

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.13

基于 SBAS-InSAR 的山东济阳矿区沉降监测与分析

潘光永,陶秋香,陈 洋,王 珂

(山东科技大学测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘要: 利用 SBAS-InSAR 技术对济阳井田矿区 40 景 C 波段 Sentinel-1A 升轨数据进行处理,获取了 2017 年 5 月 20 日至 2018 年 10 月 18 日期间研究区内地面沉降的年平均沉降速率和累积沉降量。结果显示,研究区内年平均沉降速率最大达到 320 mm/a,累积沉降量最大为 447 mm。针对沉降较为严重区域选点进行特征点时序分析,结果表明,该位置的沉降量随着时间的推移持续增大,在研究时间段内没有减缓的趋势。矿区持续开采引发的地面沉降对周围地区也产生了一定影响。

关键词: 小基线集;合成孔径干涉雷达测量;矿区;沉降监测

中图分类号: P642.26,TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0100-07

Monitoring and analysis of sedimentation in Jiyang mining area of Shandong Province based on SBAS-InSAR

PAN Guangyong, TAO Qiuxiang, CHEN Yang, WANG Ke

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The SBAS-InSAR technology was used to process the 40-band C-band Sentinel-1A ascending data of the Jingtian Minefield in Jiyang, and the annual average sedimentation rate of the land subsidence in the study area from May 20, 2017 to October 18, 2018 was obtained. And the cumulative sedimentation, the result shows that the annual average settlement rate in the study area is up to 320 mm/a, and the cumulative settlement is up to 447 mm. The time series analysis of the selected areas with serious sedimentation shows that the sedimentation trend of the position with is getting bigger and bigger, and there is no evidence shows the trend getting slow during the study period. In addition, the results show that mining has a certain impact on the surrounding area.

Keywords: SBAS; synthetic aperture radar interferometry; mining area; settlement monitoring

0 引言

随着国家经济和科技水平的飞速发展,矿产资源的需求量越来越大。我国煤炭资源不仅存储量大,而且分布较为广泛,是重要的矿产资源之一,其广泛应用于生产生活的各个领域^[1-2]。然而煤炭资源的开采必

然会带来矿区及周围地表的沉降与塌陷等一系列地质灾害,为了降低地面沉降带来的安全隐患,预防矿产资源的过度开采,对矿区地面沉降的监测工作尤为重要^[3-7]。

现有的地面沉降监测方法主要有水准测量、GPS (Global Position System) 测量及合成孔径雷达干涉测

收稿日期: 2019-10-17; 修订日期: 2019-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(41774002,41404003);山东省自然科学基金(ZR2017MD020)

第一作者: 潘光永(1996-),男,山东潍坊人,在读硕士研究生,现主要从事 InSAR 数据处理与分析研究。E-mail:1031868415@qq.com

通讯作者: 陶秋香(1977-),女,山东济宁人,博士,副教授,主要从事 InSAR 理论、方法及关键技术的研究。E-mail:qiuxiangtao@163.com

量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 等^[8]。孟宪纲^[9]曾经采用水准测量的方法对京沪高速铁路进行了沉降分析,测量结果精确可靠,但是水准测量的方法在布设点位时难以做到分布均匀,更新周期较长,并且需要很多人力物力支撑^[10-11]。张训虎等^[12]采用 GPS 测量的方法对高速铁路进行了沉降监测,得出该方法可快速、高效的完成沉降监测工作的结论。GPS 的方法虽然具有较高的定位精度,但对高程信息不敏感,也难以满足地表微小沉降量监测的需求^[13-14]。InSAR 技术为新型遥感技术,其差分干涉模式 D-InSAR 技术具有全天时、全天候、大范围等监测地表沉降的特点,其形变监测精度理论上可以达到厘米级甚至毫米级^[15]。1989 年 Gabriel 首次采用 D-InSAR 成功获取了农田区的形变信息,尽管学者们随后对 D-InSAR 技术做了一系列改进,但其精度易受时空失相干及大气等因素的影响^[16]。2001 年 Berardino 等人在 D-InSAR 基础上克服时间、空间失相干和大气效应的限制,发展了小基线集技术 (Small Baseline Subset, SBAS) 对长时间缓慢沉降的监测也有很好的效果^[17],因此成为了监测地表沉降的主要手段^[18-21]。本文基于 SBAS-InSAR 技术对覆盖济阳矿区 2017 年 5 月 20 日至 2018 年 10 月 18 日期间 40 景 C 波段 Sentinel-1A 升轨数据进行干涉对的选取、去除大气效应、滤波、相位解缠、去平地效应等处理,得到期间矿区的沉降量及平均沉降速率,结果表明,基于 SBAS-InSAR 技术可以形象直观地再现矿区沉降变化过程,其沉降监测结果与矿区实际开采进程相符,可作为预防地质灾害的有力依据。

