



移动扫码阅读

栾元重,梁耀东,纪赵磊,等.基于 SBAS-InSAR 技术采动地表沉降监测与分析[J].煤炭科学技术,2020,48(10):198-204. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.026

LUAN Yuanzhong, LIANG Yaodong, JI Zhaolei, et al. Monitoring and analysis of surface subsidence caused by SBAS-InSAR technology [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (10): 198 - 204. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.10.026

基于 SBAS-InSAR 技术采动地表沉降监测与分析

栾元重,梁耀东,纪赵磊,于健

(山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266000)

摘要:为了掌握煤矿开采区域地面沉降情况,包括时序沉降量、沉降速率、时序沉降面积等,利用覆盖郯城县的 19 幅 Sentinel-1 A 影像、AUX_POE-ORB 精密星历和 SRTM1(空间分辨率为 30 m) DEM 数据,采用 SBAS-InSAR 技术从 19 幅影像数据中提取矿区的沉降速率、时序沉降量和累计沉降量,对沉降漏斗沉降速率的分布情况和沉降发展趋势进行了研究,并在开采工作面方向与水准观测线数据进行量化分析和对比。结果表明:从 2016 年 9 月至 2017 年 9 月该煤矿区域内存在一个较大的沉降漏斗,通过分析该沉降漏斗的沉降速率,发现 2302、1307、1305、1303 和 4302 工作面最大沉降速率分别为 353、389、345、273 和 352 mm/a;通过分析各工作面的时序沉降情况,发现 1303 和 1305 工作面北部沉降量在减小,南部沉降量还会增加,而 4302、2302 和 1307 工作面还处于活跃期,其沉降还会不断增加;对 2302 工作面走向方向的时序沉降情况进行了量化分析并与水准监测数据进行对比分析,发现最大中误差为 9.25 mm,其精度结果符合《DD2014-11 地面沉降干涉雷达数据处理技术规程》中的精度(10 mm)要求,证明 SBAS-InSAR 技术沉降监测精度可靠。

关键词:SBAS-InSAR 技术;沉降分析;水准测量;时序分析

中图分类号:TD173.4;TD325.4 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)10-0198-07

Monitoring and analysis of mining-induced surface subsidence based on SBAS-InSAR technology

LUAN Yuanzhong, LIANG Yaodong, JI Zhaolei, YU Jian

(School of Surveying and Mapping Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to grasp the ground subsidence of coal mining area, including time series subsidence, subsidence rate, time series subsidence area, etc., 19 Sentinel-1 A images, AUX_POE-ORB precision stars and SRTM1 (spatial resolution of 30m) DEM data as well as SBAS-InSAR technology were used to extract the subsidence rate, time-series subsidence and cumulative subsidence of the mining area from 19 images. The distribution of the subsidence rate of the subsidence funnel and the development trend of settlement are studied, and the direction of the mining face is quantitatively analyzed and compared with the level observation line data. The results show that from September 2016 to September 2017, there was a large subsidence funnel in the study area. By analyzing the subsidence rate of the subsidence funnel, it was found that the maximum sedimentation rates of No.2302, No.1307, No.1305, No.1303 and No.4302 working faces were 353, 389, 345, 273 and 352 mm/a respectively. By analyzing the time-series subsidence of each working face, it was found that the subsidence in the north of the working face No.1303 and No.1305 was decreasing, and the subsidence in the southern part will increase; while the No.4302, No.2302 and No.1307 working faces are still active, their subsidence will continue to increase. Quantitative analysis was carried out on the time series subsidence of the direction of No.2302 working face and compared with the level monitoring data. It was found that the maximum median error was 9.25 mm, and the accuracy results meet the accuracy(10 mm) requirements in DD2014-11 Technical Regulations for Data Processing of Land Subsidence Interferometric Radar, which proves that the subsidence monitoring accuracy is reliable.

