

Ground Subsidence Detection of Beiquan Mining Area Based on Stacking Time-Series InSAR

Yonglian Sha¹, Guoxiang Liu^{1,2*}, Xiaowen Wang^{1,2}, Rui Zhang^{1,2}, Bo Zhang¹, Shirao Li¹

¹Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Railway Safety, Chengdu Sichuan

Email: *rsgxliu@swjtu.edu.cn, syl973281310@163.com

Received: Mar. 26th, 2020; accepted: Apr. 1st, 2020; published: Apr. 8th, 2020

Abstract

Mining subsidence monitoring provides supporting information for safety production. Based on the Stacking time-series InSAR technology, using 73 scenes Sentinel-1A data that cover the Beiquan 1 and Beiquan 2 mines site in Hami, Xinjiang, the surface subsidence of the study area from March 16, 2017 to October 8, 2019 was monitored, and we acquired time-series ground subsidence information. The results show that there are three subsidence funnels within the mining area, the maximum annual subsidence rate is -154 mm/a, and the subsidence of the mining area is affected by climate such as the freezing period, which has a certain seasonal pattern.

Keywords

Stacking, Beiquan 1 Mine, Beiquan 2 Mine, Mining Subsidence

基于Stacking时序InSAR的北泉矿区沉陷监测

沙永莲¹, 刘国祥^{1,2*}, 王晓文^{1,2}, 张瑞^{1,2}, 张波¹, 李诗娆¹

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都

²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, 四川 成都

Email: *rsgxliu@swjtu.edu.cn, syl973281310@163.com

收稿日期: 2020年3月26日; 录用日期: 2020年4月1日; 发布日期: 2020年4月8日

*通讯作者。

文章引用: 沙永莲, 刘国祥, 王晓文, 张瑞, 张波, 李诗娆. 基于 Stacking 时序 InSAR 的北泉矿区沉陷监测[J]. 测绘科学技术, 2020, 8(2): 60-67. DOI: 10.12677/gst.2020.82008

摘要

矿区沉陷监测为其安全生产提供支撑信息。基于Stacking时序InSAR技术,利用73景覆盖新疆哈密北泉1矿和北泉2矿的Sentinel-1A数据,对该区域在2017年3月16日至2019年10月8日期间的地表沉陷进行监测,获取研究区时间序列地表沉陷信息。结果表明,矿区范围内存在三个沉陷漏斗,最大年均沉陷速率达-154 mm/a,并且矿区沉陷受到冰冻期等气候影响,具有一定的季节性规律。

关键词

Stacking, 北泉1矿, 北泉2矿, 矿区沉陷

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭是我国重要的能源矿产,然而,煤炭资源的开采破坏了上覆岩层的原始应力平衡状态,使岩层和地表发生形变,从而引起各类地质环境问题和灾害,影响矿区安全生产及周边构筑物安全[1][2]。由此,对煤矿开采造成的地表沉陷进行监测是十分必要的。然而,传统的监测手段如水准测量和GPS测量成本高、监测范围小、工作量大,且以个别离散点的形式不利于反映矿区整体的沉陷状况,从而阻碍了矿区开采沉陷情况的全面监测及相关理论研究[3][4]。

时序InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)方法作为InSAR技术的拓展,克服了常规DInSAR时空失相干和大气效应的影响,不仅拥有全天候、监测范围广、精度较高等优势,且实现了长时间序列地表形变监测,有利于矿区获取整体高精度的时间序列形变信息[5][6]。其中,干涉图堆叠(Stacking)[7]时序InSAR方法基于多主影像,控制了时空基线,利用多个差分干涉图,有效解决了时空基线过长引起的失相干问题且降低了大气扰动给差分干涉相位质量带来的影响,提高了监测精度,具有能够时序性监测大量级形变的优势,有助于矿区沉陷监测。

