



引文格式:郑美楠,邓喀中,郭庆彪,等.淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷InSAR监测与规律分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1356-1366.DOI:10.13203/j.whugis20220701

Citation: ZHENG Meinan, DENG Kazhong, GUO Qingbiao, et al. Monitoring and Law Analysis of Surface Secondary Subsidence of Closed Mines in Huainan Mining Area Based on InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1356-1366. DOI: 10.13203/j.whugis20220701

淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷InSAR 监测与规律分析

郑美楠^{1,2} 邓喀中² 郭庆彪¹ 赵若南³ 秦锡鹏²

¹ 安徽理工大学矿山环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心, 安徽 淮南, 232001

² 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州, 221116

³ 乌拉尔国立矿业大学采矿工程学院, 俄罗斯 叶卡捷琳堡, 620000

摘要: 不同地质采矿条件下关闭矿井地表次生沉陷规律是国内外关注的问题之一, 对此进行研究具有重要的理论和实用价值。淮南矿区地下潜水位高、第四系松散层厚、煤层开采多, 监测分析淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷规律具有典型性。基于160景Sentinel-1A数据, 利用永久散射体干涉法(persistent scatterers interferometry, PSI)和小基线集(small baseline subset, SBAS)技术分别获取了2016-01-14—2022-05-30淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷。结果表明, 新集三矿、李嘴孜-新庄孜-谢一矿关闭后地表上升, 新庄孜矿最大上升速率为51.1 mm/a, 而潘一矿因关闭时间晚(2018-09)受采空区残余形变影响地表仍表现为下沉。由PSI和SBAS同名点监测结果统计分析可知二者相关性为0.74, 标准偏差为1.59 mm/a, 证明了合成孔径雷达干涉结果的可靠性。通过时序形变分析, 将淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷规律归纳为下沉阶段—稳定阶段—上升阶段, 但下沉、稳定和上升阶段并不一定随时间推移逐次发生。由地表上升起始时间及李嘴孜矿、新庄孜矿和谢一矿的位置关系可知, 三矿之间可能存在水力联系, 地下水先从新庄孜矿和谢一矿交界处开始回升, 后流向东南和西北两侧。研究成果对完善关闭矿井地表沉陷规律、构建地表沉陷预测模型具有重要意义。

关键词: 关闭矿井; 淮南矿区; 地表次生沉陷; InSAR

中图分类号: TD325

文献标识码: A

收稿日期: 2022-11-02

DOI: 10.13203/j.whugis20220701

文章编号: 1671-8860(2024)08-1356-11

Monitoring and Law Analysis of Surface Secondary Subsidence of Closed Mines in Huainan Mining Area Based on InSAR

ZHENG Meinan^{1,2} DENG Kazhong² GUO Qingbiao¹ ZHAO Ruonan³ QIN Xipeng²

¹ Coal Industry Engineering Research Center of Mining Area Environmental and Disaster Cooperative Monitoring, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

² School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology (Xuzhou), Xuzhou 221116, China

³ Department of Mining and Technology, Ural State Mining University, Yekaterinburg 620000, Russia

Abstract: Objectives: As a continuation of mining subsidence, the surface secondary subsidence (including sinking and uplift) of closed mines poses a potential threat to the safety of surface buildings-structures in mining areas. However, at this stage, the law analysis of the surface secondary subsidence of closed mines under different geological mining conditions is not yet comprehensive. Due to the high underground water level, thick Quaternary loose layers, and multiple coal seams in the Huainan mining area, monitoring and analyzing the surface secondary subsidence of closed mines in the Huainan mining area has important theoretical and practical values. **Methods:** First, in order to verify the reliability of the monitoring results, the

基金项目: 安徽理工大学引进人才基金(2021yjrc54); 矿山环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心(安徽理工大学)开放基金(KSX-TJC202208); 安徽高校自然科学研究项目(KJ2021A0445); 国家自然科学基金(51774270, 51904008)。

第一作者: 郑美楠, 博士, 讲师, 主要研究方向包括InSAR技术与应用、开采沉陷等。zmncumt@126.com

通讯作者: 邓喀中, 博士, 教授。kzdeng@cumt.edu.cn

StaMPS software is employed to simultaneously perform persistent scatterers interferometry and small baseline subset processing. Amplitude dispersion index and amplitude difference dispersion index are used to select coherent points, respectively. Then, the unwrapped phases of the coherent points are obtained by a three-dimensional phase unwrapping algorithm. Finally, the surface subsidence of the coherent points are obtained by using temporal-domain low-pass and spatial-domain high-pass filtering. **Results:** The results show that: (1) The surface uplifts after the closure of Xinjisan and Lizuizi-Xinzhuangzi-Xieyi mines, with a maximum uplift rate of 51.1 mm/a, and is located in Xinzhuangzi mine, while the surface of Panyi mine is still sinking due to its late closure in September 2018. (2) The surface secondary subsidence law of closed mines in Huainan mining area is sinking stage-stable stage-uplift stage, which is consistent with the surface subsidence law of closed mines in Xuzhou mining area, but the sinking, stable and uplift stages do not necessarily occur successively over time. (3) There may be a hydraulic connection between Lizuizi, Xinzhuangzi, and Xieyi mines. The groundwater first rises from the junction of Xinzhuangzi and Xieyi mines and then flows to the southeast and northwest sides. **Conclusions:** Although the law of surface subsidence in the closed mines of Huainan and Xuzhou mines is relatively consistent, there are differences in the law of surface uplift due to different hydrogeological mining conditions. Therefore, in future work, we will continue to pay attention to the law of surface secondary subsidence of closed mines under different geological mining conditions.

Key words: closed mine; Huainan mining area; surface secondary subsidence; InSAR

在中国能源体系中,煤炭一直起到压舱石和兜底保障作用,然而,煤炭资源常年高强度、大规模开采,致使部分地区煤炭资源趋于枯竭;此外,随着中国能源结构的调整及供给侧结构性改革的实施,小、散、乱的煤矿陆续被整顿关闭和进行资源整合^[1-2]。关闭矿井作为矿井开发利用全生命周期的最后一环,其诱发的资源、环境、安全及社会等问题已逐渐显现^[3-4]。关闭矿井地表次生沉陷(包括地表沉降和上升)^[5]作为开采沉陷的延续,对矿区地表建筑物安全构成潜在威胁,而现阶段对不同地质采矿条件下关闭矿井地表次生沉陷监测与规律分析尚不全面,因此,监测分析淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷对完善关闭矿井地表次生沉陷机理和规律,构建关闭矿井地表次生沉陷预测模型具有重要的实际意义。

淮南矿区作为中国东南部地区乃至全国最好的一块整装煤田,其资源赋存好、储量大,煤炭储量占华东地区总储量的一半以上,是国家首批认定的 13 个国家亿吨级煤炭基地之一。自 1897 年开始地下开采,淮南矿区已有 120 余年的煤炭开采历史^[6]。然而,伴随着采矿业蓬勃发展,在大量煤炭资源被获取的同时,淮南矿区在地质环境方面也付出了极大的代价,尤其在采煤造成的采空地面塌陷方面^[7-8],淮南矿区的地下潜水位高、第四系松散层厚、煤层开采多等导致其地表沉陷次数多、沉陷量大、沉陷影响范围广、沉陷区易积水、稳沉时间长等^[9]。因此,监测分析淮南矿区关