1 研究区概况

济阳井田矿区位于华北平原的南缘,黄河北岸,地势平坦,局部地势低洼,雨季易积水。黄河从井田南部 1 km 处流过,井田中东部有邢家渡引黄总干渠,中西部有大寺河通过。矿区东西向约 9.9 km,南北向约 5 km,面积约 50 km²。本井田为全隐蔽的华北型石炭二迭系海陆交互相煤田。区内地层自下而上为奥陶系石灰岩、石炭系本溪组和太原组,二叠系山西组和石盒子组,第三系明化镇组,第四系平原组。主要含煤地层为太原组和山西组。具体位置及范围如图 1 所示 (红色矩形框为矿区范围)。研究区主要为四采区 7 煤层,北靠 DF15 断层 ($H = 19\text{ m} \angle 47^\circ$),南邻李家断层 ($H = 70 \sim 260\text{ m} \angle 70^\circ$),西至煤 7 风化带边界,东至 DF16 断层 ($H = 80\text{ m} \angle 70^\circ$),平均走向长约 2 378 m,

倾斜长约 954 m,面积 $2.04 \times 10^6\text{ m}^2$ 。四采区内 7 煤层位于太原组上部,上距一灰 11.50 ~ 26.70 m,平均 17.97 m,下距二灰 30.50 ~ 40.30 m,平均 34.72 m。下距第 10 层煤 40.00 ~ 58.85 m,平均 50.87 m。开采上限标高 -375.0 m 左右,下限标高 -581.1 m 左右,埋深 398.2 m ~ 604.3 m 之间,平均 506.3 m,煤厚 0 ~ 1.81 m,平均 1.1 m,倾角 $5^\circ \sim 12^\circ$,平均 6° ,工业储量为 $2.596 \times 10^6\text{ t}$,可采储量为 1.37×10^6 吨。其结构简单,属稳定型薄煤层。主要布设有 4701、4701 东、4701 西、4702、4702 西、4703、4704 上、4704 下和 4705 工作面,其分布如图 2 所示,开采时间情况如表 1 所示。



图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of research area

表 1 研究区煤层开采情况

Table 1 Coal seam mining in research area			
隶属采区及煤层	工作面名称	开采开始时间	开采结束时间
四采区 7 煤层	4704 下	2015.3	2015.1
	4704 上	2015.11	2016.12
	4701	2016.12	2017.5
	4702	2017.5	2017.12
	4701 西	2017.9	2018.6
	4703	2017.12	2018.5
	4705	2018.5	2018.11
	4702 西	2018.8	2019.2
	4701 东	2018.3	2018.1

2 SBAS-InSAR 技术原理

常规的 D-InSAR 的测量方法受制于 SAR 影像的数量,且易受时空去相关的影响,时间、空间基线过长等都会对差分的结果造成较大影响。由于矿区的开采过程较为缓慢,开采时间较长,因此应用 D-InSAR 的测量方法监测长时间段内矿区形变结果具有一定局限性。小基线集技术则可通过利用多景 SAR 数据对长