Key words: SBAS-InSAR technology; subsidence analysis; leveling measurement; time series analysis

收稿日期:2020-06-28;责任编辑:曾康生

基金项目:山东省 2017 年重点研发计划资助项目(2017GSF220010)

作者简介:栾元重(1963—),男,山东烟台人,教授。E-mail:lyz6615@163.com

0 引 言

煤矿开采引发大区域的地面沉降,严重的还会引起地面坍塌、地物严重形变等现象,对采矿区域的居民和环境造成一系列的影响,甚至威胁着居民的人身安全问题^[1-2]。InSAR 技术是近年来较受追捧的地面沉降监测手段,相比 GPS 测量、常规大地测量法和近景摄影测量等传统方法,具有监测精度高(可达毫米级)、覆盖范围广、作业效率高、数据处理流程化等优势。目前常用的 InSAR 技术有 D-InSAR、PS-InSAR、SBAS-InSAR、CR-InSAR、CT-InSAR 等^[3-7]。InSAR 技术经过十几年的发展,已经在城市地面沉降监测、山体滑坡监测及矿区沉降监测等方面有了广泛的应用研究^[3-5],与 D-InSAR 技术相比,小基线子集(SBAS)InSAR 技术可以有效地克服差分干涉合成孔径雷达(D-InSAR)的空间和时间去相关,并可以获得时间序列的沉降^[6-7]。与永久性散射体(PS)InSAR 技术相比,SBAS-InSAR 技术减少了所需的 SAR 图像数量,并且精度更高、计算速度更快,因此在地面沉降监测应用中 SBAS-InSAR 技术具有良好的监测精度和有效性。

国内外相关学者陆续开展了关于 InSAR 技术的应用研究,文献[8]用 D-InSAR 技术对法国 Vauvert 地区的一个盐矿进行了地面沉陷监测,证明了 D-InSAR 技术对地面沉降监测的可行性,但不足的是时空基线、大气效应等误差影响了精度。而 SBAS-InSAR 技术可以减弱时空基线、大气效应等误差,通过有限数量的影像可以得到毫米级的监测结果。刘志敏等^[9]结合 D-InSAR 技术和 SBAS-InSAR 技术对长治矿区进行了试验分析,发现矿区因开采时间、开采方式、采储量以及地形等因素的不同而呈现不同的沉降结果。张艳梅等^[10]利用 SBAS-InSAR 技术的时序地表沉降监测方法对西安市城区及周边进行了监测,对西安城区的沉降范围变化进行了分析。冯文凯等^[11]利用 SBAS-InSAR 技术对金沙江流域的老滑坡进行了分析,取得了较好的试验结果。已有大量学者利用 SBAS-InSAR 技术对城市地面、长三角洲和滑坡形变等进行了监测实验,且都获得了较好的监测结果,但对矿区工作面的沉降监测相对较少。

笔者以欧空局(ESA) Sentinel-1 A 卫星获取的 19 幅高分辨率 SAR 影像和精度为 30 m 分辨率的 SRTM DEM 作为数据支撑,采用 SBAS-InSAR 技术对郧城某矿区域进行时序变形监测,通过时序监测数据对沉降漏斗区域内各工作面进行了沉降趋势分

析,并与水准测量数据进行验证分析,更加清楚地掌握沉降漏斗区域内工作面的演化规律。

1 SBAS-InSAR 基本原理

获取同一研究区域的 n 幅影像,按时间顺序 $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$ 排列,选择适合的时间基线和空间基线,生成 m 幅差分干涉图,则 m 应满足

$$\frac{n+1}{2} \leq m \leq \frac{n(n+1)}{2} \quad (1)$$

假设 T_A 时刻获取的影像与 T_B 时刻获取的影像 ($T_A < T_B$) 生成第 k 幅差分干涉图,图上某个像元方位向坐标为 x ,距离向坐标为 r ,那么任意像元 (x, r) 上 T_B 时刻与 T_A 时刻的差分干涉相位为 $\varphi_A(x, r)$ 、 $\varphi_B(x, r)$ 为未知数, m 幅差分干涉图的干涉相位 $\delta\varphi_k(x, r)$ ($k = 1, \dots, m$) 则为观测量^[12],那么像元干涉相位可以表示为

$$\delta\varphi_k(x, r) = \varphi_B(x, r) - \varphi_A(x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(T_B, x, r) - d(T_A, x, r)] \quad (2)$$