闭矿井地表次生沉陷规律具有典型性。

传统的地表形变监测方法主要包括水准测量、GNSS 等,其测量精度高,但测点密度低、费时、费力、成本高,不便于进行大范围、长时序地表形变监测。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具备全天时、全天候、高精度监测地表形变的能力^[10-11],因此,利用 InSAR 技术监测关闭矿井地表次生沉陷可行性较高,同时可利用存档合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据追溯历史形变信息。不少学者基于 InSAR 技术开展了关闭矿井地表沉陷监测与分析,为研究关闭矿井地表沉陷规律提供了数据基础。Guéguen 等^[12]、Samsonov 等^[13]、Cuenca 等^[14]、André^[15]利用 InSAR 技术分别获取了法国、卢森堡、荷兰、比利时等国家关闭矿井地表沉陷,监测结果表明,在矿井关闭后,地表仍存在残余下沉现象,之后受地下水回升影响,地表出现上升。邓喀中等^[5]、郑美楠等^[16-18]、余昊等^[19]和 Yu 等^[20]利用时序 InSAR 技术分别获取了中国江苏徐州西部矿区(夹河矿、张小楼矿和庞庄矿)、徐州东部矿区(韩桥矿、权台矿和旗山矿等)和山东淄博矿区关闭矿井地表沉陷,结果表明,在矿井关闭初期,地表仍存在明显的残余下沉,而后随地下水回升地表上升。尽管各国学者利用 InSAR 技术对关闭矿井地表沉陷进行了监测与分析,但缺乏对地表次生沉陷规律的归纳总结,关闭矿井地表次生沉陷规律仍有待完善。

基于此,本文利用2016-01-14—2022-05-30的160景升轨 Sentinel-1A 数据,采用时序 InSAR 技术获取了淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷。同时,为了评估监测结果的可靠性,利用永久散射体干涉法(persistent scatterers interferometry, PSI)和小基线集(small baseline subset, SBAS)技术分别获取了地表沉陷信息,通过同名点的年形变速率的统计分析验证了两种监测结果的一致性,并结合矿区地质采矿资料和时序形变信息分析了淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷时空演化规律。研究成果对促进煤矿区全生命周期安全绿色开发具有重要的实用价值。

1 StaMPS 技术原理

PSI 技术在非城市区域所选永久散射点(persistent scatterers, PS)较少,使其无法准确解算地表沉陷,为此 Hooper 等^[21]提出了 StaMPS 技术,该技术可同时支持单主影像(PSI)和多主影像(SBAS)InSAR 分析。StaMPS/SBAS 技术首先利用选点算法选取高相干点,并基于各相位成分的时空相关性对其优化,而后通过三维相位解缠算法^[22]进行解缠,根据各类误差相位时空特性的不同将其在解缠相位中去除,最终得到相干点集的形变相位。StaMPS/SBAS 数据处理流程见图1。其主要步骤如下:

1) 假设共获取 $N+1$ 景 SAR 数据,根据时空基线最优原则,选取一幅影像作为公共主影像,其他 N 幅影像作为辅影像,组成 N 个 PSI 时序干涉对。同时,将满足时空基线阈值的 $N+1$ 幅 SAR 影像组合成 M (M 满足: $(N+1)/2 \leq M \leq N(N+1)/2$) 个 SBAS 时序干涉对,须保证 SBAS 时序干涉对构成的网络是连通的。对组成的 PSI 和 SBAS 时序干涉对进行配准、干涉、去平地效应、滤波等操作,得到相应的时序差分干涉图。

2) 选取 PS 点和缓慢去相关滤波相位(slowly decorrelating filtered phase, SDFP)点。利用幅度离差指数($D_A = \sigma_A / \mu_A$, σ_A 、 μ_A 分别为干涉图幅度均值和标准差)选取 PS 点;利用幅度差分离差值($D_{\Delta A} = \sigma_{\Delta A} / \mu_A$, $\sigma_{\Delta A}$ 是主、辅影像幅度差的标准差)选取 SDFP。通过自适应低通滤波器估计空间相关性相位(如形变相位、轨道误差相位、大气延迟相位)和部分空间相关性的视角误差相位,同时利用视角差和垂直基线估计空间非相关视角误差相位,具体步骤见文献[21]。

3) 构建时间相干系数 γ_k 对 PS 点与 SDFP 点

进行精化:

$$\gamma_k = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \left\{ j \left(\phi_{\text{diff}}^i - \tilde{\phi}^i - \phi_{\theta}^{i,u} \right) \right\} \right| \quad (1)$$

式中, ϕ_{diff}^i 为差分干涉相位; $\tilde{\phi}^i$ 为空间相关相位; $\phi_{\theta}^{i,u}$ 为空间非相关视角误差相位。时间相干系数 γ_k 可反映 PS 点和 SDFP 点的相干性, γ_k 值越大,相干性越高,可利用 γ_k 对 PS 点和 SDFP 点进行精化。式(1)为非线性系统,可利用解空间搜索方法求解。

4) 时序形变与形变速率解算。对最终选取的 PS 点和 SDFP 点构建 Delaunay 三角网,并利用三维相位解缠算法^[22]获取每个高相干点的解缠相位,然后根据形变相位、大气相位以及轨道相位等在时间和空间上的不同特性,利用时间域低通滤波和空间域高通滤波对其进行分离,并将大气相位和轨道相位等误差相位在解缠相位中剔除,获取每个高相干点的形变相位,最终获取 PS 点和 SDFP 点的时序形变与形变速率。

