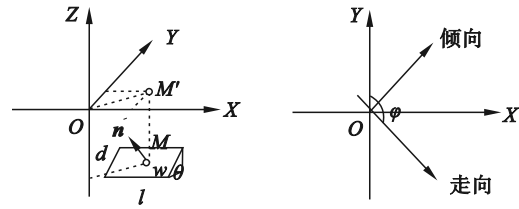


图5 Okada模型的几何示意图

Fig. 5 Geometry of Okada model

3 结果与分析

3.1 矿区形变监测结果

基于 27 景 TerraSAR-X 影像,本文在蒲河煤矿区的平均强度图(图 6a)的基础上,利用自行开发的同质像元识别算法,识别出了大量 SHP 像元(图 6b).结果表明,SHPs 的数量与地表覆盖情况高度相关.在农田等大范围均质区域,SHPs 数量较大;而在房屋、道路、河道等区域,SHPs 数量较小.究其原因,主要是由于识别 SHPs 时采用了 $15\text{ 像元} \times 15\text{ 像元}$ 的矩形窗口,小范围地物或长条形地物在窗口内可识别到的同质像元较少.

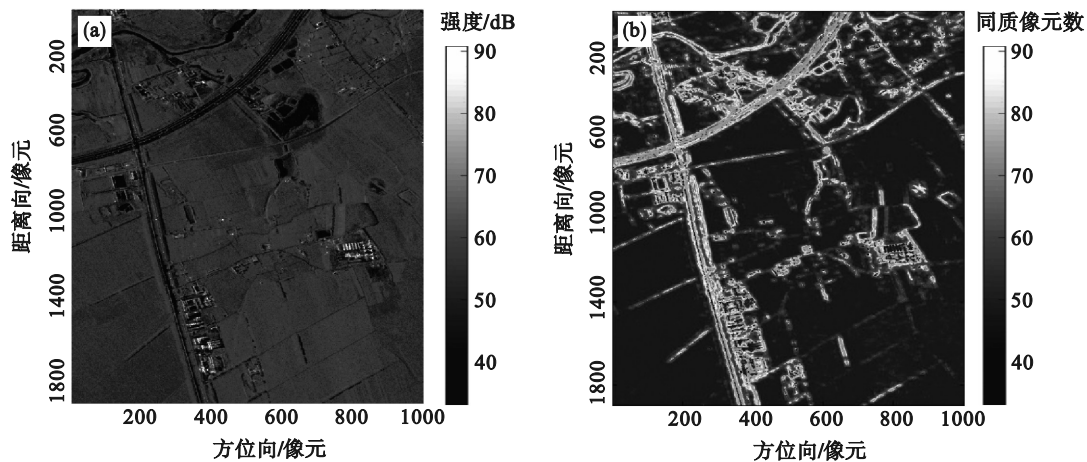


图6 研究区平均强度图和同质像元图

Fig. 6 Multi-image mean intensity map and number of SHP identified of study area

(a)—平均强度图;(b)—识别出的 SHP 数量.

由 DS-InSAR 方法得到的蒲河煤矿的视线向年形变速率如图 7a 所示.为了验证本文所用方法的优势,同时利用 SBAS 方法提取了蒲河煤矿区的地表形变参数,结果如图 7b 所示.对比发现,SBAS 方法受地表植被失相干影响严重,可识别的监测点目标数量稀少,仅少量分布于房屋、道路等人工建筑物上,而采空区上方地表无有效雷达目标,导致无法准确反映矿区形变的分布特

征.从识别结果上来看,DS-InSAR 识别的监测点目标空间密度是 SBAS 方法的 36.35 倍,监测点密度的大幅度增加为地面形变参数解算提供了更可靠的信息,进而能够更准确地提取形变的分布特征,DS-InSAR 方法相比于传统时序 InSAR 方法在植被覆盖区具有更强的适用性和可靠性.DS-InSAR 监测结果显示,蒲河煤矿区地表沉降问题严重,最大形变速率超过了 -6 cm/a ,直接威