北泉1矿和北泉2矿是位于新疆哈密的国家重点煤矿,至今仍在开采中,长期开采导致该地区地表原有应力被破坏,出现地表沉陷。本文采用2017年3月16日至2019年10月8日共73景Sentinel-1A升轨影像,基于Stacking时序InSAR方法对该地区进行沉陷监测,提取矿区开采沉陷形变场,研究沉陷变化规律,旨在为矿区预警防灾提供科学可靠的数据支撑。

2. Stacking 时序 InSAR 基本原理

Stacking 数据处理主要基于DInSAR完成,在生成差分干涉图后,经解缠将相位加权叠加,最后获取地表形变速率结果[8][9],具体流程如图1所示。

首先,假设每幅SAR影像的大气相位稳定且随机分布,其相位贡献值也随机分布,通过时间间隔对各差分干涉图相位加权[10][11]:

$$w_i = \Delta T_i^2 \quad (1)$$

其中, ΔT_i 为第 i 幅干涉图成像时间间隔。将所有差分干涉图叠加后,点的平均相位变化速率如下式:

$$PR = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot ph_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2)$$

其中, ph_i 为第 i 幅干涉图解缠相位。

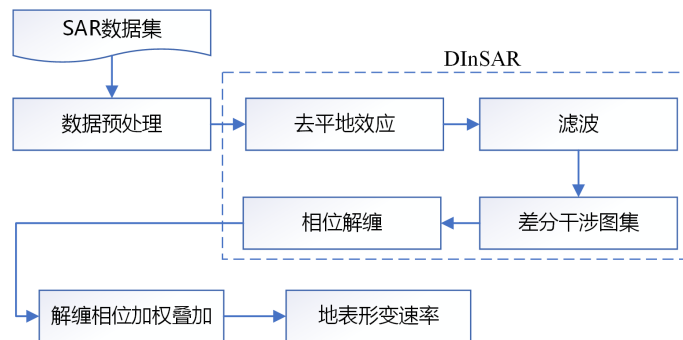


Figure 1. Flow chart of Stacking time-series InSAR technology
图 1. Stacking 时序 InSAR 技术流程图

在估计相位变化速率时也可以估计干涉图的相位变化标准差, 其与成像之间的时间间隔成反比, 干涉图叠加后, 相位变化速率的标准差表示为[12] [13]:

$$\text{std}(V) = \text{SQRT} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i^2 (ph_i / \Delta T_i - PR)^2 / \sum_{i=1}^N w_i^2 \right) \quad (3)$$

式中, V 为 N 幅差分干涉图叠加后的相位变化速率。

Stacking 方法是对一系列解缠的差分干涉图进行相位叠加, 从而获取平均形变速率, 能够提取大量级形变, 在该方法中, 叠加后的形变相位是累加的, 而大气误差相位却与干涉图数量呈二次方根倍增长, 由此提升了信噪比, 并减弱大气延迟误差的影响以保证监测精度[14] [15]。

3. 研究区域概况及数据源

北泉 1 矿和北泉 2 矿位于新疆哈密市三道岭矿区东部, 二者紧邻, 如图 2 所示, 其中, 北泉 1 矿中心地理坐标为东经 $92^{\circ}40'51''$, 北纬 $43^{\circ}07'48''$, 东西长约 2.10 km, 南北宽约 2.50 km, 面积约 4.55 km^2 , 核定产能 1.44 Mt/a; 北泉 2 矿中心地理坐标为东经 $92^{\circ}44'25''$, 北纬 $43^{\circ}09'15''$, 东西长 8.54~11.87 km, 南北宽 0.97~4.09 km, 面积约 37.02 km^2 , 设计产能 4.00 Mt/a。