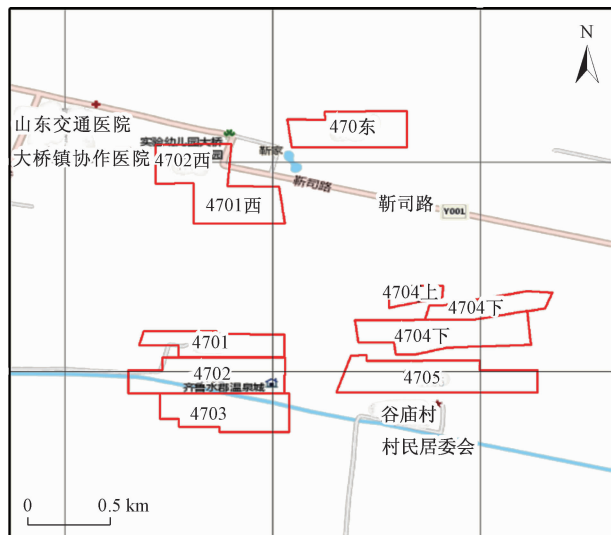


图2 工作面分布情况

Fig. 2 Distribution of working face

时间的微小形变进行高精度观测,并通过产生的具有时间基线和空间基线特征相对较小的干涉图序列,更好的克服去相关的影响,提高形变监测质量。

假设研究区域在 $(t_0, \dots, t_N)$ 的时间段里共有 $N + 1$ 景雷达影像,根据干涉相对之间的自由组合,便可得到共 M 幅干涉图,且满足:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N+1}{2} \right) \quad (1)$$

先将 t_A, t_B 两景不同时刻的影像去除地形相位,假设 $t_A < t_B$, 那么由 t_A, t_B 两景影像产生的第 i 幅干涉图中任意像元 (x, y) 的干涉相位可表示为:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_i(x, y) &= \varphi(t_B, x, y) - \varphi(t_A, x, y) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, y) - d(t_A, x, y)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\varphi(t_A, x, y)$ 和 $\varphi(t_B, x, y)$ 分别表示 t_A 和 t_B 时刻相对应的相位, λ 表示雷达波长, $d(t_A, x, y)$ 和 $d(t_B, x, y)$ 分别表示在 t_A 和 t_B 时刻任意像元 (x, y) 相对于基准时刻 t_0 在 LOS 方向上的地表形变。

将公式(2)中的相位 φ 表示成任意两个获取时间之间的平均相位速度 v 与时间 t 的乘积,以此来获得具有物理意义的沉降序列,表达形式为:

$$v_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

于是,第 i 幅干涉图的相位可表示为:

$$\sum_{t_{A,i+1}}^{t_{B,i}} (t_k - t_{k-1}) v_k = \delta\varphi_i \quad (4)$$

将其改写成矩阵形式:

$$Bv = \delta\varphi \quad (5)$$

式中: B —— $M \times N$ 矩阵。最后,利用奇异值分解的方法得到速度矢量 v 的广义逆解,再根据对各时间段速度在时间域上进行积分便可得到各个时间段的形变量。

3 数据处理

研究采用 2017 年 5 月 20 日至 2018 年 10 月 18 日期间共计 40 景 C 波段 Sentinel-1A 升轨的雷达影像数据,高程数据 (Digital Elevation Model, DEM) 采用美国地质调查局所提供的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 即航天飞机雷达地形测绘使命) 90 m 分辨率 DEM,实验通过 SARscape 软件设置合适的时间阈值和空间阈值,共生成 68 个差分干涉对。差分干涉对的时空基线组合如图 3 所示。

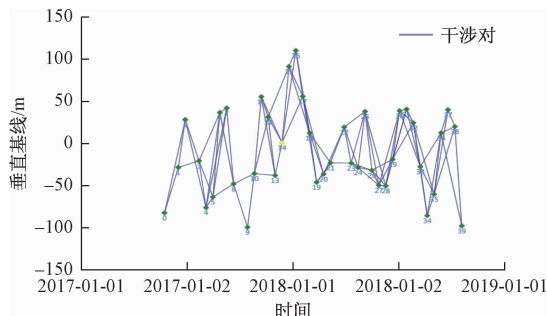


图3 时空基线组合图

Fig. 3 Time-space baseline combination map

3.1 差分干涉处理

利用获取的 DEM 数据对生成的 68 个干涉对进行差分处理,生成相干性干涉图,通过 Goldstein 的滤波方法去除噪声影响,进行增强处理,滤波后的部分差分干涉图如图 4 所示。采用最小费用流 (Minimum Cost Flow) 的方法进行相位解缠,保证影像中相对孤立的高相干区域有更好的处理结果,获取研究区域真实相位。

