

基于 SBAS-InSAR 技术的巨野煤田沉降监测^①

Irfan Ahmed Soomro^② 范宇宾 郭唯娜 柯长青

(南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023)

摘 要 矿产资源过度开采极易诱发地面塌陷等地质灾害,对矿区的生产生活造成了严重的威胁。采用 2017 年 5 月至 2018 年 11 月 21 景 Sentinel-1A 数据,设置时间基线(365 d)和空间基线(2371 m)并生成连接图,采用小基线集技术(SBAS)对生成的影像对进行干涉处理,通过生成的干涉相位进行地面沉降的参数反演,获取了巨野煤田的形变场和监测点的形变序列。结果发现,巨野煤田发生 24 mm 以上地面沉降的区域面积占比高达 87.12%,而郭屯矿区的地面沉降最为严重,中心沉降量超过 70 mm,年沉降速率达到 45 mm/a。巨野煤田的地面沉降由自然和人为因素造成,其中人为煤炭开采和地下水的过量使用是主要原因。与水准测量的对比结果表明,二者沉降监测的总体趋势吻合。该项研究工作表明,小基线集雷达干涉测量(SBAS-InSAR)技术可以很好地应用于矿区沉降的监测,为合理开采矿产资源和矿区环境保护提供参考依据。

关键词 小基线集雷达干涉测量(SBAS-InSAR);煤炭开采;矿区沉降;巨野煤田

0 引 言

地下矿藏开采引发的矿区地表形变问题破坏了矿区的地质结构,容易诱发不同程度的地质灾害^[1]。传统地表监测手段以点为监测要素,监测点难以保存,难以开展长时间序列的观测,且获取矿区整体的空间沉降分布较为困难^[2],影响了监测的效率。而合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)由于获取地表高程信息不受天气和时间的影响,可以对形变进行长时间序列、大范围的空间监测,并提高监测的空间分辨率,被广泛应用于监测各种因素造成的地面形变^[3-4]。

合成孔径雷达差分干涉测量技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)在 InSAR 基础上利用相位信息,从干涉条纹上提取地物的微小形变,其对垂直方向的形变极为敏感,能够将监测精度提升至毫米级^[5],与水准测量精度保持

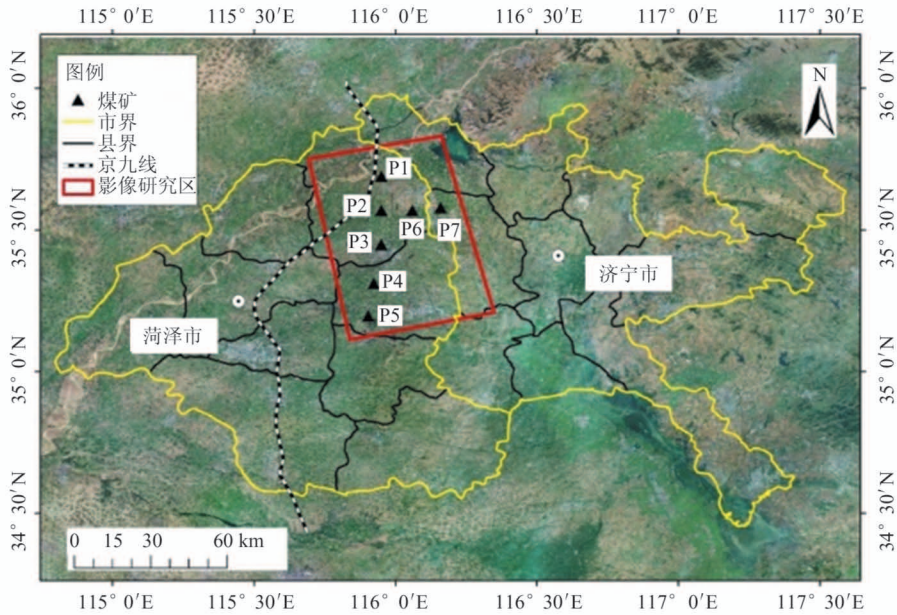
一致,但数字高程模型(digital elevation model, DEM)精度、轨道误差和大气延迟误差是 D-InSAR 技术形变监测的主要误差源^[6]。矿区地形条件复杂,因此地表沉降具有沉降速率快和梯度大的特点^[7], D-InSAR 技术监测矿区地面沉降存在一定的局限性,而小基线集雷达干涉测量(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)^[8]选择多幅影像作为主影像,通过高相干点建立的线性模型减小误差值,最终获得时间序列形变信息^[9],削弱了空间失相干的影响,减少了对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像数量的限制,为矿区沉降的时序分析能力提供了新技术。InSAR 技术的提升与高分辨率 SAR 影像的出现提高了地表微小形变的监测能力^[10]。不同波长的传感器在地表形变中有着不同的监测能力, X 波段成像周期短,沉降监测实时性强^[11]。L 波段波长较长,更容易监测到沉降梯度和沉降量较大的地面沉降,而 C 波段对微小的地面形变更为敏感^[12]。