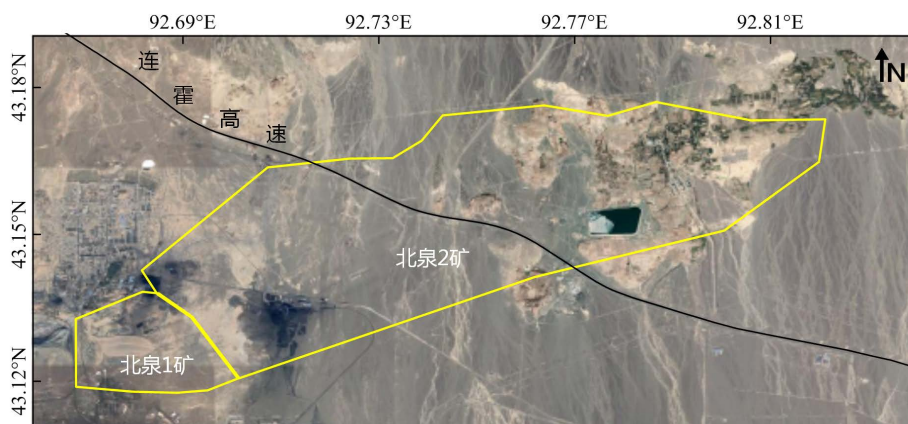


Figure 2. Study area image
图 2. 研究区域影像图

本文采用 2017 年 3 月 16 日至 2019 年 10 月 8 日共 73 景 Sentinel-1A 升轨影像, 利用 Stacking 时序 InSAR 方法对北泉 1 矿和北泉 2 矿进行沉陷监测。Sentinel-1A 数据为 C 波段, 时空基线短, 实验共组成 72 个干涉对, 时间基线最长 36 天, 空间垂直基线最长约 142.50 m, 所用数据距离向分辨率约为 2.33 m, 方位向分辨率约为 13.95 m。

4. 监测结果及分析

4.1. 矿区沉陷结果

利用 Stacking 时序 InSAR 方法所得结果是基于卫星视线方向(Light of sight, LOS), 而煤矿沉陷主要表现在垂直向, 为直观地体现矿区沉陷状况, 根据雷达波入射角将 LOS 向形变转换至垂直向。所得 2017 年 3 月 16 日至 2019 年 10 月 8 日期间北泉 1 矿及北泉 2 矿年均沉陷速率结果如图 3 所示, 在该区域主要呈现 3 个沉陷漏斗, 年均沉陷速率达 $-154\sim-57$ mm/a, 沉陷空间分布较集中, 为便于描述此处称为 A, B, C 沉陷区, 其中 A 沉陷区位于北泉 1 矿开采范围, B、C 沉陷位于北泉 2 矿开采范围。

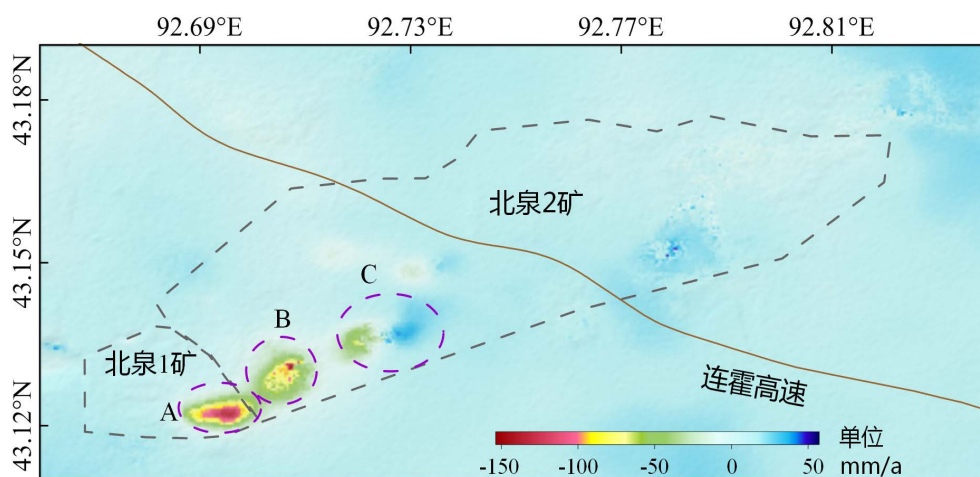


Figure 3. Annual average subsidence rate of Beiquan 1 and Beiquan 2 mines
图 3. 北泉 1 矿及北泉 2 矿年均沉陷速率结果图

