

doi: 10.6046/zrzyyg.2020026

引用格式: 沙永莲, 王晓文, 刘国祥, 等. 基于 SBAS InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 194–201. (Sha Y L, Wang X W, Liu G X, et al. SBAS – InSAR – based monitoring and inversion of surface subsidence of the Shadunzi Coal Mine in Hami City, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 194–201.)

基于 SBAS InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演

沙永莲^{1,2}, 王晓文^{1,3}, 刘国祥^{1,3}, 张瑞^{1,3}, 张波¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 北京理工大学重庆创新中心, 重庆 401120; 3. 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 成都 611756)

摘要: 矿区地表沉陷监测能够为当地安全生产防护、开采规划和管理提供关键支撑信息。以新疆哈密砂墩子煤田矿区为研究对象, 利用 SBAS InSAR 方法调查了其于 2018 年 9 月—2019 年 10 月期间的地表沉陷特征。InSAR 形变监测结果显示砂墩子矿主井西北侧存在一个沉陷漏斗, 最大年均沉陷速率约为 150 mm/a。时序形变结果显示沉陷漏斗在 2018 年 9 月—2019 年 6 月间发生明显线性下沉, 而之后逐渐趋于稳定。基于 InSAR 观测形变, 采用 Okada 矩形位错模型反演得到砂墩子矿综采面采深约 349.89 m, 走向长约 1 001.27 m, 倾向宽约 211.80 m; 结合煤层视密度估算得到该矿在 2018—2019 年间开采量约 3.18 Mt, 与已有资料报道的该矿年产能基本一致。本研究为利用 InSAR 形变约束反演煤矿综采面参数, 并结合煤层视密度构建综采面参数与开采量之间关系提供了一种可行思路。

关键词: 开采沉陷; 砂墩子矿; SBAS InSAR; 参数反演

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097-034X(2021)03-0194-08

0 引言

煤炭是我国能源结构的主体,对煤炭资源开采活动进行合理的规划和管理对我国经济建设和生态环境保障具有重要意义^[1]。我国煤炭资源多是通过地下开采,而这种开采模式往往会破坏地层内部原有的力学平衡状态,导致采空区上方地表发生移动和变形^[2]。煤田矿区地表不均匀变形可能导致地面形成裂缝或者塌陷,破坏原有地质环境条件并引发地质灾害,从而严重影响地表相关建筑物等基础设施的安全使用,给矿区当地经济可持续发展造成隐患^[3]。

针对矿区不均匀地表形变的时空演化特征进行监测,可为当地地表沉陷隐患治理,安全生产保障和当地生态环境保护等提供关键支撑信息。目前,水准测量、全球导航卫星系统(GNSS)和合成孔径雷达干涉(InSAR)等多种大地测量方法已在矿区地表沉

陷监测中得到广泛应用^[4-5]。相比于传统大地测量手段,InSAR 具有全天候观测、覆盖范围广和观测效率高等优势^[6-7]。常规基于两景 SAR 影像进行干涉处理测量地表形变的两轨法 DInSAR (Differential InSAR),由于无法对形变观测模型中的误差项(如地形误差、轨道误差和大气延迟误差等)进行校正,常被用于瞬时、大幅度地表形变(如地震和火山)测量^[8-9]。近十年来,众多学者基于多景 SAR 影像提出多种时序 InSAR 分析方法以克服常规 DInSAR 相位失相干、大气延迟等影响,并实现长时间序列地表形变监测^[10-11]。其中,小基线集(small baseline subset, SBAS)时序 InSAR 方法能够有效利用冗余干涉对进行干涉相位建模,可有效抑制形变恢复模型中的误差项,已在城市地表沉降、活动断层滑移和滑坡运动监测等领域中得到广泛应用。

SBAS 时序 InSAR 技术已在煤田矿区地表形变特征监测、采空区位置和边界探测等方面展现了独

收稿日期: 2020-01-19; 修订日期: 2021-06-09

基金项目: 国家重点研发计划“星载 SAR 综合环境监测高精度数据处理与反演技术”(编号: 2017YFB0502704)、国家自然科学基金(面上项目)“基于多时相 SAR 的横断山东缘活动石冰川探测与失稳控制评价”(编号: 42071410)、国家自然科学基金(青年项目)“基于卫星 InSAR 的昆仑山口活动石冰川识别及运动特征分析”(编号: 41804009)、四川省科技厅应用基础面上项目“川藏铁路冻融边坡 InSAR 时序形变监测与运动特征分析”(编号: 2020YJ0322)及重庆市自然科学基金杰出青年基金项目“雷达精细信号处理”(编号: cstc2020jcyj-jqX0008)共同资助。