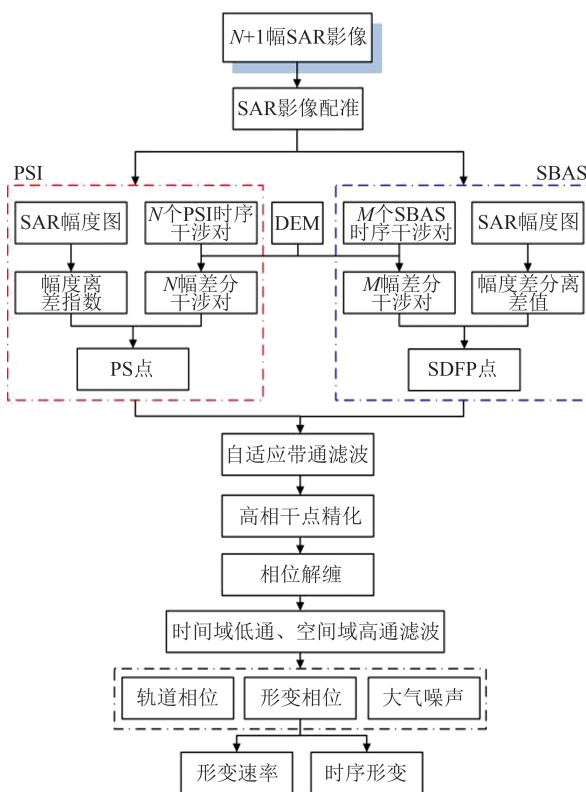


图1 StaMPS/SBAS 技术数据处理流程

Fig. 1 Processing Flowchart of StaMPS/SBAS Technology

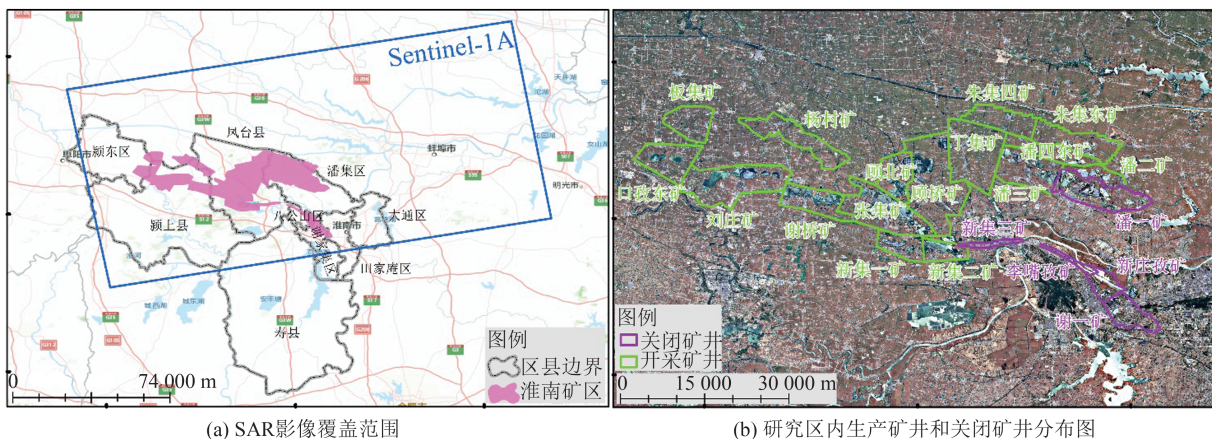
2 研究区域与数据

淮南矿区位于安徽省北部,横跨淮河两岸,其区域地质构造属华北板块南缘,东起郯庐断裂

带,西至阜阳断层,北接蚌埠隆起,南以老人仓-寿县断层与合肥坳陷相邻。矿区东西长约 70 km,南北宽约 25 km,面积约 1 571 km²,淮南矿区地理位置如图 2(a)所示(来源于国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn/>))。区内煤炭储量丰富,总储量占安徽省的 74%,华东地区的 50%。淮南矿区以淮河为界划分为南、北两个矿区,淮河以北为潘谢新区,构造相对简单,但矿井的煤层埋藏较深,松散层较厚,一般为 120~564 m,开采条件相对较好,主要分布了朱集矿、顾桥矿、潘一矿、潘二矿、潘三矿、潘四矿、丁集矿、顾北矿、张集矿、谢桥矿等;淮河以南为淮南老矿区,断裂构造比较多,开采的地质条件较复杂,主要有谢一矿、新庄孜矿、李嘴孜矿等。因部分矿井煤炭资源枯竭,淮南矿区已关闭矿井 5 对,

集中在淮南矿区东南角,其中老矿区 3 对、新矿区 2 对,研究区内生产矿井和关闭矿井分布如图 2(b)所示(绿色表示生产矿井,紫色表示关闭矿井),关闭矿井(关闭时间)分别为潘一矿(2018-09)、新集三矿(2016-11)、李嘴孜矿(2016-12)、新庄孜矿(2017-12)和谢一矿(2016-12)。

为获取淮南矿区关闭矿井地表沉陷,本文共收集 2016-01-14—2022-05-30 的 160 景 C 波段升轨 Sentinel-1A 影像,SAR 影像分辨率为 13.9 m×2.3 m(方位向×距离向),入射角为 33.7°,SAR 影像覆盖范围如图 2(b)所示。数据处理时,采用美国航空航天局提供的 3 秒弧航天飞机雷达地形人物数字高程模型数据进行地理编码及去除地形相位,采用欧洲空间局提供的精轨数据提高 Sentinel-1A 数据的轨道精度和配准精度。



(a) SAR影像覆盖范围

(b) 研究区内生产矿井和关闭矿井分布图

图 2 淮南矿区地理位置及矿井开采概况

Fig. 2 Geographical Location and Mining Situation of Huainan Mining Area

由于缺少地表实测数据,为了评估监测结果的可靠性,实验同时进行了 PSI 和 SBAS 处理,PSI 处理时选取 2019-02-27 影像作为主影像,其余影像均与主影像配准并进行干涉,共形成 159 个干涉对,相应的时空基线情况如图 3(a)所示。在利用 SBAS 技术分析时,设置 Sentinel-1A 数据的小基线集最大时、空基线阈值分别为 36 d 和 150 m,由于部分干涉对受时空失相干影响严重,在进行 SBAS 技术分析时被剔除,最终选择了 408 个干涉对,干涉对时空基线情况如图 3(b)所示。

3 结果与分析

图 4 为利用 2016-01-14—2022-05-30 的 Sentinel-1A 数据和 PSI、SBAS 技术获取的淮南矿区关闭矿井地表视线向(line of sight, LOS)沉陷速率。负值代表远离卫星方向(即沿着 LOS 下沉),

正值代表靠近卫星方向(即沿着 LOS 上升)。由图 4(a)可知,由于 Sentinel-1A 数据时间跨度较长,受时间失相干、地表植被和农作物影响较为严重,PSI 所选高相干点多分布于研究区域建筑物和裸露岩体上,选点密度及数量较低,使得 PSI 技术无法获取完整的地表沉陷结果。PSI 技术共选取高相干点 35 797 个,平均选点密度为 25.5 个/km²。而 SBAS 技术通过设置小基线集的最大时间基线和空间基线阈值选取干涉对,并对其进行多视处理,提高了监测结果中相干点的数量和密度(图 4(b)),与 PSI 监测结果对比可知,SBAS 技术不仅在建筑物上选择了大量的相干点,在农田和植被区域也选取了部分相干点。SBAS 技术共选取相干点 175 891 个,平均选点密度为 125.3 个/km²,是 PSI 的 4.9 倍。但由于淮南矿区地下潜水位较高,地下煤层开采后地表易形成积水区,导致 InSAR 技术无法有效获取积水区的形变信息。

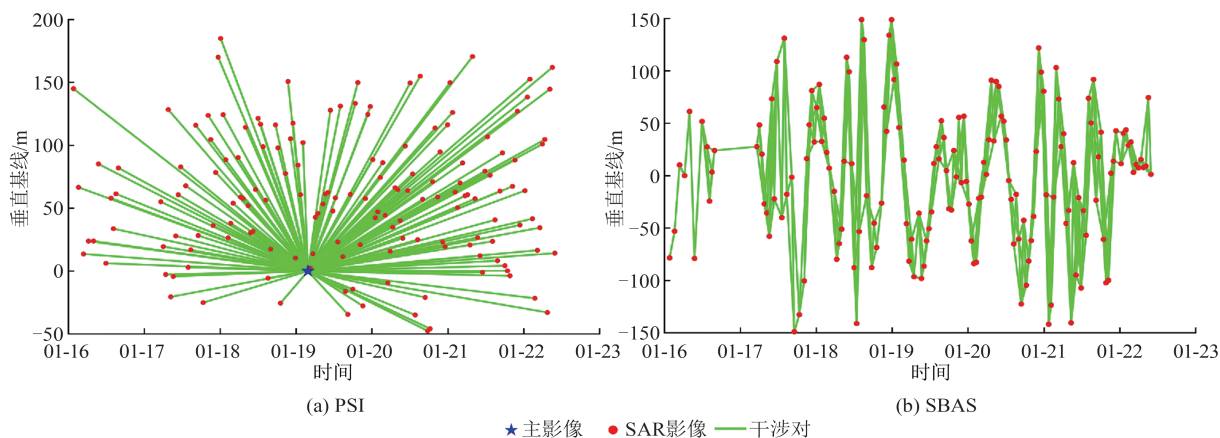


图3 PSI与SBAS技术所用干涉对时空基线信息

Fig. 3 Spatiotemporal Baseline Information of Interferogram in PSI and SBAS Technologies