穿过各个沉陷区作剖面线, 如图 4(f)所示, 沿剖面线沉陷变化如图 4(a)~(e)所示。沿剖面线 A1A2、a1a2 沉陷趋势为倒“金字塔”状, 年均沉陷速率最大约 -150 mm/a; 沿剖面线 B1B2、b1b2 沉陷从边缘至中心逐渐增加, 沉陷速率最大约 -110 mm/a, 在沉陷中心趋于稳定, 呈“盆”状; 沿剖面线 c1c2 沉陷速率最大约 -70 mm/a。

对比研究区 Sentinel-2 光学影像, 如图 5 所示, 发现 A 区域位于北泉 1 矿工业场地东南侧约 1.00 km 处, 该区域东西长约 1.30 km, 南北宽约 1.00 km, 沉陷面积约 1.30 km²; B、C 沉陷区紧邻北泉 2 矿工业场地, 分布在其东西两侧, 其中, B 区域东西长约 1.10 km, 南北宽约 1.10 km, 沉陷面积约 1.21 km²; C 区域东西长约 1.50 km, 南北宽约 1.30 km, 沉陷面积约 1.95 km², 各沉陷区面积较大且与地面构筑物十分接近, 可能存在安全隐患。

为进一步揭示北泉 1 矿及北泉 2 矿开采引起的地面沉陷过程, 获取 2017 年 3 月 16 日至 2019 年 10 月 8 日期间每隔一月时 12 天间隔下的沉陷量, 12 天间隔相对整个监测周期可以看作是某一“时刻”, 因此, 这里用于直观体现不同“时刻”下矿区的开采程度。在沉陷区选择多个特征点(A1~C2), 其空间分布如图 6(d)所示, 获取这些特征点上每月的沉陷变化, 并作进一步分析。