第一作者: 沙永莲(1994-),女,硕士,研究方向为合成孔径雷达干涉测量与应用。Email: syl973281310@163.com。

通信作者: 王晓文(1987-),男,副教授,研究方向为合成孔径雷达干涉测量与应用。Email: insarwxw@swjtu.edu.cn。

特的应用潜力^[12]。赵伟颖等^[13]应用 SBAS InSAR 对 9 景 ALOS PALSAR 数据进行处理,获取了徐州市某煤矿采动区中村庄在 2007—2011 年的累计沉降量,表明了利用 SBAS InSAR 监测矿区地表移动边界及建筑物区域地表移动临界区域的可靠性;李达^[14]基于 13 景 TerraSAR-X 数据分析了陕西省榆林市某煤矿区地表形变的时空演化特征,发现不同工作面开采时间与地表沉陷速率有一定相关性;阎跃观等^[15]基于 Sentinel-1A 影像采用 SBAS InSAR 测量了河北某煤矿的地表形变,并根据形变结果计算了该煤矿综采面走向边界角。有学者将煤田地下综采面简化为一个矩形位错模型,建立了综采面参数(开采深度,采煤厚度)与位错模型张裂分量之间的关系,王亚男^[16]根据该模型反演了 SBAS InSAR 测量的内蒙古上湾煤矿地表形变,探讨了采煤深度和厚度与地表形变量特征间的联系。朱煜峰^[17]反演了 SBAS InSAR 观测的江西省丰城市某煤矿地表累积沉陷量,得到了 InSAR 观测期间位错模型张裂分量;然后利用反演的矩形位错张裂量模拟了矿区地表沉陷,发现与水准测量数据一致,证明了简化位错模型在煤矿地下开采参数反演中的可行性。综上所述,由 InSAR 观测获取的高分辨率形变场能够反演采煤作业面深度等关键参数,但是基于 InSAR 地表形变为约束反演煤矿开采量的研究目前还比较少见。在反演得到综采面参数基础上,能否结合煤层视密度构建综采面参数与开采量之间的关系仍值得进一步研究。

本文以新疆哈密砂墩子煤田为例研究了基于时序 SBAS InSAR 观测形变反演地下煤矿综采面参数及煤矿开采量的可行性。砂墩子煤田是国家重点煤矿,设计产能 5.00 Mt/a,自 2012 年开始试生产以来,至今仍在开采中;该煤田处于半干旱地区,矿区表面及周边植被覆盖较少,非常有利于采用时序 InSAR 准确恢复其地表形变特征。本研究选取 2018 年 9 月—2019 年 10 月共 30 景 Sentinel-1A 升轨影像,首先利用 SBAS 方法恢复了该矿区一年时间内的地表形变;其次,以 SBAS InSAR 测量的地表形变速率为约束,基于 Okada 矩形位错模型反演了该煤矿综采面参数,进而根据煤层视密度、综采面参数和开采量的关系估算了砂墩子矿开采量,并与已有矿区资料进行了对比验证。

1 研究区概况及数据源

砂墩子煤矿位于新疆哈密市三道岭矿区西部,地理坐标为 E92°26′09″~92°32′10″,N43°08′33″~

43°12′26″,自西向东构成“L”形,北距 312 国道 5 km,南距兰新线 6 km(图 1)。图上,白色虚线为矿区边界线,红框表示 InSAR 分析区域,光学影像为研究区 Sentinel-2 光学影像,白色三角为主井位置。井田东西走向长约 7 km,南北最宽约 8 km,矿井分布三个井筒,主井位置为 E92°28′05″,N43°10′04″。从煤炭资源赋存来看,该矿区资源储量 877.44 Mt,设计产能 5.00 Mt/a,一期设计产能 3.00 Mt/a^[18]。该矿区水文地质条件简单,属简单型矿床,主采煤层顶底板以粉砂岩-泥岩为主^[19]。整个矿区气候干旱,昼夜温差大,属于典型温带大陆性干旱气候;降雨量少但集中,雨期多在夏季,易形成短时洪流。

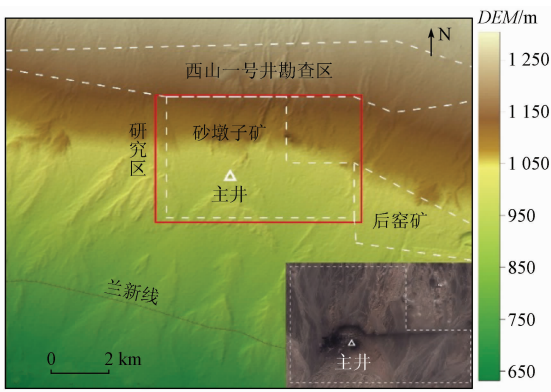


图 1 砂墩子煤矿地理位置及其周边地形图
Fig.1 Map of Shadunzi coal site

本文选取 30 景 Sentinel-1A 升轨 SAR 影像对研究区域进行 SBAS InSAR 形变监测分析,影像获取时间为 2018 年 9 月 7 日—2019 年 10 月 8 日。经过裁剪后监测区域面积约为 66.30 km²,SAR 影像空间分辨率约为 13.95 m(方位向)×2.33 m(距离向),SAR 影像中心入射角为 39.34°。

2 算法原理

2.1 SBAS InSAR 时序地表形变提取

SBAS InSAR 是一种经典的时序 InSAR 方法,它通过选择具有短时空基线的 SAR 影像对进行差分干涉处理,并针对相干目标点的相位进行建模和解算^[20],在一定程度上能够克服 DInSAR 常常面临的干涉相位失相干影响。此外,由于 SBAS 方法应用了尽可能多 SAR 干涉对参与解算,其能够改正 DInSAR 测量中的地形残差、轨道误差和大气延迟误差等多项误差,进而得到高分辨率和空间上连续的地表形变场。根据地表形变模型、干涉图组合方法和选点方法等不同,众多学者提出了不同的 SBAS 时序 InSAR 处理策略。本研究采用了 Hopper 等^[21-22]