3.2 轨道精炼和重去平

为去除矫正相位偏移,选取位于没有形变或形变较小的区域且具有高相干性的 GCP 点用于进行修正干涉相位和解缠后的相位,进而利用线性模型对初始位移进行估计,去除残余地形。

3.3 SBAS 反演

为了更好的分析形变监测的结果,首先估算形变速率与残余地形,然后对差分干涉图进行二次解缠处理,进而对于干涉图进行优化,得到第一次反演结果。在第一次反演得到的形变速率的基础上,利用轨道精炼中所选的 GCP 点移除恒定相位或斜坡相位,根据大气滤波的定制,估算并去除大气效应,最终得到时间序

列上的位移变化。获取该矿区年平均沉降速率图（图 5）。

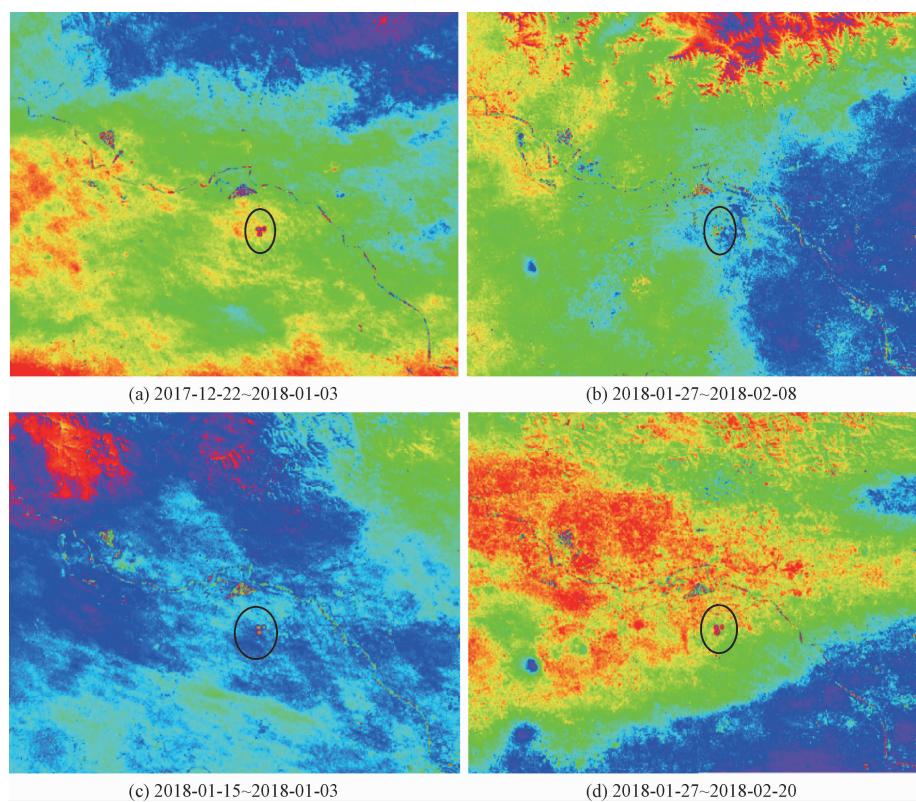


图 4 滤波后的干涉图示例

Fig.4 Example of filtered interferogram

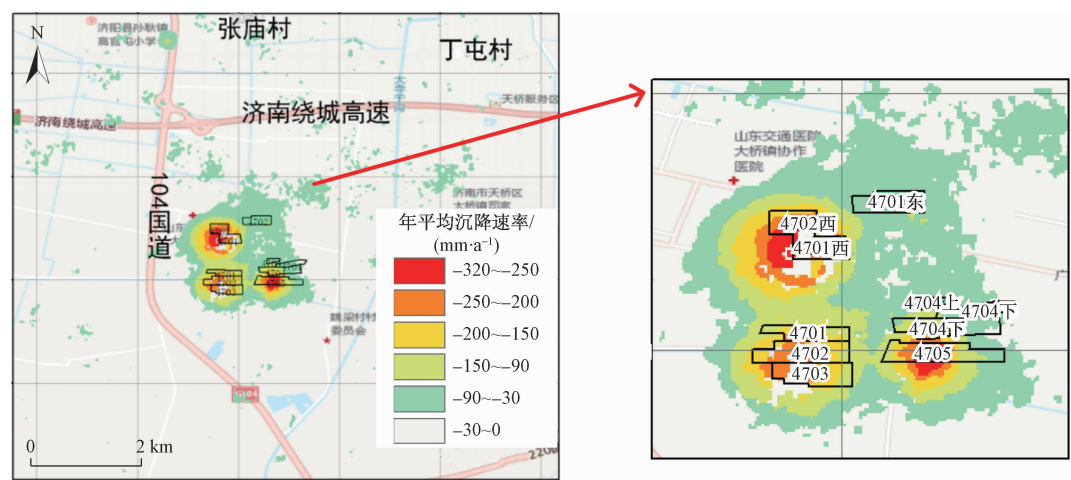


图 5 年平均沉降速率