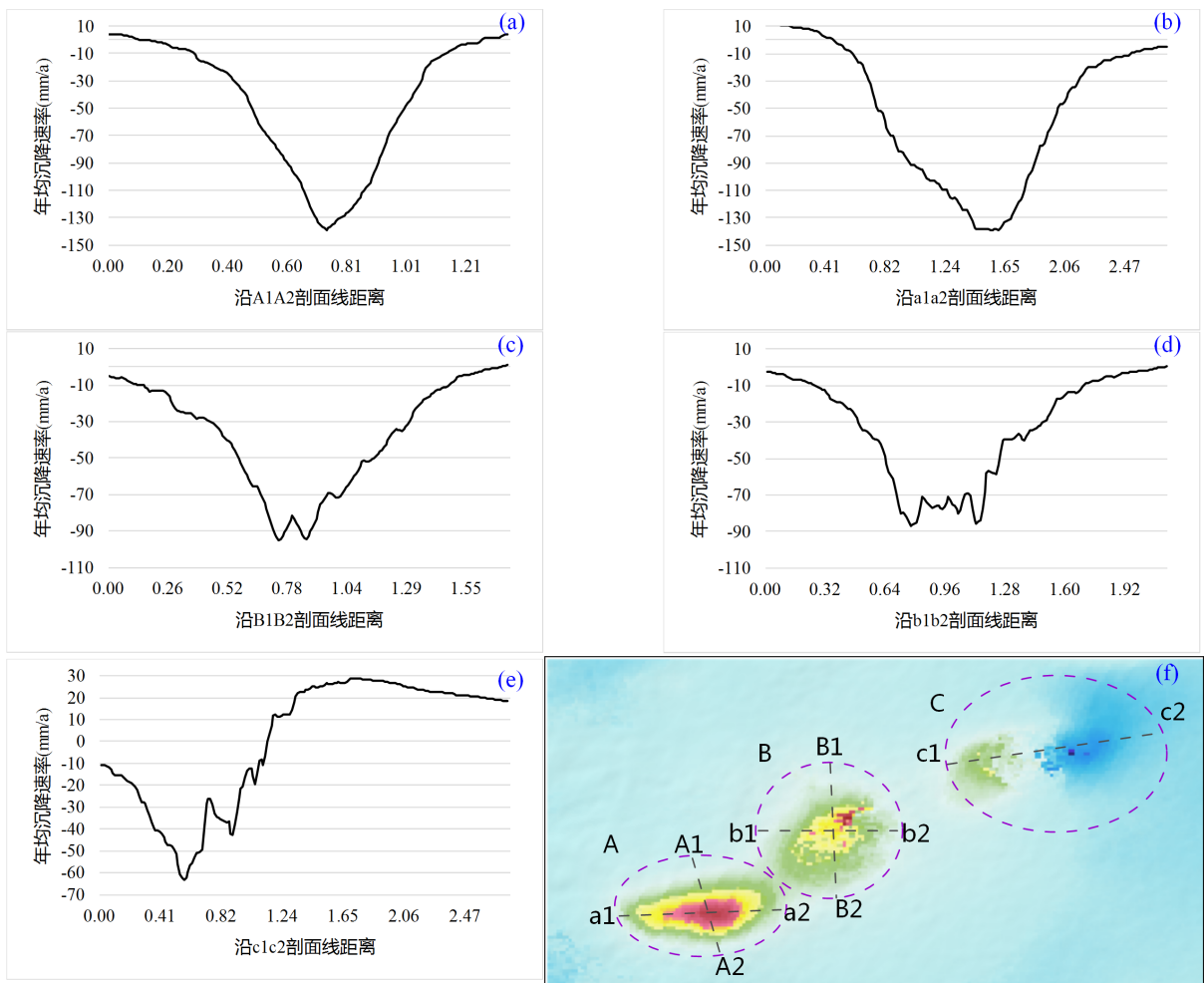


Figure 4. Map of subsidence of Beiquan 1 and Beiquan 2 mines along the section line

图 4. 北泉 1 矿及北泉 2 矿沿剖面线沉陷状况图

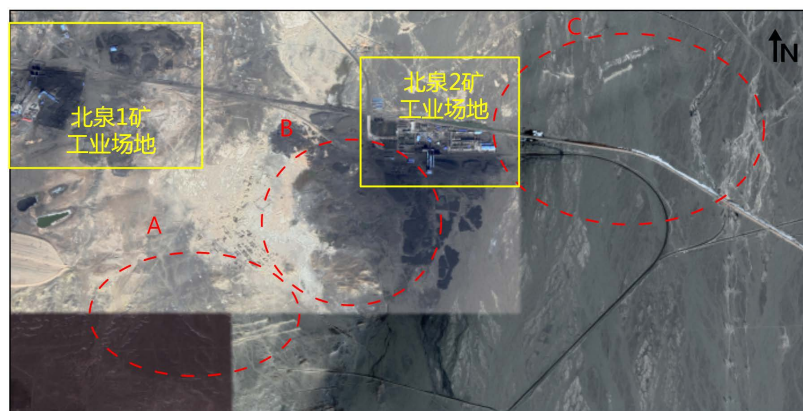


Figure 5. Study area optical map

图 5. 研究区域光学图

如图 6(a)~(c)所示为各特征点上每月间隔 12 天的沉陷变化情况，发现北泉 1 矿 A 区域和北泉 2 矿 B 区域从 2018 年起开采程度逐年加深，C 区域开采力度一直较弱，地表沉陷也相对较小；观察数据变化发