式中: λ 为雷达信号波长; $d(T_B, x, r)$ 、 $d(T_A, x, r)$ 为像元 (x, r) 在 T_B 时刻与 T_A 时刻相对于初始时刻 T_0 在雷达 LOS 方向的累计形变量。

为便于理解,式(2)并未考虑大气变化引起的相位变化、去相关现象,也未精确去除地形相位。

差分干涉图有 m 幅,根据式(2)就可以得到 m 个方程,用矩阵表示方程组为

$$\delta\varphi(x, r) = \mathbf{A}\varphi(x, r) \quad (3)$$

式(3)中: \mathbf{A} 为 $m \times n$ 矩阵, m 对应于干涉图数量, n 对应于 SAR 影像数量, $\varphi(x, r) = [\varphi_1(x, r), \dots, \varphi_n(x, r)]$ 为每一景 SAR 影像中高相干点对应的相位值所组成的向量, $\delta\varphi(x, r) = [\delta\varphi_1(x, r), \dots, \delta\varphi_m(x, r)]$ 为各差分干涉图对应的解缠相位值组成的向量;当 \mathbf{A} 的秩为 n 时,利用最小二乘法^[13],解得 $\varphi(x, r)$ 为

$$\varphi(x, r) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta\varphi(x, r) \quad (4)$$

式(4)中,当 \mathbf{A} 的秩小于 n 时,利用奇异值分解法(SVD)对方程组进行求解,但是求解得到的形变量一般表现出不连续、跳跃等现象^[14],因此,可以考虑求解 2 个相邻时刻相位变化平均速率为

$$v_1 = \frac{\varphi(T_1)}{T_1 + T_0}, \dots, v_n = \frac{\varphi(T_n) - \varphi(T_{n-1})}{T_n + T_{n-1}} \quad (5)$$

$$\mathbf{V}^T = [v_1, v_2, \dots, v_n] \quad (6)$$

根据式(5)得到相位平均速率,最后对各时间段速率进行积分,得到该时间段内的总形变量。

2 矿区概况和数据概述

2.1 矿区概况

选择选用菏泽市鄆城县某煤矿作为试验区域。该煤矿位于主要位于田地区域,附近有车楼村、文庄和邵集村等诸多村庄,其地理坐标位于东经 115°50′、北纬 35°27′左右;该试验区域包含 5 个开采工作面,如图 1 所示。

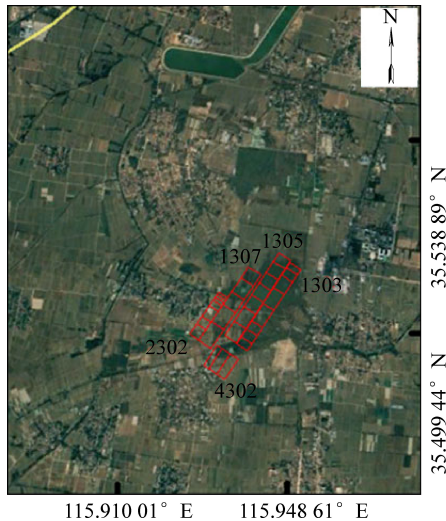


图 1 工作面地理分布

Fig.1 Geographical distribution of working faces

工作面编号分别为: 2302、1307、1305、1303 和 4302,工作面的开采厚度范围为 2.8~3.4 m,2302 工作面走向长 837 m,倾向长 177 m,开采时间为 2016 年 1 月至 2016 年 11 月;1307 工作面走向长 1 456 m,倾向长 246 m,开采时间为 2016 年 1 月至 2017 年 3 月;1305 工作面走向长 1 629 m,倾向长 233 m,开采时间为 2015 年 6 月至 2016 年 7 月;1303 工作面走向长 1 602 m,倾向长 209 m,开采时间为 2012 年 6 月至 2015 年 5 月;4302 工作面走向长 417 m,倾向长 399 m,开采时间为 2016 年 11 月至 2017 年 12 月^[15]。