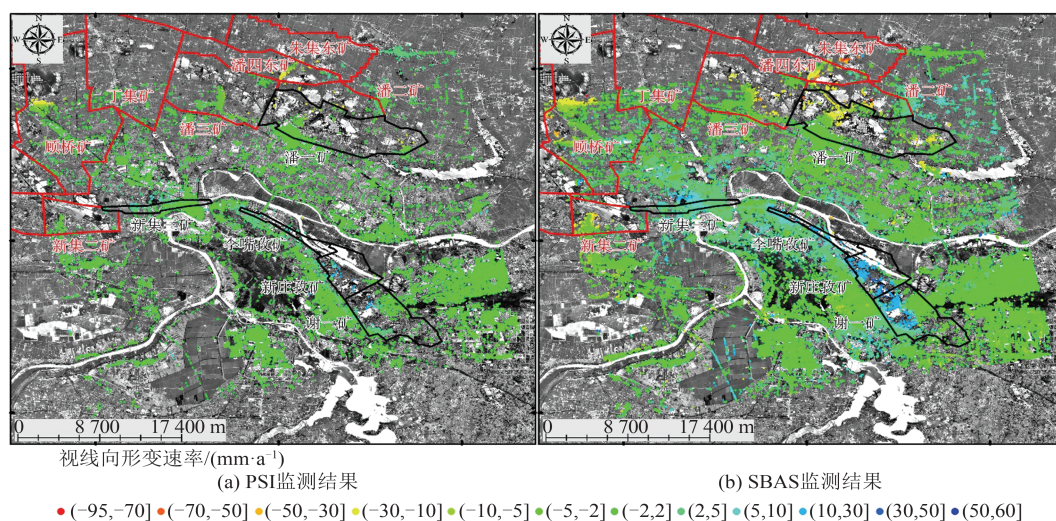


图4 PSI和SBAS技术获取的淮南矿区关闭矿井地表沉陷

Fig. 4 Surface Subsidence of Closed Mines in Huainan Mining Area Obtained by PSI and SBAS Technologies

由PSI监测结果可知,PSI技术共探测到4个形变区域,其中2处下沉区域分别位于顾桥矿和潘四东矿,2处上升区域分别位于新集三矿和李嘴孜-新庄孜-谢一矿,其中李嘴孜-新庄孜-谢一矿上升区有连成一片的趋势。由于PSI选取的高相干点数量少、密度低,获取的4个形变区域并不完整,且由于存在大面积植被和水体区域,不能确定其形变情况。PSI获取的地表最大下沉速率为 -38.9 mm/a ,位于开采矿井朱集东矿;最大上升速率为 25.5 mm/a ,位于关闭矿井新庄孜矿。相比于PSI监测结果,由于相干点数量和密度的提高,SBAS监测结果探测到5个形变区域,其中3个下沉区域分别位于顾桥矿、新集二矿和潘一矿-潘二矿-潘三矿-潘四东-朱集东矿;2个上升区域与PSI技术监测结果空间位置一致。SBAS获取的最大下沉速率为 -95.0 mm/a ,位于开采矿井顾桥矿;最大上升速率为 51.1 mm/a ,位于关闭矿井新庄孜矿的中部。由于SBAS技术相干点数量的提

高,在构建解缠三角网时,提高了构网密度,增加了有效边数,使得利用三维相位解缠算法获取的解缠相位更加稳定,在一定程度上提高了SBAS技术的监测能力,且SBAS技术获取的形变区域更加完整,形变的空间分布情况更加清晰。

由PSI和SBAS监测结果和矿井关闭时间可知,因潘一矿于2018-09关闭,时间相对较晚,因此在Sentinel-1A数据监测期间潘一矿地表受残余形变影响仍表现为下沉,未出现上升,而新集三矿(2016-11)、李嘴孜矿(2016-12)、新庄孜矿(2017-12)和谢一矿(2016-12)关闭时间较早,4个矿井关闭后地表均出现较明显上升,且地表上升范围沿李嘴孜-新庄孜-谢一矿呈带状分布。而其他未关闭的矿井(如顾桥矿、朱集东矿、潘二矿、潘四东矿等)由于开采的影响,地表均表现为不同程度的下沉。

为了评估监测结果的可靠性,以PSI所选相干点为参考,在SBAS监测结果中选取相应的同

名点,共选取同名点 35 751 个,相应的 PSI 和 SBAS 同名点对形变速率对比结果如图 5(a)所示。由图 5(a)可知,PSI 和 SBAS 同名点对的形变速率整体偏差较小,多集中于 0 附近,但两种方法监测结果的相关性较低,为 0.74,分析原因为二者相干点数量不同,导致相位解缠和误差相位估计存在差异,从而使监测结果相关性较低。由统计分析(图 5(b))可知,两种方法同名点对的形变速率之差的均值为 1.05 mm/a,标准偏差为

1.59 mm/a,表明 PSI 和 SBAS 监测结果一致性较高,监测结果在一定程度上是可靠的。

因 SBAS 监测结果所选相干点数量多,获取的形变区域更加完整,且与 PSI 监测结果一致性较高,因此,在分析淮南矿区关闭矿井地表沉陷规律时,以 SBAS 技术获取的淮南矿区关闭矿井地表沉陷数据为基础,结合矿区地质采矿资料,通过时序形变对矿井关闭后地表次生沉陷规律进行研究。

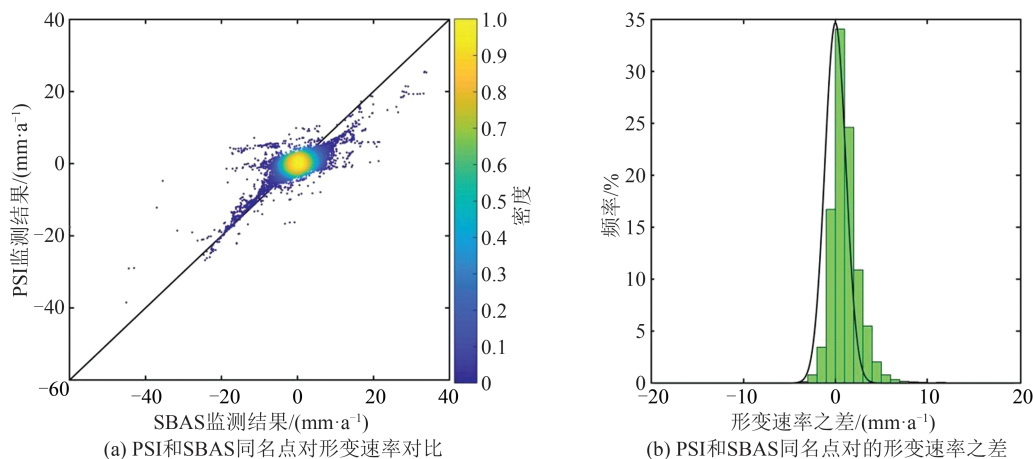


图 5 PSI 和 SBAS 监测结果同名点对比分析

Fig. 5 Comparative Analysis of Homonymous Points of PSI and SBAS Monitoring Results