现各个矿区每年 11 月至次年 3 月期间地表沉陷小, 开采力度弱, 并且 3 月至 5 月地表基本无沉陷现象, 甚至呈回升状态, 然而, 5 月后沉陷迅速增加, 但是在每年 8 月份左右地表沉陷又会有较大幅度回升。根据气象等资料了解到, 该地区每年 11 月至次年 3 月为冰冻期, 年最低平均气温达 -23°C , 可能是在该环境条件影响下, 限制了矿区开采力度; 3 月起温度回升, 冰冻消融, 从矿区地质资料可知[16], 该区域主采的 4 号煤层顶底板属抗压强度差, 抗拉、抗剪强度低且易软化的岩石, 此外, 煤层附近多为泥岩, 遇水具有一定的膨胀性, 这可能是致使矿区地表 3 至 5 月表现出基本无沉陷现象, 甚至呈回升状态的原因; 5 月后沉陷迅速增加, 因而 5 至 10 月份为主要采煤期; 根据水文地质调查资料可知, 该矿区位于戈壁滩中, 缺少天然地表水体, 唯一补给区为北部巴尔库山的融雪水潜流于地下, 每年夏季融雪水汇流而下, 根据 2009~2019 年气象资料可知, 该地区夏季降雨集中, 夏季平均降雨量达 26 mm, 易形成短时洪流, 加之该地区属裂隙含水层充水为主的水文地质条件, 往往能形成较强的含水带或导水带, 并能沟通各含水层间的水力联系, 因而, 冰雪融水和大气降水使得沉陷坑储水可能是 8 月份左右沉陷急速回升的原因; 因此, 该矿区沉陷在一定程度上受环境影响, 具有一定的季节性规律。