2.2 试验数据

本试验利用 19 幅干涉宽幅(Interferometric wide swath, IW)模式、升轨、VV 极化方式的 Sentinel-1 A SAR 卫星影像数据,时间跨度为 2016 年 9 月到 2017 年 9 月^[16],其空间分辨率为 5 m×20 m,其入射角都为 38.9° 左右^[17],详细影像信息见表 1。由于每幅影像数据的幅宽为 250 km,为了方便试验处理,所以对原始影像数据进行了裁剪,裁剪范围为:北纬 35.57°—35.25°、东经 115.53°—116°。差分干涉所用的 DEM 数据为 SRTM1 (空间分辨率为 30 m),覆盖范围为北纬 36° 到南纬 35°、西经 115°

到东经 116°,覆盖整个煤矿区域^[18]。

表 1 影像参数

Table 1 Image parameters

序号	成像时间	时间基线/d	垂直基线/m
1	2016-09-27	-84	25.129 8
2	2016-10-09	-72	-23.323 3
3	2016-10-21	-60	12.135 2
4	2016-11-02	-48	75.105 5
5	2016-11-14	-36	94.743 6
6	2016-11-26	-24	70.980 6
7	2016-12-08	-12	8.225 0
8	2016-12-20	0	0
9	2017-01-01	+12	32.486 4
10	2017-01-13	+24	84.113 0
11	2017-01-25	+36	72.165 3
12	2017-02-18	+60	37.687 5
13	2017-03-02	+72	99.847 3
14	2017-03-26	+96	71.151 6
15	2017-04-19	+120	-61.247 8
16	2017-06-06	+168	14.462 8
17	2017-08-05	+228	41.445 9
18	2017-08-29	+252	-22.511 8
19	2017-09-10	+264	25.349 2

3 数据处理和结果分析

3.1 数据处理

试验基于 Sentinel-1 A 卫星数据、DEM 数据和 ENVI 软件的 SARscape,利用 SBAS-InSAR 技术对鄆城某矿进行了沉降反演,主要步骤如下:

1) 基线估算及小基线集生成:根据理论计算可得到 $n(n-1)/2 = 171$ 个干涉对的空间基线和时间基线。为了提高精度,设置空间基线阈值为临界基线(参考临界基线为 5 554 m)的 2%,设置时间基线阈值为 100 d,最终生成了 99 个干涉相对。

2) SAR 影像配准和小基线集干涉流及相位解缠:选择 2016 年 12 月 20 日的影像为超级主影像,再与其他影像进行配准;小基线集干涉流包括干涉图生成、去平地效应、干涉图滤波(采用 Goldstein 法)、相干系数计算^[19];相位解缠采用的是最小费用流法(Minimum Cost Flow),相位解缠相干系数阈值设为 0.45。其中干涉处理采用精密轨道星历参数 AUX_POEORB,精度在 5 cm 以内。

3) 轨道精炼和重去平:轨道参数选择 AUX_POE-ORB 精密星历,采用 3 次轨道精炼多项式估算轨道精炼和相位偏移量,消除斜坡相位,通过选择 GCP 点所有数据进行重去平。

4) 估算平均位移速率和 DEM 纠正:根据式

(3)、式(4)建立方程组并求解平均位移速率和 DEM 纠正,主要过程包括第 1 次估算平均位移和 DEM 纠正(通过大气相位消减和估算)、第 2 次估算平均位移和 DEM 纠正(时间序列和平均位移速率估算)。

5)地理编码:将上述生成的 LOS 方向的形变量都投影编码到 GCS-WGS-84 坐标系下的垂直方向。

3.2 结果分析

3.2.1 沉降速率分析

根据上述处理,获得了该煤矿的年平均沉降速率图(图 2),其中负值代表地面沉降,正值代表地面抬升,其中最大沉降速率为 -389 mm/a 。

从图 2 中可以看出一个明显的沉降漏斗,该沉降面积大约为 3.13 km^2 ,在监测时间段内,平均沉降速率在 $-30\sim-152\text{ mm/a}$ (即绿色区域)的面积为 2.51 km^2 ,约占沉降漏斗的 80.25% ,平均沉降速率在 $-152\sim-307\text{ mm/a}$ (即黄色区域)的面积为 0.33 km^2 ,约占沉降漏斗的 10.42% ,平均沉降速率在 $-307\sim-389\text{ mm/a}$ (即红色区域)的面积为 0.29 km^2 ,约占沉降漏斗的 9.33% ,可见沉降漏斗区域内,沉降速率大部分发生在绿色、黄色区域,该区域为沉降影响区域;而红色区域为活跃区域,该区域正处于开采或者刚开采完阶段。