图 6 为李嘴孜矿所选 5 个点的时序形变(W 代表下沉,S 代表稳定,U 代表上升)。在李嘴孜矿关闭后(2016-12)地表仍表现为下沉,但下沉持续时间较短(约 6 个月)、量级较小,P3 下沉最大,为 -17.5 mm。至 2017-06,5 个点的地表时序下沉放缓或停止,地表处于相对稳定阶段,除了 P5 相对稳定阶段持续时间相对较短(约 2 a)外,其余 4 点地表相对稳定阶段持续时间较长,其中 P3 持续时间约 3 a。至 2019-06,P5 地表开始上升,随后其余 4 点地表相继上升,但上升开始时间存在略微差异,先后关系为 $P5 > P1 > P2 \approx P4 > P3$,结合李嘴孜矿所选 5 个点的位置关系可知,矿井关闭后,地下水位恢复方向可能为由东南-西北两端向矿区中部回升。同时由图 6 可知,在上升阶段,地表随时间变化近似线性上升,且矿区两端地表上升量级较大,中部上升量级较小,P5 上升最大约 77 mm。

图 7 为新庄孜矿所选 5 个点的时序形变。新庄孜矿关闭后(2017-12)地表次生沉陷规律与李嘴孜矿相似,但新庄孜矿关闭后地表并未出现下沉,在闭井之前地表下沉已逐渐放缓,且 P9、P10 并不存在稳定期,与李嘴孜矿相比,新庄孜矿相对稳定期持续时间较短,持续时间约为 1.5 a。在

矿井关闭的同时(2017-12),P9、P10 开始缓慢上升,之后新庄孜矿地表相继开始上升,地表上升开始时间先后关系为 $P10 \approx P9 > P8 \approx P7 \approx P6$,结合所选点位置关系可知,新庄孜矿关闭后地下水恢复方向可能为由东南向西北回升。且由图 7 可知,在上升阶段,地表随时间变化呈近似线性或指数函数形式上升,矿区东南部上升量级大于西北部,P9 上升最大约为 168 mm。

图 8 为谢一矿所选 5 个点的时序形变,谢一矿关闭后(2016-12)地表次生沉陷规律与其他两矿(图 6、图 7)相似,但谢一矿关闭后地表下沉量级大,P12 下沉最大约为 -157 mm。因关闭矿井地表沉陷作为开采沉陷的延续,矿井关闭后地表下沉持续时间和量级不仅与矿井关闭时间、地下水回升时间等有关,还与工作面停采时间、开采方法、采深和采厚等有关^[5]。且除 P15 外,其余点时序形变并没有明显的相对稳定阶段,P15 相对稳定期持续时间约为 2.5 a,同时 P14 上升形式与其他点差异明显。在 2017-11 以后,各点相继开始上升,地表上升开始时间先后关系为 $P12 > P11 \approx P14 > P13 > P15$,结合所选点位置关系可知,谢一矿关闭后整体上地下水恢复方向可能为由西北向东南回升。且在上升阶段,除 P14 地表