① 国家自然科学基金(41830105)资助项目。
② 男,1988 年生,硕士生;研究方向:遥感研究;联系人, E-mail: geographerirfan@gmail.com
(收稿日期:2020-03-20)

山东省巨野煤田矿区处于菏泽市与济宁市交界地区,较大的开采强度导致了生态和地质问题^[13],地表形变的监测成为合理开采矿产资源的关键问题。因此,为了对巨野矿区地表形变进行监测分析,采用 C 波段的 Sentinel-1A 数据,运用 SBAS-InSAR 技术获得巨野矿区的地面沉降空间分布,通过 7 个井田监测点的时间序列探究形变随时间和季节变化的趋势,并与当地水准测量数据进行比对,验证 SBAS-InSAR 方法的精度,最后分析矿区地面沉降的原因。

1 研究区

山东省西南部的巨野煤田,是目前华东地区埋藏最深、探明储量最多、集中开采面积最大的整装优质煤田^[14]。按照行政区划巨野煤田包括菏泽市巨野矿区(面积为 960 km²)和济宁市梁宝寺矿区(面积为250 km²)。根据断层构造,巨野矿区可从南到北分为 5 个煤矿,即万福、龙垌、赵楼、郭屯和郓城;梁宝寺矿区可从西向东分为 2 个煤矿,即彭庄煤矿和梁宝寺煤矿(图1)。7个井田可开采储量超过



(P1 郓城煤矿;P2 郭屯煤矿;P3 赵楼煤矿;P4 龙垌煤矿;P5 万福煤矿;P6 彭庄煤矿;P7 梁宝寺煤矿)

图1 巨野煤田位置图

170 000 万吨,年生产能力达到 1800 万吨,其中龙垌、郓城和郭屯煤矿年开采量均大于 200 万吨^[15]。巨野煤田地势平坦、交通便利,开发以来促进了周边区域的发展,但由于处于山东震源地边缘,地震活动强烈,地壳稳定性较差。同时,巨野煤矿的复杂地质类型造成区域岩层脆弱,易诱发地面沉降灾害^[16]。

2 数据与方法

2.1 数据

Sentinel-1A 是欧洲航天局发射的 C 波段雷达卫星,中心频率为 5.405 GHz,重访周期为 12 d,该系

统支持多种极化方式和成像模式。文中所用的干涉宽幅模式(interferometric wide swath, IW)方位向和距离向分辨率分别为 5 m 和 20 m,幅宽超过250 km,其使用递进的条带扫描的方式获取 3 个子条带,进而合并成一景图像,其特殊的成像方式使其适合于大规模沉降监测。使用 2017 年 5 月至 2018 年 11 月的 21 景 IW SLC 数据进行 SBAS-InSAR 分析,极化方式为 VV 极化,均为升轨,数据详细参数如表 1 所示。

SRTM DEM 数据通过 C 波段和 X 波段的干涉对进行干涉处理获得,覆盖了全球 80% 的地区。通过投影分别将水平基准和垂直基准转换为 WGS84

表 1 用于 SBAS-InSAR 分析的 Sentinel-1A 数据

编号	成像日期	编号	成像日期	编号	成像日期
1	20170520	2	20170613	3	20170731
4	20170824	5	20170917	6	20171023
7	20171116	8	20171210	9	20180103
10	20180127	11	20180220	12	20180328
13	20180421	14	20180515	15	20180608
16	20180702	17	201807/26	18	20180819
19	20180912	20	20181006	21	20181111