胁了附近厂房、民房、公路、铁路的安全。

本文绘制了图 7a 中的 AA' 和 BB' 沿线的形变速率剖面图,结果如图 8 所示,蒲河煤矿区地表形变呈漏斗状分布.研究区域内不同位置监测点目标的累积形变时间序列如图 9 所示(实线连接的方块代表监测点目标平均的时间序列累计形变量,垂直误差条表示测量的标准偏差).其中,监测点 1 为崔公堡路边房屋(图 1⑦),监测点 2 为虎石台北大街路边建筑,监测点 3 位于崔公堡路边

厂房(图 1⑥),监测点 4 为形变区内房屋,监测点 5 位于最大形变处.从空间分布特征来看,蒲河煤矿区在本文监测时段内的最大累积形变超过 -16 cm,呈现出中心区形变较大、其他区域由内向外逐渐减缓的特征.从时间演化特征来看,蒲河煤矿区形变主要表现出线性趋势,可大致分为两个阶段,其中 2015 年 8 月至 2016 年 9 月期间形变速率较大,最大处可达 -14 cm/a,而 2016 年 9 月之后形变变缓,形变速率约为 -5 cm/a.

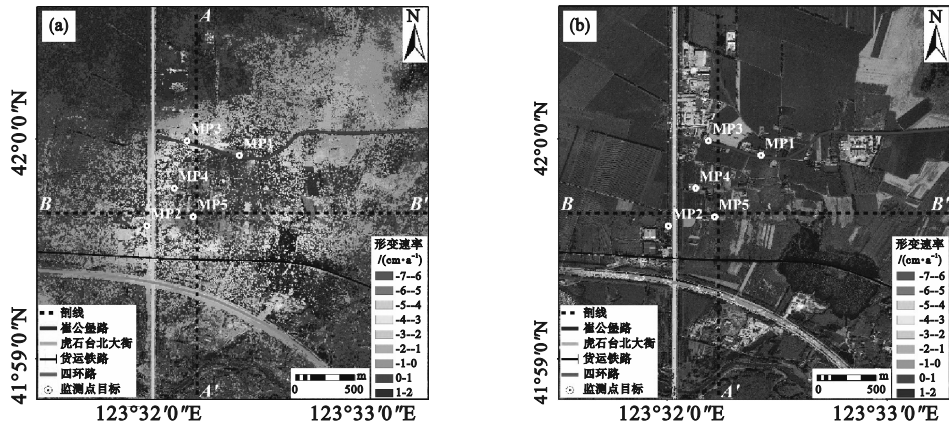


图 7 蒲河煤矿年形变速率结果

Fig. 7 Annual deformation rate results of Puhe Coal Mine

(a)—DS-InSAR; (b)—SBAS.

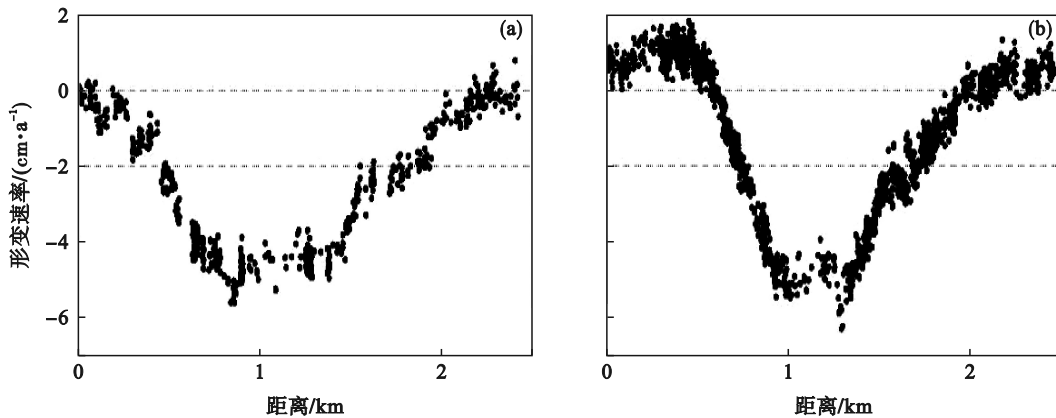


图 8 蒲河煤矿形变剖面图

Fig. 8 Deformation along profile of Puhe Coal Mine

(a)—沿水平方向剖面 AA'; (b)—沿垂直方向剖面 BB'.