提出的 StaMPS SBAS 方法进行砂墩子煤矿地表形变测量。StaMPS 结合振幅离差指数法和相位稳定性分析法选取滤波后相位微失相干 (slowly decorrelating filtered phase, SDFP) 像素,能够在容易失相干地区保障高密度的高相干目标点,以获取连续可靠的形变测量结果^[23]。同时,由于 StaMPS SBAS 方法没有预先设定地表形变的时序变化特征(如假设地表形变随时间发生一阶线性变化),因而更适宜于矿区等可能在时间序列上具有非线性高阶变化特征的地表形变场提取。同时,StaMPS 采用三维相位解缠方法恢复缠绕干涉图的绝对相位,相比于经典二维解缠方法能够有效提升相位解缠的精度和效率^[24]。

在 SAR 数据处理过程中,首先根据 SAR 影像垂直基线和时间基线进行干涉对选取,其中最大垂直基线和时间基线分别是 150 m 和 109 m,共组成 100 个干涉对。图 2 展示了所有干涉图基线组合情况。干涉图生成过程中,设置相干系数阈值为 0.4,对低相干区域像素进行掩模。设置幅度差分离差阈值 0.4,利用 StaMPS 相位稳定性分析方法在整个研究区域获取了 SDFP 点 6 663 个,平均监测密度为 101 点/ km²,表明基于高分辨率 Sentinel - 1 SAR 影像利用 StaMPS SBAS 方法能够获取高密度的监测点。

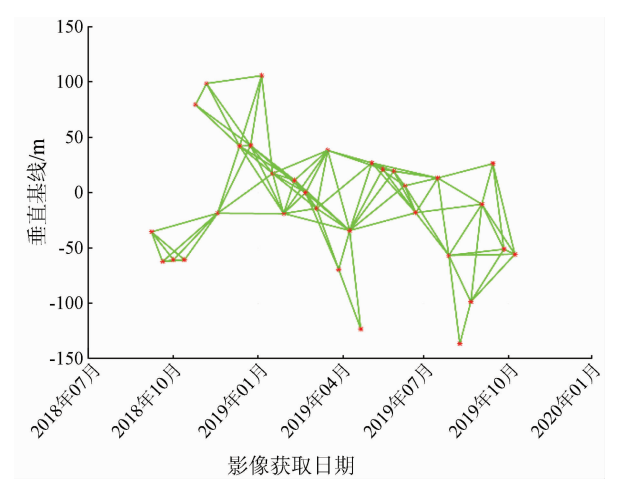


图 2 SBAS InSAR 时空基线分布图

Fig. 2 The spatial - temporal baseline for SBAS InSAR analysis

2.2 基于矩形位错模型的开采参数反演

Okada 矩形位错模型由日本学者 Okada^[25-26] 在 1985 年提出,该模型假设地壳浅层为均匀弹性半空间,建立了地壳深部某位错面剪切滑动或者张裂产

$$p(d|m) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} |\sum_d|^{-\frac{1}{2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(d - G(m))^T \sum_d^{-1}(d - G(m))\right], \tag{2}$$

式中: N 为点数; $\sum_d$ 为方差 - 协方差阵; $G(m)$ 为模型参数 m 的非线性模型函数。获取先验信息和似然函数后,利用贝叶斯公式获取后验概率密度函

生地地表变通用解析表达式。将矿区深部的综采面假设为位错面,则可以建立如图 3 所示的矩形位错模型示意图,取煤矿断层走向为 X 轴, Y 轴垂直断层走向, Z 轴与 X,Y 轴构成右手坐标系^[27]。Okada 模型位错面参数^[28] 主要包括走向角 φ 、倾角 θ 、长度 L 、宽度 W 、几何中心深度 d 、位错面几何中心 M 在地表的投影坐标 $M_0(x_0, y_0)$, $\vec{n}_i$ 代表位错面上任意点的张裂矢量,其大小为张裂的幅度。

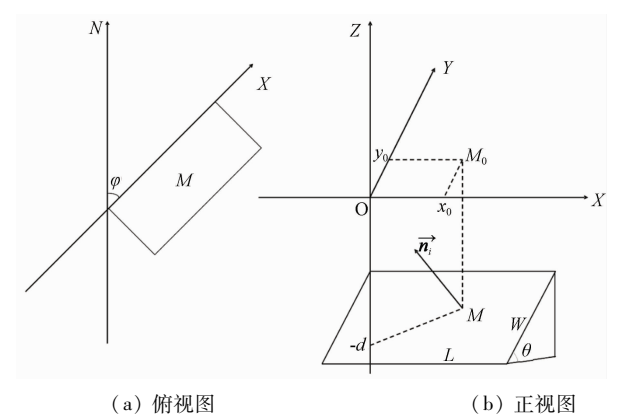


图 3 Okada 矩形位错模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Okada rectangular dislocation model