Fig.5 Annual average sedimentation rate

4 结果分析

4.1 与矿区开采进程的对比分析

由图 5 沉降监测结果分析可知：

(1) 监测期间该研究区出现三处沉降盆地，分别位于研究区西北、西南和东南方向的工作面附近，其中

4705 工作面与研究区西北方向 4701 和 4702 工作面附近沉降最为严重，其最大年平均沉降速率可达 320 mm/a，矿区的沉降速率由沉降中心到边缘逐渐减小。

(2) 为进一步获取监测期间矿区的累积沉降结果，对各时间段沉降速率进行时间域上的积分，获取

2017 年 5 月 20 日至 2018 年 10 月 18 日期间共 39 幅于 2017 年 5 月 20 日的累积沉降量图。累积沉降量图。图 6 给出了研究区部分成像时刻相对

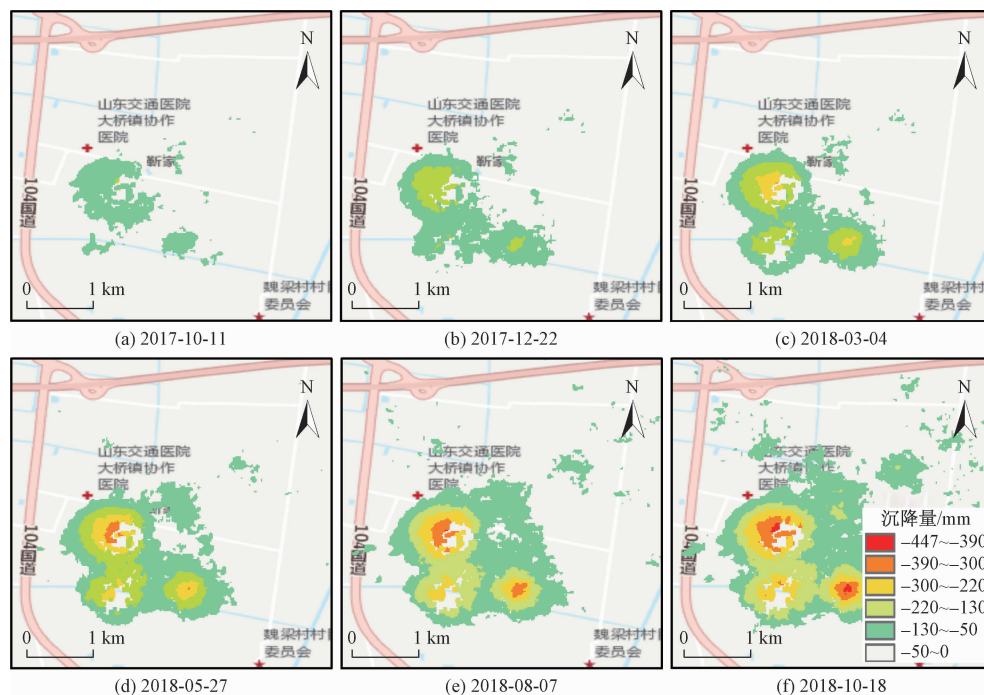


图 6 累积沉降量

Fig. 6 Cumulative settlement

由图 6 结合煤层各个工作面实际开采情况分析得到:

①2017 年 5 月至 2017 年 12 月期间,随着开采工作的进行,4702 工作面上方沉降持续增大,最大沉降量达到 130 mm;4701 西工作面随开采工作的开始,上方出现下沉,并且该工作面南邻刚刚结束开采的 4701 工作面,其上覆岩层尚未达到力学平衡状态,仍在缓慢下沉,从而导致地下岩层结构更趋于不稳定状态,加剧了沉降现象,最大沉降量达 220 mm。

②2017 年 12 月至 2018 年 5 月期间,4701 西、4703 及 4701 东工作面开采工作正在进行。根据图 6 (c)与图 6(d)可看出:随着 4701 西工作面开采工作继续进行,西南处沉降盆地持续下沉,沉降范围有所扩大,最大沉降量达到 390 mm;4703 工作面北邻刚刚结束开采的 4702 工作面,随着其开采工作的进行,加剧了该区域的地面沉降,最大沉降量达 300 mm。

③2018 年 5 月至 2018 年 11 月期间,4701 东工作面因开采工作继续进行,致使该区域沉降量及沉降区域逐渐增大,至 2018 年 10 月份开采工作结束,该区域沉降量最大达到 300 mm,并且因该区域地下煤层开采导致东北方向地面也发生了沉降现象;4702 西工作面从 2018 年 8 月份开始开采后便加剧了该地区的沉降,

最大沉降量达到 447 mm;由于 4701 西、4702 和 4703 三个工作面的开采,使采区附近岩层结构遭到破坏,原有的力学平衡结构逐步变得不稳固,并使开采区上覆岩层发生移动和变形,从而影响周围地区的岩层结构,导致 4705 工作面附近在正式开采前就发生沉降现象,加上附近的 4704 工作面原本就进行过开采工作,地下岩层结构早已破坏,因此受附近三面开采工作的影响使该地区沉降更为严重,在 2018 年 8 月 4705 工作面开采后又加剧了沉降,至 2018 年 10 月 18 日沉降量最大达到 447 mm。

(3)分别在沉降较小的 4701 东工作面附近选取 A 点,沉降较为严重的 4705 工作面附近选取 B 点进行时间序列分析,具体位置如图 6(f)所示,结果如图 7(a)和图 7(b)所示。

由图 7 分析可知,两点处随着开采工作的进行,总体上沉降量越来越大且没有减缓的趋势。其中图 7 (a)可看出,监测初期,由于 4701 西和 4702 工作面的开采,A 点处开始出现沉降,至 2017 年 8 月左右,沉降量达 45 mm,之后因为该区域岩层硬度及 4701 西工作面开采强度减弱等因素致使该处沉降量明显减少。至 2018 年 3 月,4701 东工作面开采活动的进行导致 A 点处再次出现较大下沉,随着开采活动的持续进行,沉降