蒲河煤矿工作面煤为褐煤,多为贝壳状及参差状断口,裂隙发育,含水易风化,煤层多为甲组复合煤层,结构复杂,煤层与顶底板为整合接触,上部夹矸少、煤质好,下部夹矸多、煤质差.煤层夹石层多为泥岩,局部含有较厚砂岩层.煤矿顶底板岩性属软岩层,顶板破碎,硬度较低,稳定性较差.然而随着煤层不断开采,不稳定的煤层顶板在重力作用下逐渐塌陷,地应力减弱^[20],形变速率较大,当受力不平衡的煤层顶板

达到受力平衡点而趋于稳定时,采空区上方地表形变也会逐渐变缓,这与监测结果一致.值得注意的是,如果矿区持续高强度开采,采空区的深度和广度不断扩大,导致地下岩层地应力失去平衡,在受到爆破、极端天气等外界条件影响时,可能会发生严重的坍塌事故,造成重大人员伤亡及财产损失.

3.2 Okada 模型反演结果

为了充分了解蒲河煤矿开采情况,基于时序

DS-InSAR 获取的形变监测结果,采用地球物理模型—Okada 模型进行参数反演. Okada 模型具有较高的自由度和较多的参数,可以获取更加详细的储层信息.该模型反演可得到 7 个参数,分别为源位置(X, Y)、长度、宽度、深度、张量和走向.综合考虑形变反演过程中数据点位密度对反演计算效率的影响,选用 1.44×10^{-4} 作为自适应四叉树方差阈值进行数据降采样,并基于 DS-InSAR 监测得到的蒲河煤矿形变区的地表形变特征,采用 Okada 模型对开采参数信息进行反演,参数最优值取最大后验概率解,参数的置信区间取 2.5% ~ 97.5%.在反演过程中使用独立的测量坐标系,参考基准为形变中心(123.537°E , 41.994°N),根据蒲河煤矿区域煤系地层岩性,

泊松系数确定为 0.25,得出的最优参数如表 2 所示.

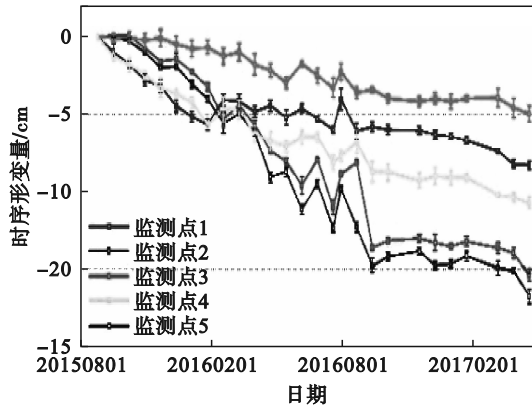


图9 监测点目标形变时间序列
Fig. 9 Time series of different MPs

表2 Okada 反演模型最优参数

Table 2 Optimal parameters of Okada inversion model

反演参数	源位置 X/m	源位置 Y/m	长度/ m	宽度/ m	深度/ m	张量/ m	走向/ $(^\circ)$
最优估值	571	248	1 092	1 216	519	-0.07	31

反演结果显示,投影到笛卡尔坐标系下煤层中心的平面坐标为(571 m, 248 m),煤层的长为 1 092 m,宽为 1 216 m,煤层的走向为从北方向顺时针旋转 31° ,参考文献[20]可知蒲河井田为单斜构造,走向北 30° 东,与反演结果较为接近.位错面张量为 -0.07 m ,说明煤矿开采引起了煤层收缩.反演得到的煤层深度为 519 m,陈天宇等对辽宁省 7 个主要煤田煤层气地面开发可行性进行了模糊综合评价,其中蒲河煤矿埋深约为 530 m,煤层厚度约为 12 m ^[30],说明本文对蒲河煤矿的煤层深度模拟结果较为准确.此外,尹璟友测量了蒲

河煤矿开采范围内地应力的大小和方向,结果显示蒲河煤矿煤层顶板埋深为 520 m ^[20],与本文反演的蒲河煤矿的煤层深度非常接近,反映了模型反演结果的准确性.