本研究采用贝叶斯后验反演算法进行砂墩子煤矿综采面参数反演。贝叶斯反演算法是基于统计理论的随机反演算法,关键步骤是在反演过程中进行大量采样,以获得模型后验概率分布,这里常用到马尔科夫链条蒙特卡洛采样方法(Markov chain Monte Carlo method, MCMC),该方法可进行有效采样并刻画后验概率分布^[29]。在反演中主要以贝叶斯框架为理论基础,结合 MCMC 方法采样,通过获取模型参数后验概率密度函数,进而得到模型参数最优解。在贝叶斯算法中,后验概率密度函数 $p(m|d)$ 是模型参数 m 对形变观测量数据 d 的条件概率函数,公式为:

$$p(m|d) = \frac{p(d|m)p(m)}{p(d)}, \tag{1}$$

式中, $p(m)$ 为模型参数的先验概率密度函数。其中,先验信息可来自资料、经验等,常用假设先验概率密度分布有均匀分布、高斯分布等。 $p(d)$ 是与 m 无关的归一化常量, $p(d|m)$ 是给定形变数据 d 情况下模型参数 m 的似然函数,它能够反映观测数据与反演模型之间的匹配程度。似然函数可定量描述模型参数的不确定性,一般假设多为高斯分布,可表示为:

数 $p(m|d)$, 假设模型参数为 n 个,第 i 个参数的边缘概率密度为:

$$p(m_i | d) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(m | d) dm_1 \cdots dm_{i+1} \cdots dm_n,$$

(3)

本研究反演综采面关键参数的具体流程如图4所示,其中输入的InSAR观测形变数据 d 可为地表形变速率或累积形变量。在反演计算时为了减少不必要的冗余数据,一般首先需要对输入数据进行降采样处理,主要方法有均匀重采样和四叉树重采样,同时构建观测区InSAR形变方差-协方差矩阵 $\sum_d$,用于计算似然函数;其次,根据先验信息获取先验概率密度函数 $p(m)$,并利用确定的初始模型

参数 m_i (其中 $m_i \in p(m)$)正演获取模拟形变(这里正演是指利用模型参数 m 和非线性模型函数 $G(m)$ 计算得到地表形变结果),然后基于以上结果利用式(2)计算似然函数;最后,根据MCMC采样方法和Metropolis-Hastings法则,自动选择步长来获取新的模型参数,从而计算新似然函数,并根据MCMC和Metropolis-Hastings法则对两个似然函数进行比较且保留对应的模型参数,以此来对模型参数进行大量有效的抽样,最终获得模型参数后验概率密度函数,并取最大后验概率解为参数最优值,即输出模型参数的最优估值。

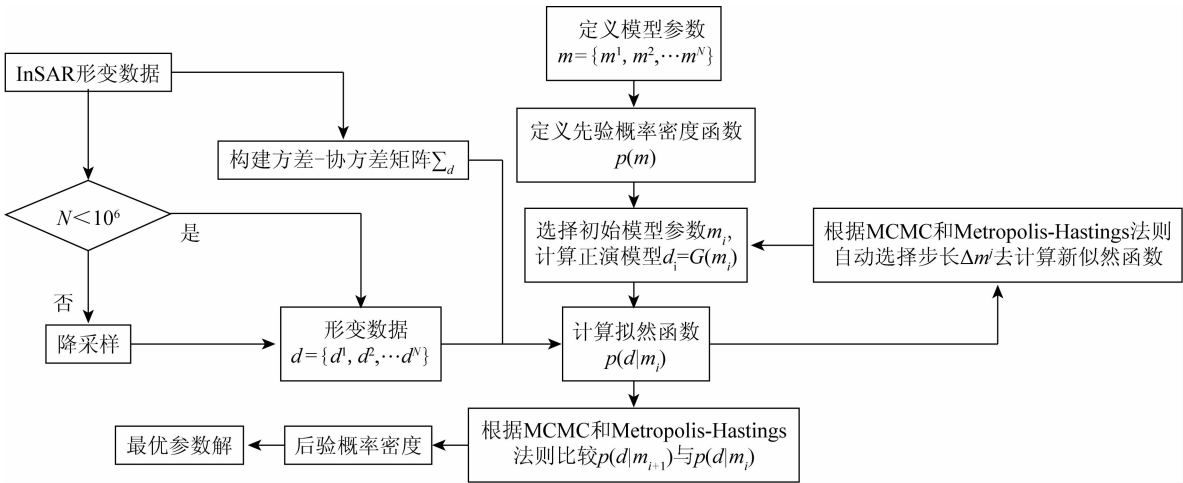


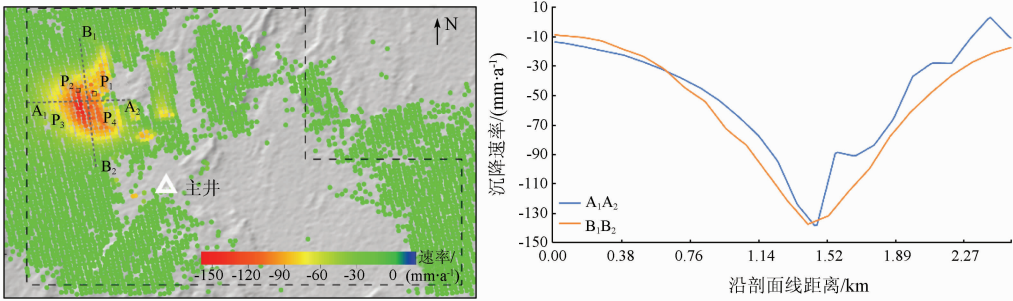
图4 基于矩形位错模型的贝叶斯参数反演流程图
Fig.4 Flow chart of the Bayesian parameter inversion based on rectangular dislocation model