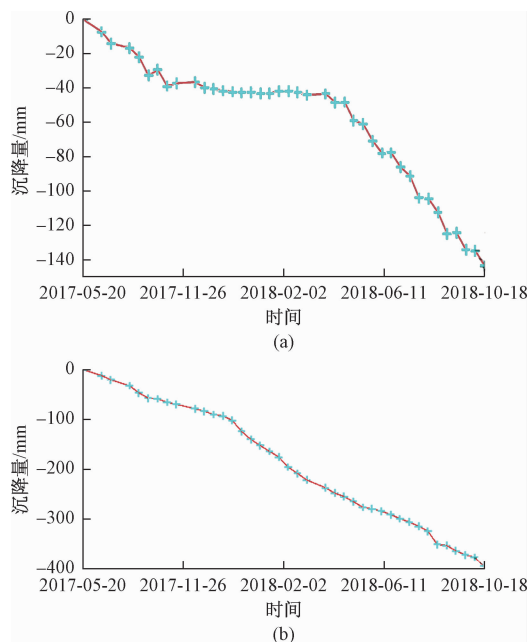


图 7 时间序列分析
Fig. 7 Time series analysis

量逐渐增大,至 2018 年 10 月 18 日,最大沉降量大于 140 mm。

图 7(b)可看出在 4705 工作面附近因受三个方向工作面开采的影响,也在持续发生沉降,并且随着 2018 年 5 月 4705 工作面开采后,沉降量增大,最大大于 400 mm。

4.2 与水准监测结果的对比分析

为了验证 SBAS-InSAR 监测结果的可靠性,分别在沉降盆地边缘及靠近沉降中心处选取了 7 个水准点的累积沉降结果与 SBAS-InSAR 监测的结果进行对比分析。选取的水准点布置情况如图 8 所示,对比结果详见表 2。

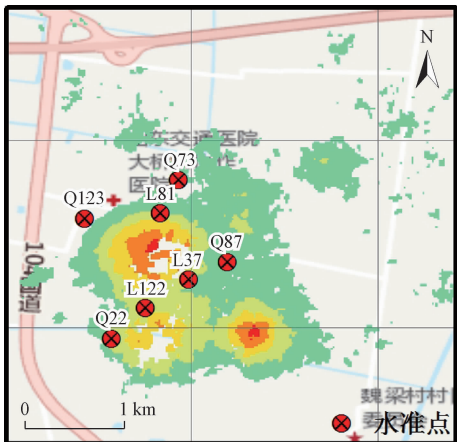


图 8 水准点位置
Fig. 8 Location of bench marks

表 2 SBAS-InSAR 形变监测结果与水准测量结果差异比较
Table 2 Comparison of SBAS-InSAR deformation monitoring results and leveling results

点名	观测日期		实测形变量/mm	SBAS-InSAR 监测的形变量/mm	差值/mm
	水准测量	SBAS-InSAR			
L37	开始	2017. 5. 10	197	168. 88	28. 12
L81			159	144. 69	14. 31
L122	结束	2018. 10. 5	200	214. 18	-14. 18
Q22	开始	2017. 5. 11	137	144. 71	-7. 71
Q73			61	47. 84	13. 16
Q87			84	64. 17	19. 83
Q123	结束	2018. 10. 5	18	30. 21	-12. 21

根据表 2 的对比结果可看出,在本次实验中所得到的形变结果与水准测量得到的形变结果吻合较好,两种技术监测结果最小差值为 - 7. 71 mm,最大差值为 28. 12 mm,经计算平均差值约为 5. 91 mm。由于 SAR 影像自身特性的限制、干涉过程中受到各种误差因素的影响,SBAS-InSAR 的监测结果与实际水准数据有所差别,但从表 2 可看出大部分点形变的差值相对较小,表明 SBAS-InSAR 监测的结果是可靠的。

5 结论

本文基于 C 波段 Sentinel-1A 升轨的雷达影像数据,采用 SBAS-InSAR 技术方法对山东济阳某矿区进行了监测,分别从研究区内地面沉降的年平均沉降速率、累积沉降量以及沉降较为严重区域的时间序列进行了分析。结果表明,2017 年 5 月 20 日至 2018 年 10 月 18 日期间,研究区沉降最为严重的区域集中在 4701 西与 4702 西工作面和 4705 工作面,年平均沉降速率最大达到 320 mm/a,累积沉降量最大为 447 mm,且随着时间推移,沉降量逐渐增大。此外,位于矿区周边的 104 国道与济南绕城高速受开采区影响,也发生了部分沉降,说明了在研究区工作面进行开采工作后,不仅开采地区会有沉降现象发生,周围地区也受其影响而出现下沉。通过与矿区实际开采情况的对比分析,表明 SBAS-InSAR 的方法在矿区沉降监测上有很大的适用性,能够快速准确地定位矿区沉降的位置及范围,且其监测结果与矿区开采进程相符,并对因矿区开采而导致的地质灾害问题的预防有重要意义。