基于 Okada 模型反演得出的最优参数,本文正演了蒲河煤矿区的形变场,图 10a 为 DS-InSAR 形变监测结果,正演结果如图 10b 所示,图 10c 为 DS-InSAR 形变减去正演结果之后的残差.从残差图可以看出,正演残差分布在 $\pm 2 \text{ cm}$ 之内,表明模型反演参数较好地模拟了研究区的形变特征.

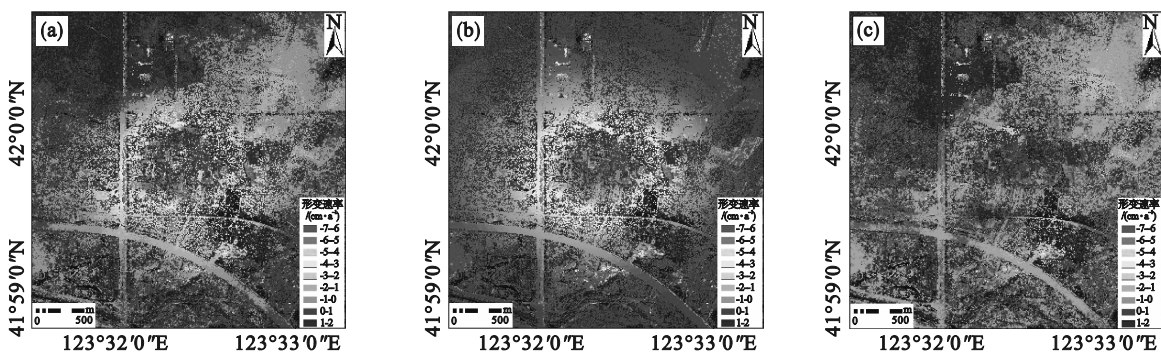


图 10 基于 DS-InSAR 结果的 Okada 模型正演形变场

Fig. 10 Deformation field of Okada model based on DS-InSAR results
(a)—DS-InSAR 形变监测结果; (b)—Okada 模型正演结果; (c)—残差结果.

4 结 论

1) 为了研究蒲河煤矿采空区地表历史形变

情况,本文收集了 2015 年 8 月至 2017 年 6 月覆盖沈阳市蒲河煤矿的 27 景 X 波段 TerraSAR-X 升轨数据,常规时序 InSAR 技术(如 SBAS)受到时间

失相干影响导致研究区域内可识别到的监测点目标数量稀少,仅少量分布在建筑物和道路上,难以满足监测需要.因此,本文采用分布式散射体干涉测量分析方法用以增加植被覆盖区域监测点目标的数量,成功获取了采空区地表形变速率和时间序列累积形变量.DS-InSAR监测结果表明,蒲河煤矿呈现漏斗型地面形变特征,沉降中心形变速率超过 -6 cm/a .形变主要呈线性趋势,2015年8月至2016年9月形变速率较大,2016年9月之后形变趋势变缓.

2) 为了充分了解蒲河煤矿开采情况,本文基于时序DS-InSAR获取的形变监测结果,采用地球物理模型—Okada模型进行参数反演,得到蒲河煤矿的煤层开采长度为 $1\ 092\text{ m}$,宽度为 $1\ 216\text{ m}$,深度为 519 m ,煤层的走向为从北方向顺时针旋转 31° .

3) 通过结合InSAR形变监测结果与地球物理模型,不仅可以准确获取采空区地表形变量,分析煤矿开采影响范围和破坏程度,还可以通过非接触式手段了解地下煤矿开采的深度和广度,建立地表形变特征(外在现象)与煤矿开采情况(内在原因)的耦合分析,对保障矿区安全生产和绿色可持续开采有着非常重要的意义.