3 实验结果

3.1 砂墩子煤田地表形变场

由于SAR卫星的侧视成像方式,利用SBAS InSAR测量得到的是沿卫星视线方向(line of sight, LOS)地表形变。考虑煤田开采沉陷主要表现在垂直向发生位移,为更直观地体现矿区沉陷特征,根据雷达波入射角将LOS向形变转换至垂直向。图5

(a)展示了利用SBAS InSAR测量的砂墩子矿在2018年9月7日—2019年10月8日期间的年平均沉陷速率图,图中灰色虚线为过沉陷漏斗的剖面线, P_1, P_2, P_3, P_4 为沉陷区选取的特征点,黑色虚线为矿区边界。图5(a)显示煤田主井西北部存在一个显著的沉陷漏斗,面积约为1.5 km²,其中红色最深的区域表示沉陷中心,此处最大年均沉陷速率约为150 mm/a。通过提取穿越沉陷漏斗的两条剖面线 A_1A_2 和 B_1B_2 上年均沉陷速率(图5(b)),发现接



(a) 基于 SBAS InSAR 的砂墩子矿年均沉陷速率
(b) 沿 A_1A_2 和 B_1B_2 剖面线地表沉陷速度变化
图5 基于 SBAS InSAR 的砂墩子矿年均沉陷速率和沿 A_1A_2 和 B_1B_2 剖面线地表沉陷速度变化
Fig.5 Annual average subsidence rate at the Shadunzi mine site from SBAS InSAR and surface subsidence rate along the profiles A_1A_2 and B_1B_2

近沉陷中心的两条剖面线上的沉陷速率变化趋势一致,均表现为从边缘至中心急速持续性下沉趋势,两剖面线处最大年均沉陷速率约为 140 mm/a。

为直观地表现砂墩子矿地表形变的时序变化特征,图 6 显示了在沉陷中心区域选取的特征点 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 在观测时间段内的时序累计沉陷量变化,图中红色线条为形变序列的拟合曲线。可以看出,4 个特征点在 2018 年 9 月—2019 年 6 月期间均呈现

持续性下沉趋势;而在之后时间段里,4 个特征点累计沉陷量逐渐趋于稳定。4 个特征点时序形变特征较为一致,交叉验证了 SBAS InSAR 恢复砂墩子煤田地表形变结果的可靠性。根据《砂墩子煤矿安全生产标准化煤矿申报表》显示,砂墩子矿分多个采区并分阶段开采,2019 年 6 月后砂墩子矿累计沉陷量趋于稳定,可能是该沉陷区对应综采面逐渐减小开采量或者停止开采的结果。

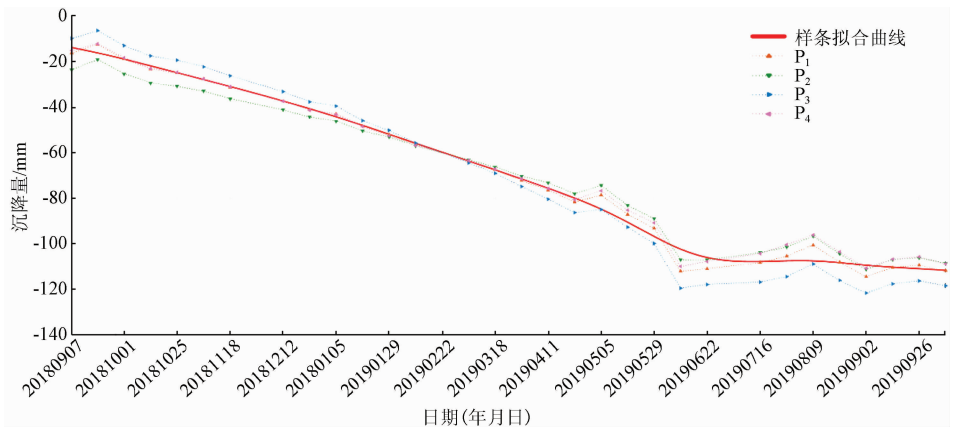


图 6 SBAS InSAR 获取的 4 个特征点时序累积沉陷量

Fig. 6 Time series accumulative subsidence of the 4 points from SBAS InSAR analysis

此外,4 个特征点在 2019 年 6 月—2019 年 8 月发生相对抬升。根据水文地质调查,砂墩子矿地质条件富含较强的含水带或导水带,利于地表降雨和融雪水渗入地下。当地气象资料及《潞新煤化工有限公司矿井改扩建工程报告》显示,矿区降雨多集中于夏季(夏季月均降雨量约 30 mm),融雪水通常也在 6 至 7 月汇流而下,易形成短时洪流。另外,砂墩子主采煤层顶底板以粉砂岩—泥岩为主,遇水易膨胀。因此,SBAS InSAR 观测到的抬升现象可能是当地的地质条件与气候环境因素综合导致。值得注意的是,在矿区当地发生暴雨和山洪时期,井矿可能面临突发性充水而更易发生事故,应采取积极有效预防措施,以免造成不必要的人员和财产损失。