随时间变化呈近似对数函数形式上升,其余各点地表随时间变化呈近似线性或指数函数形式上

升,矿区西北部上升量级大于东南部,P11上升最大约为154 mm。

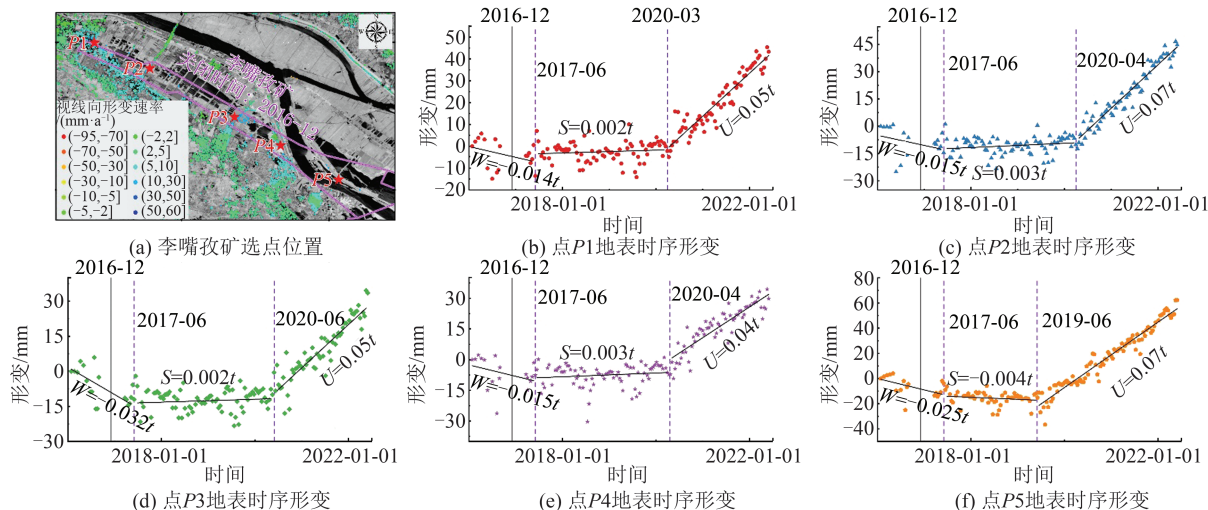


图6 李嘴孜矿关闭后地表时序形变

Fig. 6 Surface Time-Series Deformation After the Closure of Lizuizi Mine

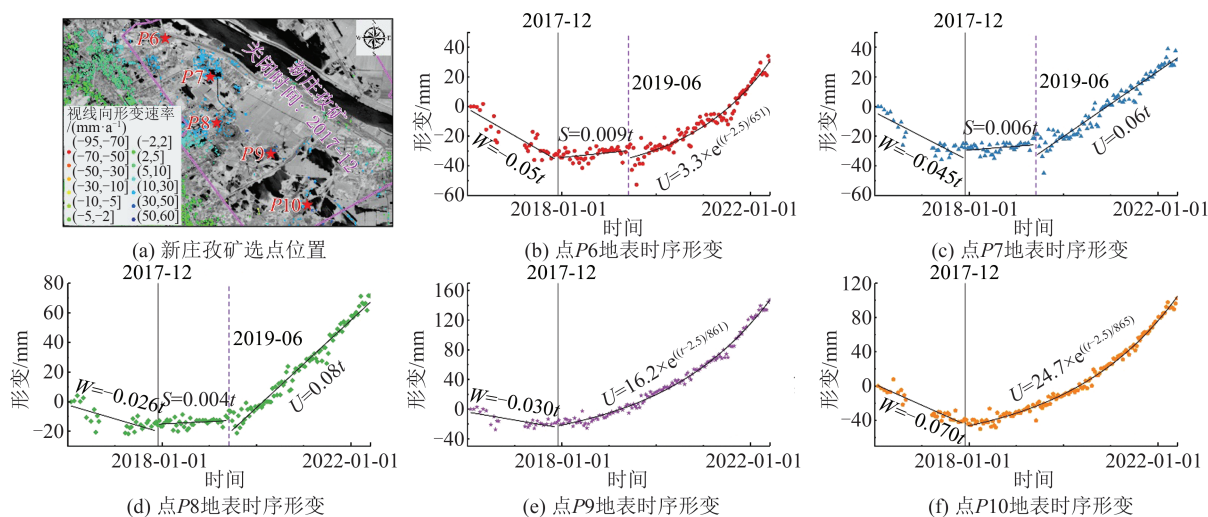


图7 新庄孜矿关闭后地表时序形变

Fig. 7 Surface Time-Series Deformation After the Closure of Xinzhuangzi Mine

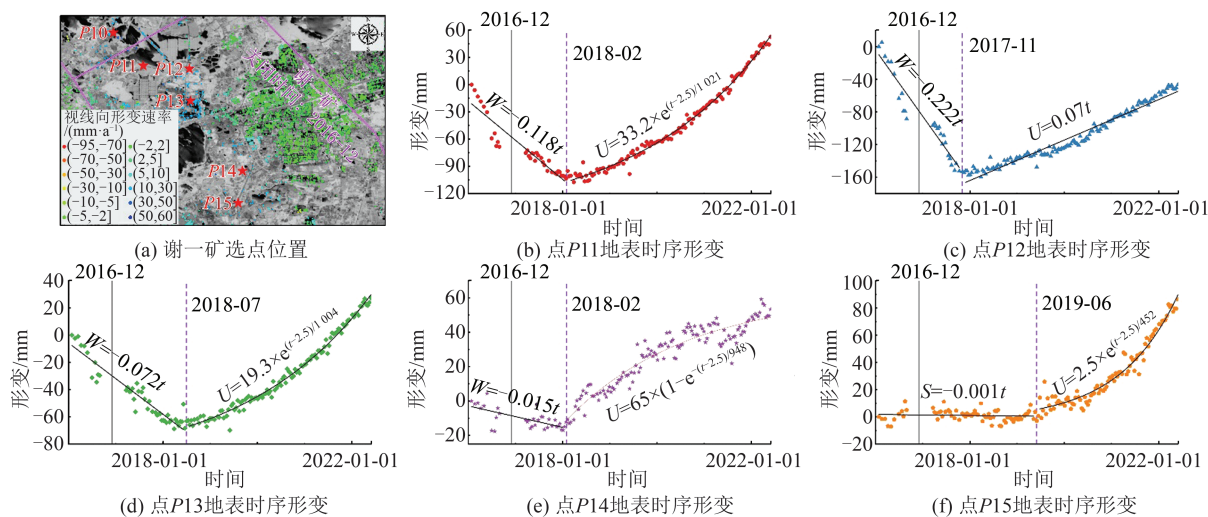


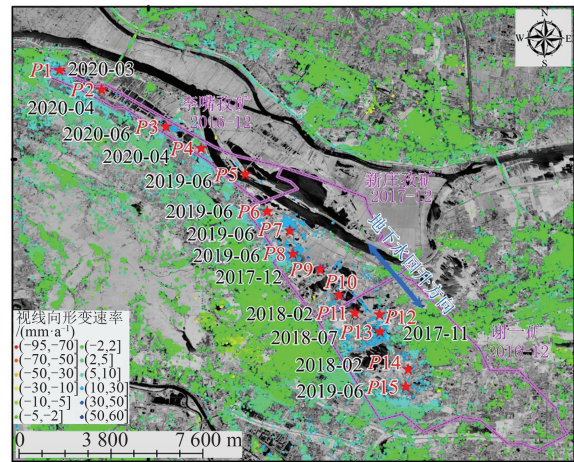
图8 谢一矿关闭后地表时序形变

Fig. 8 Surface Time-Series Deformation After the Closure of Xieyi Mine

结合 P1 至 P15 地表上升先后顺序及李嘴孜矿、新庄孜矿和谢一矿的位置关系可知(见图 9), 3 个矿区关闭后可能存在水力联系, 且地下水从新庄孜矿和谢一矿交界处开始回升, 后流向东南和西北两侧。

图 10 为新集三矿和潘一矿所选 4 个点时序形变。由图 10 可知, 新集三矿关闭后(2016-11)地表次生沉陷规律与其他 3 个矿区相似, 但沉陷区在矿区外围北侧, 分析原因为井田内开采煤层受区域推覆构造影响倾角陡($65^{\circ} \sim 90^{\circ}$), 倾向北, 属急倾斜煤层, 且局部存在倒转现象^[23-24], 因此造成新集三矿沉陷区向北偏移。并且新集三矿关闭后地表未出现下沉现象, 地表在经历约 2.5 a 的稳定期后, 于 2019-06 月开始上升, 在上升阶段, 地表随时间变化呈近似线性上升, 但上升量级明显偏小, P16 上升最大为 35 mm。而潘一矿关闭后(2018-09)地表(P18、P19)仍以下沉为主, 地表下沉符合采空区残余沉陷随时间的变化规律, 地表并未出现稳定期和上升期。分析原因可能为

矿井关闭时间晚, 导致地下水回升晚或因周围矿井正在开采需保证其他矿井安全生产而继续排水, 从而使地表未出现上升。



注: 黑色代表地表上升时间; 紫色代表矿井关闭时间。

图 9 李嘴孜-新庄孜-谢一矿地表上升时间及地下水回升方向

Fig. 9 Surface Uplift Time and Groundwater Rising Direction of Lizuzi-Xinzhuanzi-Xieyi Mines

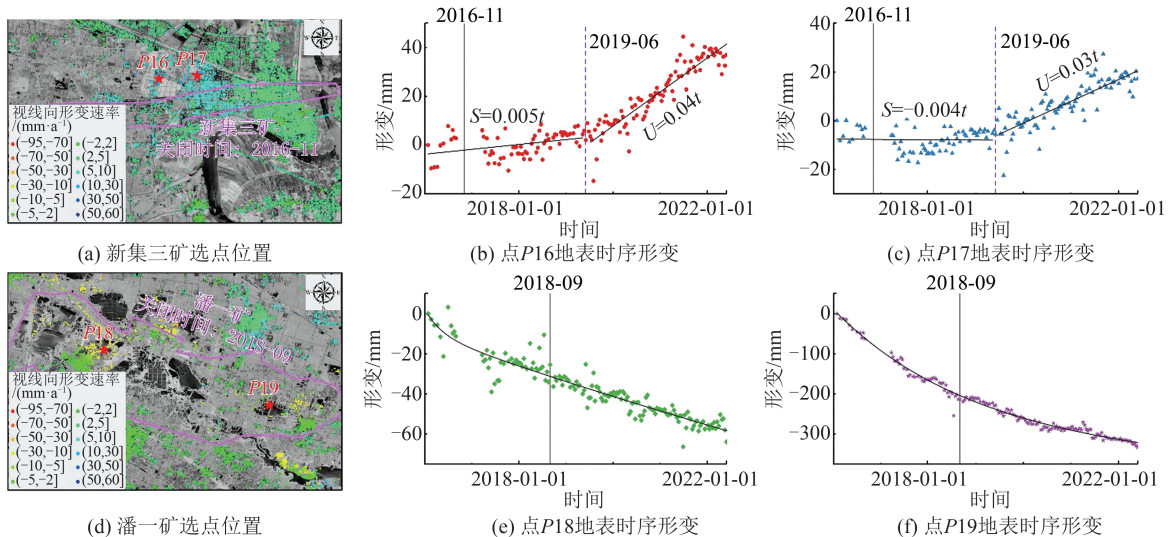


图 10 新集三矿和潘一矿关闭后地表时序形变

Fig. 10 Surface Time-Series Deformation After the Closure of Xinjisan and Panyi Mines