参考文献:

- [1] 刘善军,吴立新,毛亚纯,等.天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J].煤炭学报,2020,45(6):2265-2276.
(Liu Shan-jun, Wu Li-xin, Mao Ya-chun, et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2265-2276.)
- [2] 廖明生,王腾.时间序列InSAR技术与应用[M].北京:科学出版社,2014.
(Liao Ming-sheng, Wang Teng. Time series InSAR technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2014.)
- [3] Perski Z, Jura D. ERS SAR interferometry for land subsidence detection in coal mining areas [J]. *Earth Observation Quarterly*, 1999(63): 25-29.
- [4] Wegmüller U, Strozzi T, Werner C, et al. Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE, 2000: 2771-2773.
- [5] Raucoules D, Maisons C, Carnec C, et al. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): comparison with ground-based measurement [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(4): 468-478.
- [6] Ng A H M, Chang H C, Ge L, et al. Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining [J]. *Earth Planets and Space*, 2009, 61(6): 733-745.
- [7] Walter D, Hoffmann J, Kampes B, et al. Radar interferometric analysis of mining induced surface subsidence using permanent scatterer [C]//Proceedings ESA ENVISAT Symposium. Freiberg, 2004: 6-10.
- [8] Jung H C, Kim S W, Jung H S, et al. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis [J]. *Engineering Geology*, 2007, 92(1): 1-13.
- [9] Guéguen Y, Deffontaine B, Fruneau B, et al. Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France) [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(1): 24-34.
- [10] Nadudvari A. Using radar interferometry and SBAS technique to detect surface subsidence relating to coal mining in Upper Silesia from 1993-2000 and 2003-2010 [J]. *Environmental & Socio-economic Studies*, 2016, 4(1): 24-34.
- [11] Pawluszek-Filipiak K, Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: the case study of rydutowy mine in poland [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 242.
- [12] 赵喜江,王斌,张在岩.基于SBAS-InSAR技术的鹤岗矿区地表沉降监测与分析[J].黑龙江科技大学学报,2019,29(1):66-70.
(Zhao Xi-jiang, Wang Bin, Zhang Zai-yan. Monitoring and analysis of surface subsidence in Hegang mining area using SBAS-InSAR technology [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science & Technology*, 2019, 29(1): 66-70.)
- [13] Xing X M, Zhu J J, Wang Y Z, et al. Time series ground subsidence inversion in mining area based on CRInSAR and PSInSAR integration [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(9): 2498-2509.
- [14] Lu Z, Wicks C. Characterizing 6 august 2007 Crandall Canyon mine collapse from ALOS PALSAR InSAR [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2010, 1(1): 85-93.
- [15] 田文涛.时序InSAR技术用于神东矿区塌陷的监测研究[D].西安:长安大学,2019.
(Tian Wen-tao. Monitoring of Subsidence of shendong mining area by time series InSAR technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.)
- [16] 刘一霖.黄河三角洲地面沉降时序InSAR技术监测与地下流体开采相关性分析[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2016.
(Liu Yi-lin. Land subsidence monitoring and correlation analysis with ground fluid exploitation using time series InSAR technique [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.)
- [17] 杨崇,刘国祥,于冰,等.基于InSAR形变的辽河油田曙光采油厂储层参数反演[J].国土资源遥感,2020,32(1):209-215.
(Yang Chong, Liu Guo-Xiang, Yu Bing, et al. Inversion of reservoir parameters in Shuguang Oil Production Plant of the Liaohe Oilfield based on InSAR deformation [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(1): 209-215.)
- [18] Dai Y, Ng H M, Wang H, et al. Modeling-assisted InSAR phase-unwrapping method for mapping mine subsidence [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020(99): 1-5.
- [19] Dong J, Zhang L, Tang M G, et al. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: a case study of Jiayu landslide in Danba, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 180-198.

(下转第882页)