3.2 Okada 位错模型反演结果

煤矿区地下开采活动引发的地表形变幅度和形态取决于多方面因素,如开采深度、工作面尺寸等。本文基于 Okada 矩形位错模型,以 SBAS InSAR 测量的 2018—2019 年地表年均形变速率为约束,反演了沉陷漏斗区对应综采面的关键参数。注意由于输入反演模型的观测是地表年均形变速率,故最终反演估计得到的开采量也代表年均值。反演所得参数结果会影响后续开采量的计算,因此验证反演所得综采面参数的准确性十分重要。本文通过以下 3 个方面来说明反演所得综采面参数的准确性:①对

比反演得到的综采面参数与搜集的矿区真实资料;②分析 InSAR 观测形变与模拟形变之间的残差大小和分布特征;③对比由模型计算得到的开采量和已有资料公布的矿井产能。

采用后验贝叶斯反演方法获取的砂墩子矿综采面最优参数如表 1 所示。该综采面中心投影至地表的平面坐标相对于坐标原点(E 92.44°,N 43.20°,即图 7 左上角顶点)为 968.64 m 东,1 739.45 m 南,开采深度约 349.89 m;综采面走向与北方向夹角即走向角约 177.41°,这与该煤田自北向南开采的实际情况相符;综采面走向长(沿着煤层走向布置的工作面顺槽长度)约 1 001.27 m,倾向宽约 211.80 m;综采面与水平面的夹角即综采面倾角约 6.01°,根据矿区已有资料显示,砂墩子矿主采 4 号煤层,煤层倾角

表 1 砂墩子矿综采面最优拟合参数
Tab.1 Optimal fitting parameters of fully mechanized mining face in Shadunzi Mine

模型参数	最优估值
X/m	968.636
Y/m	-1 739.450
深度/m	349.889
走向长/m	1 001.270
倾向宽/m	211.795
走向/(°)	177.408
倾角/(°)	6.012
张裂量/m	-0.861

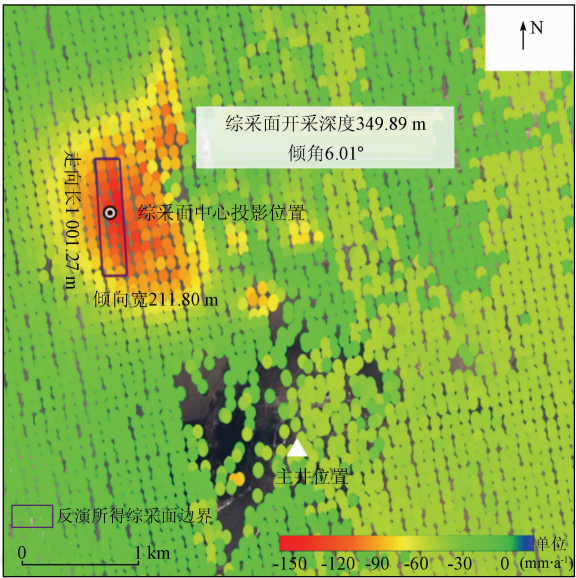


图 7 反演参数与 InSAR 形变结果的叠加示意图
Fig. 7 InSAR surface deformation map with the superposition of the inverted optimal parameters
5° ~ 25°, 平均倾角 8°, 该矿区采用综采采煤工艺, 综

采面大致沿煤层层面布置, 也就是综采面倾角基本反映该区域煤层倾角, 即本研究反演得到的倾角基本符合实际情况。此外, 本文将反演的综采面参数结果与二维形变图叠加展示 (图 7), 可以看出反演的综采面中心投影至地表后基本位于地表形变场中心位置, 综采面长度与地表形变场的空间尺度吻合, 进一步表明了反演所得最优综采面参数的可靠性。

图 8 中 (a) — (c) 分别展示了 SBAS InSAR 观测形变、模拟形变, 以及由二者做差得到的残差分布。从图 8 (a), (b) 形变空间分布来看, InSAR 观测形变与模拟形变的分布特征基本一致; 煤矿开采主要形变区域 (图 8 白色矩形框) 对应的残差值基本小于 20 mm, 较大残差值主要分布于沉陷漏斗的北缘 (图 8 (c)); 整个观测区的残差均值为 -2.4 mm, 说明残差值相对 InSAR 观测形变较小。残差分布特征和大小表明基于 Okada 位错模型能够完好地模拟砂墩子煤矿地表形变场, 反演得到的煤矿综采面参数较为可靠。

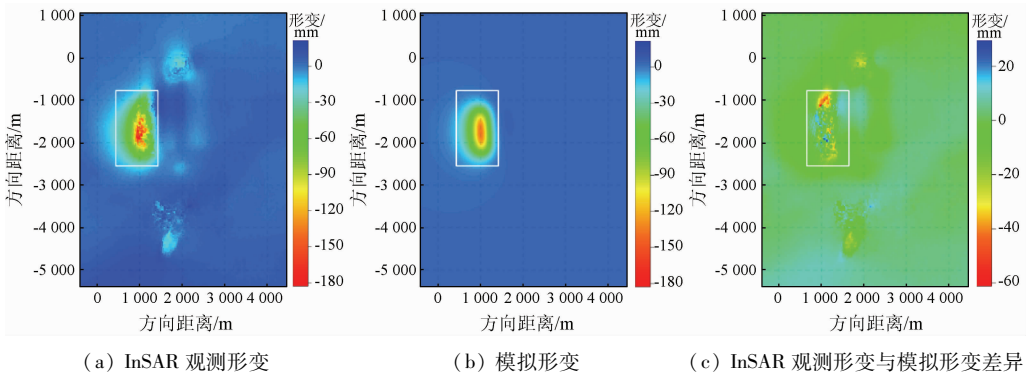


图 8 InSAR 观测形变与模拟形变对比
Fig. 8 Comparison of the simulated and the InSAR observed deformation