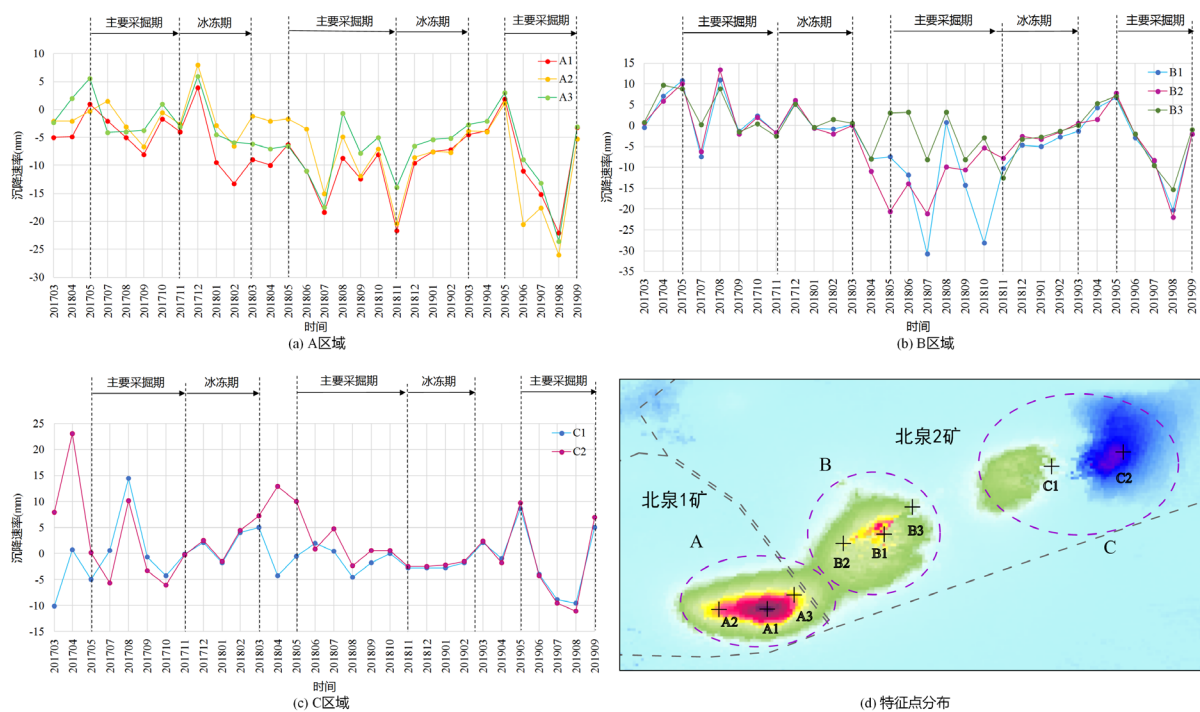


Figure 6. Time-series subsidence of characteristic points in each area

图 6. 各区域特征点时序沉陷变化图

获取北京 1 矿和北京 2 矿 2017 年 3 月 16 日至 2019 年 10 月 8 日期间累计沉陷分布, 如图 7 所示, 从空间分布来看, 沉陷漏斗随着时间增加范围有所扩大, 但在不同时间下地理位置未有较大的变动, 即煤矿开采固定于 A、B、C 区域。根据累计沉陷结果来看, 北京 1 矿开采集居于 A 区域, 2017 年至 2019 年期间, 沉陷范围逐步扩大至一定程度后不再有较大幅度的扩展, 沉陷量逐渐增加, 至 2019 年 10 月累计沉陷量约 400 mm; 北京 2 矿在 2017 年主采 C 区域, 2018 年后减弱了 C 区域开采力度, 发现自 2017 年 7 月起 C 区域东部出现抬升, 可能是由于排水能力差矿坑回填充水或煤矸石堆积物导致; 2018 年和 2019 年北京 2 矿主采 B 区域, B 区域自 2018 年 3 月后表现出较明显沉陷, 开采力度较大, 快速形成了较稳定的沉陷漏斗, 至 2019 年 10 月最大累计沉陷量约 400 mm。

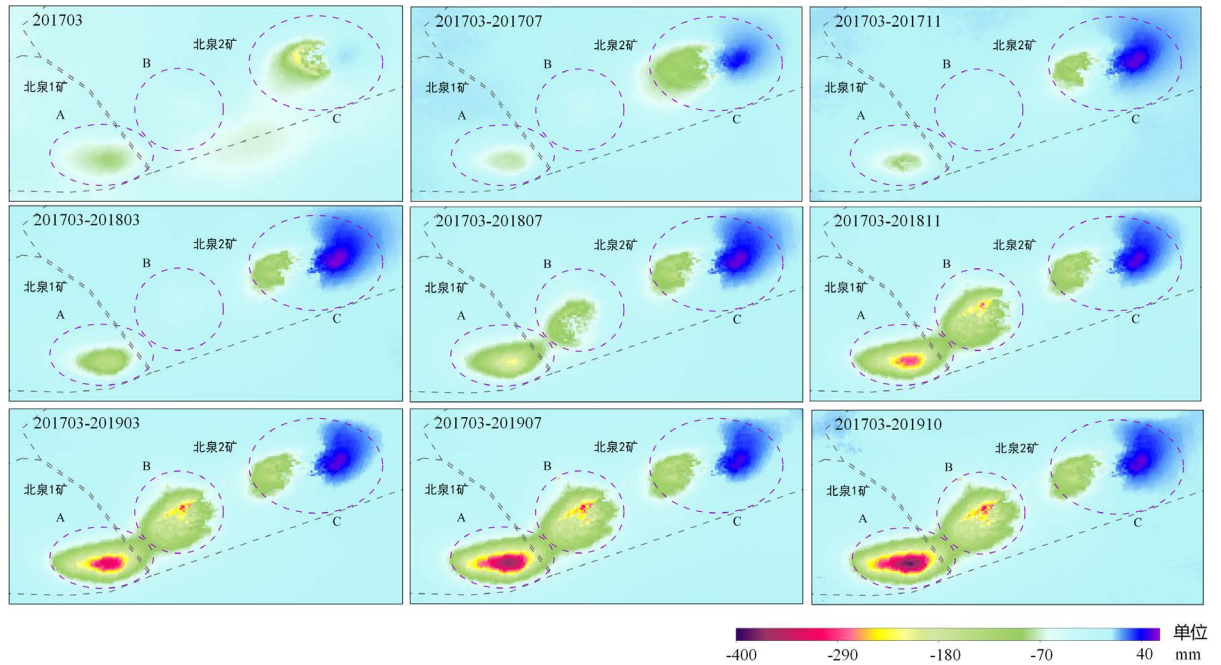


Figure 7. Cumulative subsidence distribution map of Beiquan 1 and Beiquan 2 mines
图 7. 北泉 1 矿及北泉 2 矿累计沉陷分布图