通过对李嘴孜矿、新庄孜矿、谢一矿、新集三矿和潘一矿关闭后地表时序形变分析可知, 除潘一矿因关闭时间晚导致在 Sentinel-1A 数据监测期间地表持续下沉外, 其余 4 个矿区关闭后地表沉陷规律总体上较相似, 可归纳为下沉阶段—中间稳定阶段—上升阶段, 与文献[5, 16, 18]归纳的徐州矿区关闭矿井地表沉陷规律一致(①初期稳定阶段; ②下沉阶段; ③中间稳定阶段; ④上升阶段; ⑤最终稳定阶段)。然而, 由于淮南矿区关闭矿井正处于变形阶段, 未能监测到最终稳定

阶段。且通过对淮南矿区关闭矿井时序形变分析(图 6~图 8 和图 10)可知, 由于不同区域水文地质采矿条件存在差异, 下沉阶段、中间稳定阶段和上升阶段并不一定随时间推移逐一出现。如新庄孜矿关闭后, P6、P7 和 P8 未出现下沉, P9 和 P10 则直接表现为上升。

4 讨论

为了完善关闭矿井地表沉陷规律, 对淮南和

徐州矿区关闭矿井地表沉陷进行对比分析。由淮南矿区5个关闭矿井地表时序形变拟合分析(图6~图8和图10)可知,淮南矿区关闭矿井地表下沉以线性为主,而地表上升则以线性和指数函数为主,具体可归纳为:

$$W = -a_w t + b_w \quad (2)$$

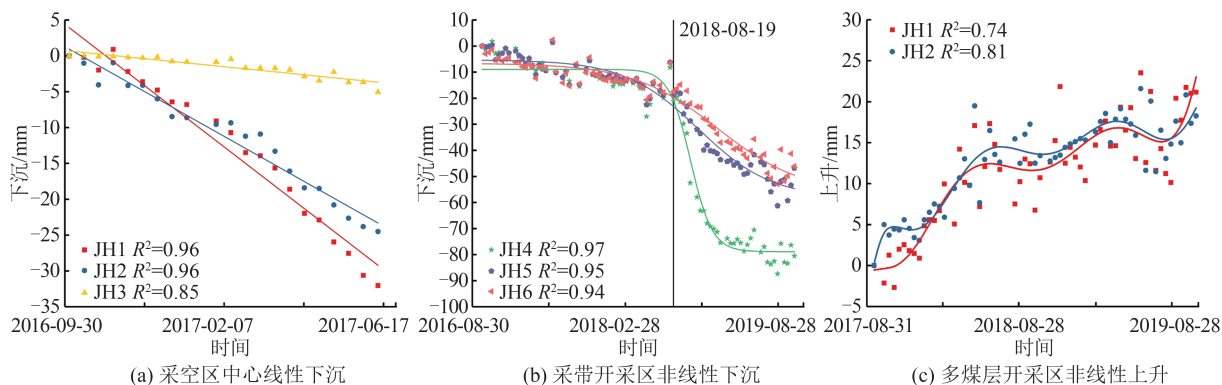
$$U = \begin{cases} a_u t + b_u \\ a_u \times e^{\frac{t-b_u}{c_u}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, W 代表地表下沉,单位为mm; U 代表地表上升,单位为mm; t 代表时间,单位为d; a_w 、 b_w 、 a_u 、 b_u 、 c_u 代表与水文地质采矿条件相关的系数。

由文献[5,16]可知,徐州矿区长壁垮落法采空区中心地表下沉以线性为主,而长壁垮落法采空区边缘及柱式开采采空区地表下沉可能随时间呈现非线性变化(如图11(a)和图11(b)所示)。因未能收集到淮南矿区采掘工程平面图,因此无法分析淮南矿区关闭后地表下沉与工作面开采之间的关系。但从InSAR监测结果(图6~图8和图10)可知,淮南矿区关闭后地表下沉以线性变化为主,淮南和徐州矿区关闭后地表下沉变化规律较相似。

由图11(c)可知,徐州矿区关闭后地表上升随时间变化以对数函数形式为主,且由于多煤层

开采下煤层上升和上煤层下沉叠加作用,使得地表上升存在速率放缓或下沉现象。虽未能获取淮南矿区工作面开采信息,但从InSAR监测结果(图6~8和图10)可知,淮南矿区关闭矿井地表上升以线性和指数函数为主(式(3)),且在地表上升期间未出现明显的速率放缓或下沉现象,徐州和淮南矿区上升阶段变化规律存在差异,分析原因可能与煤层间距和老采空区积水有关,因徐州矿区煤层间距大(夹河矿2煤、7煤平均层间距108 m),当地下水开始影响下煤层时,下煤层下沉,此时对上煤层没有影响,而当地下水上升到一定高度后,引起下煤层采动破裂岩体回弹上升,当地下水影响到上煤层时,上煤层下沉,从而出现上升减缓或下沉现象,而淮南矿区煤层间距相对较小,如新集三矿13-1煤与14煤平均层间距仅10 m,潘一矿13-1煤与11-2煤平均层间距为66.7 m,导致下煤层导水裂缝带进入上煤层,使两煤层采空区合二为一;同时,由于煤层间距小或不存在层间距,地下水同时作用于上、下煤层,因此不会出现上煤层下沉和下煤层上升叠加现象,且在矿井关闭前,部分老采空区可能存在积水现象,因此在矿井关闭后,即便受地下水作用也不会出现压实下沉,从而使得多煤层开采关闭后地表上升阶段不出现下沉现象。



注:JH1~JH6为文献[5]中的徐州矿区夹河矿点位。

图11 徐州矿区夹河矿关闭后地表次生沉陷分析^[5]

Fig. 11 Analysis of Surface Secondary Subsidence After the Closure of Jiahe Mine in Xuzhou Mining Area^[5]

5 结 语

基于160景Sentinel-1A数据和PSI/SBAS技术分别获取了2016-01-14—2022-05-30淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷数据,分为5个形变区域,其中3个下沉区域为顾桥矿、新集二矿和潘一矿-潘二矿-潘三矿-潘四东-朱集东矿,最大下沉速率为-95.0 mm/a,位于开采矿井顾桥矿上方;2个

上升区域为新集三矿和李嘴孜-新庄孜-谢一矿,最大上升速率为51.1 mm/a,位于关闭矿井新庄孜矿的中部。通过同名点统计分析可知两种监测结果的相关性为0.74,同名点对的形变速率之差的均值为1.05 mm/a,标准偏差为1.59 mm/a,证明了PSI和SBAS监测结果的可靠性。