开拓煤量即开采量指在矿井可采储量范围内已完成设计规定的主井等开拓掘进工程构成的煤储量, 并减去开拓区内水文地质损失量、设计损失量和在可采期内不能回采的临时煤柱及其他开采量。由于损失煤量通常占比较小可以忽略, 本文根据煤田开采设计规范^[30]将开拓煤量计算公式简化为:

$$Q = L \times W \times M \times D \quad (4)$$

式中: L 为煤层两翼已开拓的走向长度; W 为采区平均倾斜长; M 为采区煤层平均厚度; D 为煤的视密度, 指单个煤粒的质量与外观体积 (包括煤的空隙) 之比。

经反演获得砂墩子矿综采面走向长约 1 001.27 m, 倾向宽约 211.80 m, 根据《潞新煤化工有限公司矿井改扩建工程报告》显示, 砂墩子矿主采的 4 号煤层平均厚度约 10.00 m, 最大厚度 32.48 m, 煤层视密度为 1.50 t/m³, 将上述参数代入式 (4), 可大致估算砂墩子矿年均开采量约 3.18 Mt。根据新疆维

吾尔自治区生态环境保护产业协会发布的《砂墩子矿环境影响评价》公告, 砂墩子煤矿自 2017 年起实际生产规模达已到 3.00 Mt/a, 表明本文所估算的开采量与该矿实际产能基本相符。

4 结论

本文利用 2018 年 9 月 7 日—2019 年 10 月 8 日期间覆盖砂墩子矿区的 30 景 Sentinel-1A 升轨影像, 基于时序 SBAS InSAR 方法对该矿区进行了地表沉陷监测。SBAS InSAR 监测结果显示砂墩子矿区主井西北侧存在一个明显的沉陷漏斗, 对应该矿目前投产的一个综采面, 沉陷面积约 1.5 km², 最大年均沉陷速率约 150 mm/a。综采面上方地表累积形变时序曲线显示在 2018 年 9 月—2019 年 6 月, 沉陷漏斗区地表表现持续性下沉趋势; 2019 年 6 月后

累积沉陷量趋于稳定,可能是开采作业放缓或者停止的结果。

基于 Okada 矩形位错模型,本文采用贝叶斯后验反演方法利用 SBAS InSAR 观测形变,反演得到砂墩子矿区综采面最优参数解,其中采深约 349.89 m,综采面走向与北方向夹角约 177.41° ,走向长约 1 001.27 m,倾向宽约 211.80 m,倾角约 6.01° ,与已有矿区资料基本符合。将由最优参数解算的模拟形变与 SBAS InSAR 观测形变结果对比,发现它们空间分布特征一致,两者残差较小。根据反演所得综采面走向长与倾向宽参数,估算得到砂墩子矿在 InSAR 观测期间的年均开采量约 3.18 Mt,与已有矿区资料报道的矿区年产能 3.00 Mt/a 一致。本文研究结果表明了基于时序 InSAR 观测形变反演和估算煤田综采面关键参数的可行性。

志谢: 感谢欧空局提供 Sentinel-1A SAR 影像及美国地质调查局(UGSG)提供的 SRTM-1 地形数据。

参考文献(References):

- [1] 张方哲. 中国煤矿资源评估与开发可行性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Zhang F Z. Coal resource assesment and development feasibility study of China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010.
- [2] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
He G Q, Yang L, Ling G D, et al. Mining subsidence theory[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Publisher, 1991.
- [3] 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.
Zhu J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [4] 王志勇, 张继贤, 黄国满. 基于 InSAR 的济宁矿区沉降精细化监测与分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 169-174.
Wang Z Y, Zhang J X, Huang G M. Precise monitoring and analysis of the land subsidence in Jining coal mining area based on InSAR technique[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 169-174.
- [5] 马飞虎, 姜珊珊, 孙翠羽. PSInSAR 在铅山县矿区地表沉降监测中的应用[J]. 应用科学学报, 2018, 36(6): 95-103.
Ma F H, Jiang S S, Sun C Y. Application of PSInSAR in monitoring land subsidence in Yanshan mining area[J]. Journal of Applied Sciences - Eletronics and Information Engineering, 2018, 36(6): 95-103.
- [6] 李德仁. InSAR 技术进步与地面沉降监测应用[J]. 上海国土资源, 2013, 34(4): 1-6.
Li D R. InSAR Technological progress and its application to land subsidence monitoring[J]. Shanghai Land & Resources, 2013, 34(4): 1-6.
- [7] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B4): 7547-7563.
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [9] 葛大庆, 王艳, 范景辉, 等. 地表形变 D-InSAR 监测方法及关键问题分析[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(4): 14-22. doi:10.6046/gtzyyg.2007.04.03.
Ge D Q, Wang Y, Fan J H, et al. A study of surface deformation monitoring using differential SAR interferometry technique and an analysis of its key problems[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(4): 14-22. doi:10.6046/gtzyyg.2007.04.03.
- [10] Casu F, Manzo M, Lanari R. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3-4): 195-210.
- [11] Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B11).
- [12] 尹宏杰, 朱建军, 李志伟. 基于 SBAS 的矿区形变监测研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 52-58.
Yin H J, Zhu J J, Li Z W. Ground subsidence monitoring in mining area using DInSAR SBAS algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(1): 52-58.
- [13] 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, 485(2): 205-208.
Zhao W Y, Deng K Z, Yang J K, et al. Monitoring on influence of mining area deformation based on SBAS technology on buildings[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 485(2): 205-208.
- [14] 李达. 时序 SAR 技术在矿区形变监测中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
Li D. Application of timing series SAR technology in deformation monitoring of mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining, 2017.
- [15] 阎跃观, 代文晨, 赵传武, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的矿区地表移动规律研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(s2): 177-180.
Yan Y G, Dai W C, Zhao C W, et al. Surface movement law of mining area based on SBAS-InSAR technology[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(s2): 177-180.
- [16] 王亚男. InSAR 技术用于矿区大量级塌陷监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
Wang Y N. Research on large-scale mining collapse monitoring with InSAR technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [17] 朱煜峰. 矿区地面沉降的 InSAR 监测及参数反演[D]. 湖南: 中南大学, 2013.
Zhu Y F. Analysis of ground subsidence monitoring in mining area using InSAR with parameter inversion[D]. Hunan: Central South University, 2013.
- [18] 赵鑫. 基于 RS、GIS 的哈密三道岭矿区生态环境调查与评价[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
Zhao X. Environmental investigation and assessment based on RS & GIS in Hami Sandaolin mining area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.