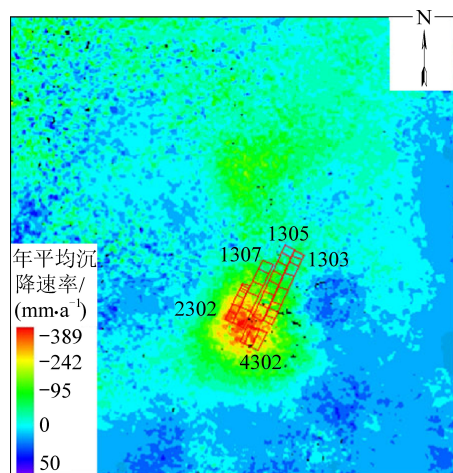


图 2 年平均沉降速率

Fig.2 Annual average settlement rate

5 个工作面都在这个沉降漏斗区域,其中最大沉降速率的区域在 1307 工作面,其沉降速率为 $-178\sim-389\text{ mm/a}$;2302 工作面的沉降速率为 $-239\sim-353\text{ mm/a}$;1305 工作面的沉降速率为 $-89\sim-345\text{ mm/a}$;4302 工作面的沉降速率为 $-251\sim-352\text{ mm/a}$;1303 工作面的沉降速率相对于前 4 个工作面是最小的,主要原因是其开采结束时间在本试验研究时段的前半年左右,并且该工作面的开采时间相对比较长,它的沉降速率为 $-90\sim-273\text{ mm/a}$,其南部沉降速率大的主要原因是受附近工作面开采的影响。