参考文献:

[1] 朱建军,邢学敏,胡俊,等. 利用 InSAR 技术监测矿区地表形变[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21

- (10):2564-2576. [ZHU J J, XING X M, HU J, et al. Monitoring of ground surface deformation in mining area with InSAR technique[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10):2564-2576. (in Chinese)]
- [2] 朱叶飞,朱锦旗,詹雅婷,等. 基于小基线 InSAR 技术监测九台营城矿区 2012 年地表形变[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2):370-375. [ZHU Y F, ZHU J Q, ZHAN Y T, et al. Monitoring Yingcheng mine surface deformation in Jiutai City based on small baseline InSAR technology [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2):370-375. (in Chinese)]
- [3] 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. (in Chinese)]
- [4] YANG Z F, LI Z W, ZHU J J, et al. Deriving dynamic subsidence of coal mining areas using InSAR and logistic model[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2):125.
- [5] 丁刘建,陶秋香,高腾飞,等. SBAS InSAR 技术在矿区地面沉降监测中的应用[J]. 中国科技论文, 2019, 14(3):320-325. [DING L J, TAO Q X, GAO T F, et al. Application of SBAS InSAR in monitoring mining land subsidence [J]. China Science Paper, 2019, 14(3):320-325. (in Chinese)]
- [6] GRZOVIC M, GHULAM A. Evaluation of land subsidence from underground coal mining using TimeSAR (SBAS and PSI) in Springfield, Illinois, USA[J]. Natural Hazards, 2015, 79(3):1739-1751.
- [7] 王娜,徐素宁,周家晶. 基于 DInSAR 技术的煤矿区地面沉陷分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2):110-114. [WANG N, XU S N, ZHOU J J. Analysis of land subsidence in coal mining area based on DInSAR technology[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2):110-114. (in Chinese)]
- [8] 刘国祥. 合成孔径雷达遥感新技术——InSAR 介绍[J]. 四川测绘, 2004, 27(2):92-95. [LIU G X. A new technology of microwave remote sensing: introduction to synthetic aperture radar interferometry [J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 2004, 27(2):92-95. (in Chinese)]
- [9] 孟宪纲. 闭合环式附合水准测量在京沪高速铁路中的应用[J]. 测绘通报, 2012(增刊1):202-204. [MENG X G. Application of closed ring attached leveling in Beijing-Shanghai High Speed Railway[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(Sup1):202-204. (in Chinese)]
- [10] 尹宏杰,朱建军,李志伟,等. 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, et al. Ground subsidence monitoring in mining area using DInSAR SBAS algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(1):52-58. (in Chinese)]
- [11] 侯建国. 基于差分干涉雷达测量技术的哈尔滨市地面形变监测与综合分析研究[D]. 长安大学, 2011. [HOU J G. The ground deformation monitoring based on differential SAR interferometry and its integrated analysis in Harbin[D]. Chang'an University, 2011. (in Chinese)]
- [12] 张训虎,章磊,王晓奇. 基于 GPS 的高速铁路沉降观测可行性研究[J]. 测绘通报, 2014(10):92-94. [ZHANG X H, ZHANG L, WANG X Q. Study on the feasibility of high-speed railway settlement observation based on GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(10):92-94. (in Chinese)]
- [13] 孙晓鹏,鲁小丫,文学虎,等. 基于 SBAS-InSAR 的成都平原地面沉降监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3):123-129. [SUN X P, LU X Y, WEN X H, et al. Monitoring of ground subsidence in Chengdu Plain using SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(3):123-129. (in Chinese)]
- [14] 葛大庆,王艳,郭小方,等. 利用短基线差分干涉纹图集监测地表形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2):61-66. [GE D Q, WANG Y, GUO X F, et al. Surface deformation field monitoring by use of small-baseline differential interferograms stack [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(2):61-66. (in Chinese)]
- [15] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008. [WANG C, ZHANG H, LIU Z. Spaceborne synthetic aperture radar interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]