4.2. 矿区安全问题分析

北泉 1 矿和北泉 2 矿是简单型矿床, 属裂隙含水层充水为主的水文地质条件, 矿区主采的 4 号煤层顶底板均以粉砂岩-泥岩为主, 属抗压、抗拉、抗剪性弱的岩层, 总体稳固性较差, 结合本文对北泉 1 矿和北泉 2 矿沉陷发展规律的研究, 地表沉陷及沉陷坑充水应是矿井主要威胁。受煤矿采动等影响, 破坏了岩石连续性, 破坏了地下水的自然流畅, 煤层附近含水层平衡也受到干扰, 有可能成为直接充水水源, 加之常年开采易形成沉陷坑, 利于储水, 易造成透水事故; 此外, 矿区属裂隙含水层充水为主的水文地质条件, 平面上和剖面上均呈带状分布, 埋藏愈浅, 则裂隙愈发育, 往往能形成较强的含水带或导水带, 利于水力联系, 尤其是雨水集中时, 更易发生事故, 应采取积极有效的预防措施, 以免造成不必要的人员和财产损失。

5. 结论

本文利用 2017 年 3 月 16 日至 2019 年 10 月 8 日期间覆盖北泉 1 矿和北泉 2 矿的 73 景 Sentinel-1A 升轨影像, 基于 Stacking 时序 InSAR 方法对该地区进行沉陷监测。研究表明: 1) 该区域集中分布 3 个沉陷漏斗, 年均沉陷速率达 $-154 \sim -57$ mm/a, 且各沉陷区与地面构筑物十分接近, 具有一定的安全隐患; 2) 该区域的地表沉陷在一定程度上受冰冻期、冰雪融水和集中降雨等影响, 具有一定的季节性规律; 3) 矿区沉陷及矿坑充水是矿区的主要威胁。

致 谢

感谢欧空局提供 Sentinel-1A SAR 影像及美国 UGSG 提供的 SRTM-1 地形数据。

基金项目

国家自然科学基金项目(编号: 41804009); 国家重点研发计划(编号: 2017YFB0502700)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- [5] Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., et al. (2002) Full Exploitation of the ERS Archive: Multi Data Set Permanent Scatterers Analysis. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Toronto, 24-28 June 2002, 1234-1236.
- [6] 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.
- [7] Williams, S., Bock, Y. and Fang, P. (1998) Integrated Satellite Interferometry: Tropospheric Noise, GPS Estimates and Implications for Interferometric Synthetic Aperture Radar Products. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **103**, 27051. <https://doi.org/10.1029/98JB02794>
- [8] 张文馨. InSAR 技术在南屯矿区地面形变监测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [9] 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.
- [10] 张洋. 沛北矿区地表沉降 InSAR 监测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- [11] Zhao, Q., Lin, H. and Jiang, L. (2008) Ground Deformation Monitoring in Pearl River Delta Region with Stacking D-InSAR Technique. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **277**, 1-13. <https://doi.org/10.1117/12.813017>
- [12] Keren, D., et al. (2018) Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-Band Temporary Scatterers Stacking InSAR. *Sensors*, **18**, 1876. <https://doi.org/10.3390/s18061876>
- [13] 王昊, 董杰, 邓书斌. 基于 SARscape 的干涉叠加在地表形变监测中的应用[J]. 遥感信息, 2011(6): 109-113.
- [14] 朱文峰, 赵超英, 张勤, 等. 利用 InSAR 识别与监测黑方台黄土滑坡[J]. 测绘科学, 2019, 44(5): 69-75.
- [15] 张洋, 汪云甲, 闫世勇. 基于 Stacking InSAR 技术的沛北矿区沉降监测[J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 102-105.
- [16] 赵鑫. 基于 RS、GIS 的哈密三道岭矿区生态环境调查与评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2013.