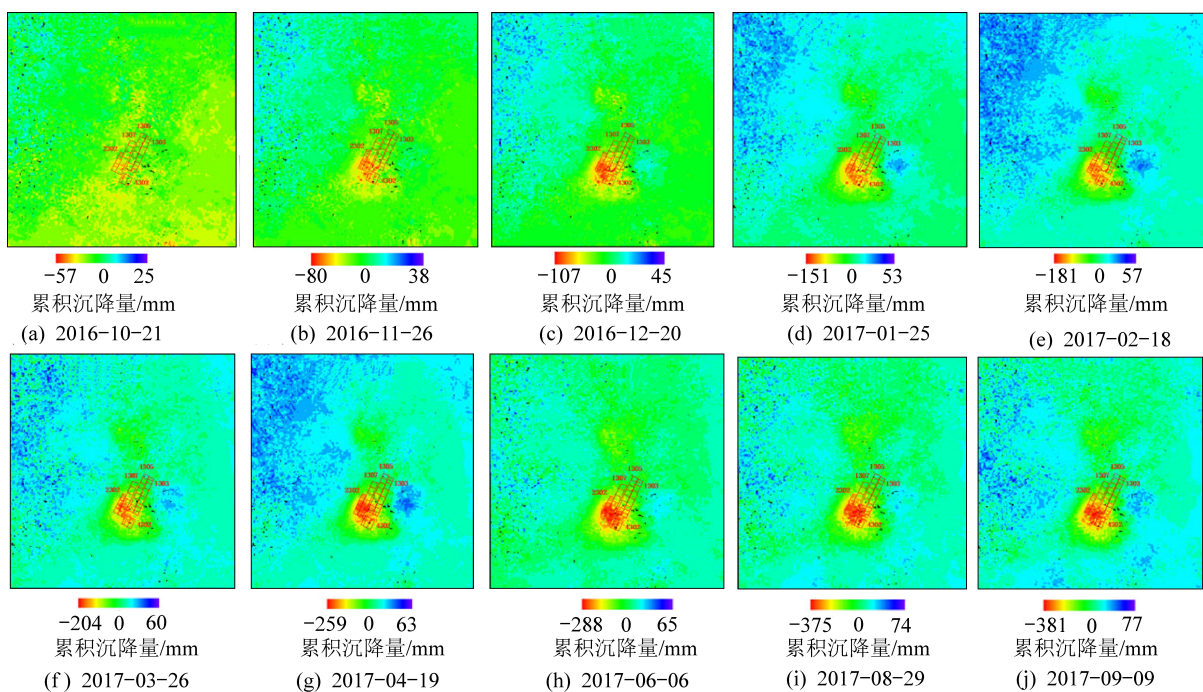


图 3 时序累计沉降量

Fig.3 Time series cumulative subsidence

3.2.2 时序累计沉降分析

以2016年9月27日为初始值的10幅时序累计沉降量如图3所示。从2016年9月到11月期间,2302工作面、1307工作面和1305工作面有明显的沉降,而1303和4302工作面没有明显的沉降现象,与工作面开采的时间吻合;从2016年11月之后,沉降区域逐渐增大,并且2302、1307和4302工作面的沉降量明显增加,1305、1303工作面的南部也有持续的沉降情况,主要原因有2点:①该工作面紧挨1307和4302工作面,这2个工作面在11月一直在开采,导致一定的沉降影响;②该工作面虽然已经开采结束,根据开采沉陷规律,开采深度在300~600 m,地表点移动时间为5年左右,所以有沉降情况是正常的。

每个月的整体沉降量都在增加,其中工作面2302、1307和4302在2017年3月到4月的沉降量有明显变化;直到2017年9月,2302工作面的沉降量为-110~-327 mm,4302工作面的沉降量为-165~-368 mm,这2个工作面几乎都处于沉降漏斗区域,从时序沉降量上来看,沉降情况还会持续一段时间;1307工作面的沉降量为-21~-381 mm,1305工作面的沉降量为5~-297 mm,1303工作面的沉降量为-17~-186 mm,预计1307和1305工作面的沉降趋势为北部的沉降量逐渐缩小,南部沉降量还会逐渐增大;1303工作面并没有达到稳定,沉降还在继续。

从沉降面积来看,发现沉降漏斗的面积一直在扩大,从2016年10月到2017年1月的沉降面积变化为0.4~1.21 km²,2017年1月到2017年3月沉降面积变化为1.21~1.90 km²,2017年3月到2017年9月的沉降面积变化为1.90~3.13 km²。

3.2.3 水准数据对比分析

为了了解工作面的沉降情况,收集到5期2302工作面走向观测线的水准数据,观测日期分别为2016-10-20、2016-12-10、2017-02-09、2017-05-21、2017-08-20,以2016-10-20为起始时间计算出水准点的累计沉降量,具体水准点分布如图4所示。

为了与水准数据对比分析,通过最邻近法选取对应的像素点,并且以折线形式绘出,如图5所示。

由图5可看出2302工作面南部沉降相对更活跃,由北到南其沉降量逐渐增加,而南部的沉降量差别不大,其中最大下沉点为A17,其最大下沉量为-372 mm,其最大沉降速率为-352 mm/a,与开采方

向是由北向南开采一致,所以形成了勺状沉降漏斗。发现像素点的沉降趋势与水准数据的沉降趋势一致。

为了对比同时期的单点精度,表2选择水准观测线的4期数据(2016-10-20、2016-12-10、2017-02-09、2017-08-20)与像素点数据进行误差分析。由表2可知:单点最大误差为24 mm,最大中误差为9.25 mm,符合DD2014-11《地面沉降干涉雷达数据处理技术规程》中的精度(10 mm)要求,证明SBAS-InSAR技术沉降监测精度可靠^[20]。