通过分析淮南矿区关闭矿井地表沉陷可知,淮南矿区关闭后,地表沉陷规律可归纳为下沉阶

段—中间稳定阶段—上升阶段,与徐州矿区关闭矿井地表沉陷规律一致(初期稳定阶段—下沉阶段—中间稳定阶段—上升阶段—最终稳定阶段)。但因不同区域水文地质采矿条件存在差异,下沉阶段、中间稳定阶段和上升阶段并不一定随时间推移逐一出现。且由地表上升先后顺序及李嘴孜矿、新庄孜矿和谢一矿的位置关系可知,3矿之间可能存在水力联系,地下水先从新庄孜矿和谢一矿交界处开始回升,后流向东南和西北两侧。

通过对淮南矿区关闭矿井地表时序形变的拟合分析可知,淮南矿区关闭矿井地表下沉以线性为主,而地表上升则以线性和指数函数为主。与徐州矿区关闭矿井地表沉陷规律的对比表明,徐州和淮南矿区关闭后地表下沉变化较相似,但上升阶段变化规律存在差异,淮南矿区关闭后地表上升期间未出现速率放缓或下沉现象,可能与煤层间距和采空区积水有关。

参 考 文 献

- [1] China National Coal Association. Guiding Opinions on High Quality Development of Coal Industry During the "Fourteenth Five Year Plan"[C]//Conference of Guiding Opinions on High Quality Development of Coal Industry During the "Fourteenth Five Year Plan", Beijing, China, 2021. (中国煤炭工业协会. 煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见[C]//煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见研讨会, 中国北京, 2021.)
- [2] Yuan Liang, Yang Ke. Further Discussion on the Scientific Problems and Countermeasures in the Utilization of Abandoned Mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 16-24. (袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 16-24.)
- [3] Hu Bingnan, Yan Bingshuang. Study on Potential Geological Disasters and Prevention Technology and Resources Utility of Abandon Mine[J]. *Coal Mining Technology*, 2018, 23(3): 1-5. (胡炳南, 颜丙双. 废弃矿井潜在地质灾害、防控技术及资源利用途径研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(3): 1-5.)
- [4] Hu Weiyue, Zhou Jianjun, Yan Lanying. Study on Environment and Safety Disasters from Abandoned Coal Mines[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(4): 436-440. (虎维岳, 周建军, 闫兰英. 废弃矿井水位回弹诱致环境与安全灾害分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(4): 436-440.)
- [5] Deng Kazhong, Zheng Meinan, Zhang Hongzhen, et al. Research Status and Prospect of Secondary Subsidence in Closed Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 10-20. (邓喀中, 郑美楠, 张宏贞, 等. 关闭矿井次生沉陷研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 10-20.)
- [6] Geng Yijia, Peng Shuchuan, Wang Xiaohui, et al. Comprehensive Evaluation of Eco-environment in Huainan Coal Mining Area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(17): 73-76. (耿宜佳, 彭书传, 王晓辉, 等. 淮南煤矿区生态环境综合评价[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 73-76.)
- [7] Zheng Younan, Peng Shuchuan, Wang Xiaohui. Stability Evaluation of Ecosystem in Mining Area: Taking Huainan Mining Area as an Example[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(23): 6113-6117. (郑优男, 彭书传, 王晓辉. 矿区生态系统稳定性评价: 以淮南煤矿区为例[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(23): 6113-6117.)
- [8] Xiao Yao, Zhao Ping, Fan Zelin, et al. Application of TerraSAR-X Data for Subsidence Monitoring in Huainan Mining Area[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 95-103. (肖瑶, 赵萍, 范泽琳, 等. TerraSAR-X数据在淮南矿区沉陷监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 95-103.)
- [9] Liu Zhaomin, Lei Shaogang, Jin Dan, et al. Construction of Comprehensive Risk Space Evaluation System for High Diving Level Coal Mining Area[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 41(1): 41-48. (刘兆敏, 雷少刚, 金丹, 等. 高潜水位煤矿区综合风险空间评价体系构建[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 41-48.)
- [10] Zhao Feng, Zhang Leixin, Wang Teng, et al. Polarimetric Persistent Scatterer Interferometry for Urban Ground Deformation Monitoring with Sentinel-1 Dual Polarimetric Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1507-1514. (赵峰, 张雷昕, 王腾, 等. 城市地表形变的双极化Sentinel-1数据极化时序InSAR技术监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1507-1514.)
- [11] Li Da, Deng Kazhong, Gao Xiaoxiong, et al. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1531-1537. (李达, 邓喀中, 高晓雄, 等. 基于SBAS-InSAR的矿区地表沉降监测与分析[J].

- 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1531-1537.)
- [12] Guéguen Y, Deffontaines 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.
- [13] Samsonov S, Oreye N, Smets B. Ground Deformation Associated with Post-Mining Activity at the French-German Border Revealed by Novel InSAR Time Series Method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 142-154.
- [14] Cuenca M C, Hooper A J, Hanssen R F. Surface Deformation Induced by Water Influx in the Abandoned Coal Mines in Limburg, the Netherlands Observed by Satellite Radar Interferometry [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 88: 1-11.
- [15] André V. Various Phases in Surface Movements Linked to Deep Coal Longwall Mining: From Start-Up till the Period After Closure [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(3): 412-426.
- [16] Zheng Meinan. Study on the Mechanism, Law and Prediction Model of Surface Subsidence in Closed Mine Based on InSAR [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (郑美楠. 基于InSAR的关闭矿井地表沉陷机理、规律及预测模型研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.)
- [17] Zheng M N, Deng K Z, Fan H D, et al. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Mining Area Based on InSAR and GRACE [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1392.
- [18] Zheng Meinan, Deng Kazhong, Zhang Hongzhen, et al. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Closed Mine Based on InSAR [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(2): 403-410. (郑美楠, 邓喀中, 张宏贞, 等. 基于InSAR的关闭矿井地表形变监测与分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 403-410.)
- [19] Yu Hao, Chen Bingqian, Kang Jianrong, et al. Research on Surface Deformation Law of Closed Mines Based on SBAS-InSAR [J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(2): 45-51. (余昊, 陈炳乾, 康建荣, 等. 基于SBAS-InSAR的关闭矿井地表形变规律研究 [J]. 工矿自动化, 2021, 47(2): 45-51.)
- [20] Yu Z G, Huang G M, Zhang C X. Monitoring and Characterization of Surface Deformation After the Closure of Coal Mines Based on Small Baseline Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. *Instrumentation Measure Metrologie*, 2020, 19(2): 141-150.
- [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, Zebker H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2007, 24(9): 2737-2747.
- [23] Sun Xuexing. Practice and Application of Deep Horizontal Geological Reconnaissance in Steep Coal Mine in Xinji No. 3 Mine [J]. *Technology Innovation and Application*, 2014(32): 137-138. (孙学兴. 急倾斜煤矿深部水平地质补勘在新集三矿的实践与应用 [J]. 科技创新与应用, 2014(32): 137-138.)
- [24] Zhao Qiquan. Study on Hydrogeology Condition on Steep Seam Under Tertiary in Xinji No. 3 Coal Mine [J]. *Coal Technology*, 2005, 24(12): 83-85. (赵启全. 新集三矿急倾斜煤层上覆第三系水文地质条件研究 [J]. 煤炭技术, 2005, 24(12): 83-85.)