- [19] 李凡. 潞安新疆煤化工(集团)有限公司砂墩子矿井3.00 Mt/年(一期)矿井建设项目环境影响评价公众参与第二次公示[R]. 新疆:新疆生态环保产业协会,2017.
Li F. Lu'an Xinjiang Coal Chemical Industry (Group) Co., Ltd. Shadunzi Mine 3.00 Mt/year (Phase 1) mine construction project environmental impact assessment public participation second public notice[R]. Xinjiang: Xinjiang Ecological Environmental Protection Industry Association, 2017.
- [20] Paolo B, Gianfranco F, Riccardo L, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [21] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(23): L23611.
- [22] Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16): L16302.
- [23] 王琪. 利用永久散射体雷达干涉技术进行太原市地面沉降监测[J]. 测绘通报, 2014(5): 71–75.
Wang Q. A study of ground deformation over Taiyuan City using PS-InSAR technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(5): 71–75.
- [24] Mostafa E, Mahdi M, Andy H. Application of dual-polarimetry SAR images in multitemporal InSAR processing[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2017, PP(99): 1–5.
- [25] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1985, 75(4): 1135–1154.
- [26] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1992, 82(2): 1018–1040.
- [27] Yang X M, Davis P M, Dieterich J H. Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1988, 93(B5): 4249–4257.
- [28] Carnec C, Fabriol H. Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(9): 1211–1214.
- [29] 杨崇. 辽河油田地表沉降InSAR监测及储层参数反演[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
Yang C. Surface subsidence InSAR monitoring and reservoir parameter inversion in liaohu oilfield[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [30] 国家安全生产总局. 安监总煤行(2014)61号—2014煤矿生产能力核定标准[S]. 北京:煤矿安监局行业安全基础管理指导司, 2014.
State Administration of Work Safety State Council. No. 61—2014 Verification standard of coal mine production capacity[S]. Beijing: Safety Supervision General Coal Bank, 2014.

SBAS – InSAR – based monitoring and inversion of surface subsidence of the Shadunzi Coal Mine in Hami City, Xinjiang

SHA Yonglian^{1,2}, WANG Xiaowen^{1,3}, LIU Guoxiang^{1,3}, ZHANG Rui^{1,3}, ZHANG Bo¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China; 3. State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-speed Railway Safety, Chengdu 611756, China)

Abstract: The monitoring of surface subsidence in mining areas can provide key information for local production safety protection and mining planning and management. Based on the Sentinel-1A images from September 2018 to October 2019, this study characterized the surface subsidence in the mining area of the Shadunzi Coal Mine in Hami City, Xinjiang, China using the combined small baseline subset (SBAS) and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) analysis. The InSAR measurement results revealed a subsidence funnel with a maximum subsidence rate of about -150 mm/a to the northwest of the main shaft of the coal mine. As indicated by the displacement time series, the subsidence funnel showed a significant linear subsidence pattern from September 2018 to June 2019 and gradually stabilized thereafter. Then the surface deformation inversion was conducted using the Okada rectangular dislocation model to obtain the parameters of the working face of the coal mine. The modeling results showed that the working face had a depth of about 349.89 m, a length of about $1\,001.27$ m, and a width of about 211.80 m. Based on the inversion results as well as the apparent density of the coal seams, the annual mining capacity of the coal mine was estimated to be about 3.18 Mt during 2018–2019, which is consistent with the reported annual production capacity of the coal mine. This paper provides a feasible way to conduct the parameter inversion of coal mine working face under the constraints of InSAR measurements and to infer the relationship between the working face parameters and the mining capacity according to the apparent density of coal seams.

Keywords: mining-induced surface subsidence; Shadunzi Coal Mine; SBAS-InSAR; parameter inversion

(责任编辑:李瑜)