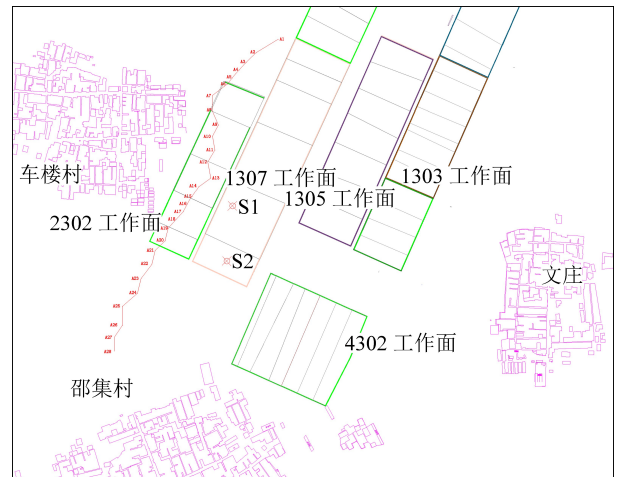


图4 观测线布设

Fig.4 Observation line layout

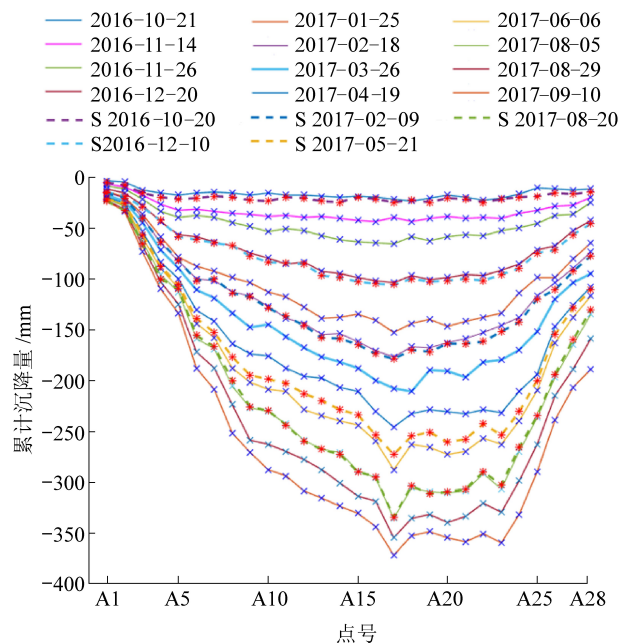


图5 2302工作面走向沉降对比

Fig.5 Comparison of dip subsidence in No.2302 working face

表 2 观测线时序沉降误差

Table 2 Observation line timing subsidence error

观测日期	单点最大 误差/mm	单点最小 误差/mm	平均误差/ mm	中误差/ mm
2016-10-20	13	1	5.39	7.07
2016-12-10	9	2	6.13	5.74
2017-02-09	24	2	9.47	9.25
2017-08-20	8	1	5.48	4.66

5 结 论

1) 采用 SBAS-InSAR 技术得到某煤矿内沉降漏斗的沉降速率, 发现 2302、1307、1305、1303 和 4302 工作面最大沉降速率分别为 353、389、345、273 和 352 mm/a。

2) 通过对各工作面的沉降速率和时序沉降量进行分析, 发现 1303 和 1305 工作面北部沉降量在减小, 南部沉降量还会增加; 而 4302、2302 和 1307 工作面还处于活跃期, 其沉降还会不断增加。

3) 通过对比分析 2302 工作面走向观测线的时序沉降量和水准监测数据, 发现最大中误差为 9.25 mm, 符合 DD2014-11《地面沉降干涉雷达数据处理技术规程》中的精度 (10 mm) 要求, 证明 SBAS-InSAR 技术沉降监测精度可靠。

参考文献 (References):

[1] 梁涛. 利用短基线集 InSAR 技术监测矿区地表形变[J]. 测绘通报, 2014(S1): 82-84.
LIANG Tao. Monitoring the surface deformation of mining area by using short baselines InSAR technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S1): 82-84.

[2] 汤伏全, 董龙凯, 王宗良, 等. 基于沉陷对称特征的近水平煤层开采 InSAR 三维位移反演模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 210-220.
TANG Fuquan, DONG Longkai, WANG Zongliang, et al. InSAR three-dimensional displacement inversion model of near-horizontal coal seam mining based on subsidence symmetry characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 210-220.

[3] 鲍金杰, 汪云甲. InSAR 测量技术在矿区地表沉降监测中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 96-99, 48.
BAO Jinjie, WANG Yunjia. Application of InSAR measurement technology in surface subsidence monitoring of mining area [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 96-99, 48.

[4] 刘晓菲, 邓喀中, 范洪冬, 等. D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 467-472.
LIU Xiaofei, DENG Kazhong, FAN Hongdong, et al. Test of D-InSAR monitoring residual deformation in old goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 467-472.

[5] 李强, 王继仁, 杨庆贺. 浅埋深煤层开采沉陷预测方法应用及研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 175-181.
LI Qiang, WANG Jiren, YANG Qinghe. Application and research

of prediction methods for mining subsidence in shallow buried deep coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 175-181.

[6] 刘沂轩, 耿智海, 杨俊凯, 等. 基于 SBAS 技术的概率积分法矿区沉降量提取模型[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 156-161.
LIU Yixuan, GENG Zhihai, YANG Junkai, et al. Extraction model of mining area settlement based on SBAS technology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 156-161.

[7] 周吕, 郭际明, 李昕, 等. 基于 SBAS-InSAR 的北京地区地表沉降监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016(9): 793-797.
ZHOU Lyu, GUO Jiming, LI Wei, et al. Monitoring and analysis of surface subsidence in Beijing based on SBAS-InSAR [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016(9): 793-797.

[8] CARNEC C, DELACOURT C. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry near Gardanne, France [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43(1): 43-54.

[9] 刘志敏, 李永生, 张景发, 等. 基于 SBAS-InSAR 的长治矿区地表形变监测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 37-42.
LIU Zhimin, LI Yongsheng, ZHANG Jingfa, et al. Surface deformation monitoring in Changzhi mining area based on SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 37-42.

[10] 张艳梅, 王萍, 罗想, 等. 利用 Sentinel-1 数据和 SBAS-InSAR 技术监测西安地表沉降[J]. 测绘通报, 2017(4): 93-97.
ZHANG Yanmei, WANG Ping, LUO Xiang, et al. Monitoring surface subsidence in Xi'an using Sentinel-1 data and SBAS-InSAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(4): 93-97.

[11] 冯文凯, 顿佳伟, 张国强, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J/OL]. 工程地质学报: 1-9 [2020-04-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-411>.
FENG Wenkai, DUN Jiawei, ZHANG Guoqiang, et al. Deformation analysis of giant old landslide in Wuda Village of Jinsha River Basin based on SBAS-InSAR technology [J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1-9 [2020-04-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-411>.

[12] 朱猛, 董少春, 尹宏伟, 等. 基于 SBAS-InSAR 方法的苏州地区 2007—2010 年地表形变时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10): 1418-1427.
ZHU Meng, DONG Shaochun, YIN Hongwei, et al. Spatial and temporal variations of surface deformation in Suzhou area from 2007 to 2010 based on SBAS-InSAR method [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(10): 1418-1427.

[13] 郭乐萍, 岳建平, 岳顺. SBAS 技术在南京河西地表沉降监测中的应用[J]. 测绘通报, 2017(3): 26-28, 41.
GUO Leping, YUE Jianping, YUE Shun. Application of SBAS technology in surface settlement monitoring in Hexi, Nanjing [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(3): 26-28, 41.

[14] 汪磊. 基于 SAR 技术的矿区大梯度形变时序监测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

[15] 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.
- LI Da, DENG Kzhong, GAO Xiaoxiong, *et al.* Monitoring and analysis of surface settlement in mining area based on SBAS-InSAR[J]. Journal of Wuhan University(Information Science Edition), 2018, 43(10): 1531-1537.
- [16] 张晓博, 赵学胜, 葛大庆. 基于 Sentinel-TOPS 模式 Stacking 技术监测淮南矿区沉降[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 200-205.
- ZHANG Xiaobo, ZHAO Xuesheng, GE Daqing. Monitoring the settlement of Huainan mining area based on Sentinel-TOPS model stacking technology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(4): 200-205.
- [17] PAOLOB, GIANFRANCOF, RICCARDOL, *et al.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [18] 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 Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Investigation and research progress of InSAR deformation monitoring[J]. Acta Geochimica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [19] 华怡颖, 胡晋山, 康建荣, 等. 基于 SBAS-DInSAR 的大宁矿区多工作面开采地表沉降规律研究[J]. 金属矿山, 2020(3): 177-183.
- HUA Yiyang, HU Jinshan, KANG Jianrong, *et al.* Research on ground subsidence law of multi-face mining in Daning mining area based on SBAS-DInSAR [J]. Metal Mine, 2020(3): 177-183.
- [20] 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 Xijiang, WANG Bin, ZHANG Zaiyan. Monitoring and analysis of surface subsidence in Hegang mining area based on SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2019, 29(1): 66-70.