和 EGM 96,是现在最常用的 DEM 数据^[17]。采用 SRTM DEM(version4)用于去除地形造成的相位贡献,空间分辨率约为 90 m。

水准测量数据来源为《郭屯煤矿地质环境治理与土地复垦方案》(图 2),将其处理成年平均沉降速率,用于验证 InSAR 监测结果的准确性。

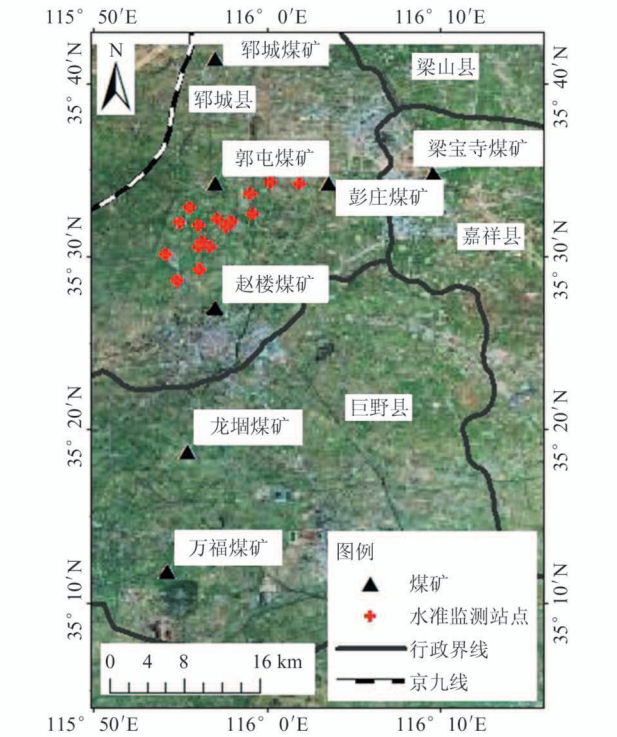


图 2 郭屯矿区水准监测站点分布

2.2 方法

SBAS-InSAR 技术将影像分成若干个不同的集合,通过设置时间和空间基线的长度来提高目标识别率,并利用大气扰动的特征消除大气相位误差,使得数据集没有时间相关性,仅有空间相关性。SBAS-InSAR 技术的处理流程包括以下几个步骤^[18]

(见图 3)。(1)设置合适的时空基线,生成小基线集干涉对。(2)根据生成的干涉对进行干涉处理,通过去平和去除地形相位生成干涉相位信息。(3)通过选取的控制点进行轨道精炼。(4)地面沉降的参数反演,通过去除大气延迟的影响生成地表形变的时间序列。

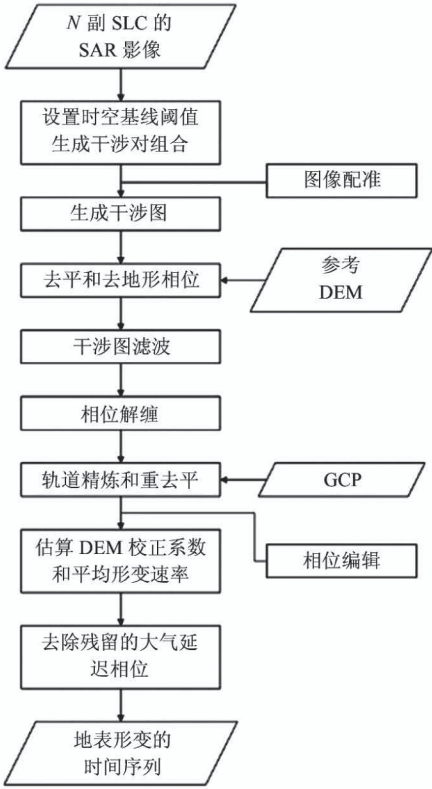


图 3 SBAS-InSAR 技术算法流程

采用瑞士 Sarmap 公司开发的 ENVI SARscape 模块对数据进行处理,使用 SBAS-InSAR 技术分析巨野煤田的沉降^[19]。经 SARscape 计算,临界空间基线为 5270 m,将空间基线设置为临界基线的 45% (2371 m)并且时间基线设置为 365 d,能保证有足够的干涉对,同时又有较好的干涉效果^[20]。获得垂直基线分布图如图 4 所示。

基于连接图,将每一幅影像配准到主影像上,然后进行干涉操作。将干涉结果较差的影像对剔除。根据 DEM 数据对结果精炼,人工选取稳定点作为地面控制点(ground control point, GCP)用于轨道校正和绝对定标,地形误差和大气扰动误差通过地表形变反演消除,经过地理编码后获得巨野煤田的累积沉降量和年沉降速率。

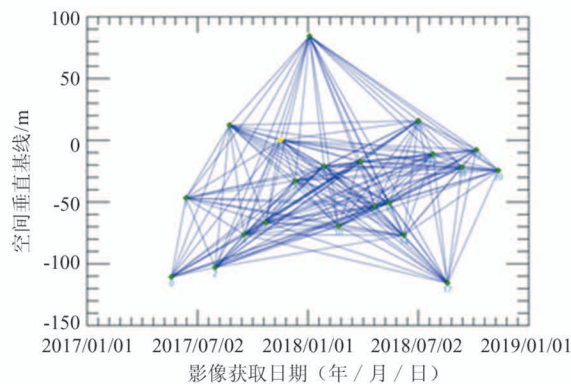


图 4 Sentinel-1A 数据垂直基线分布图

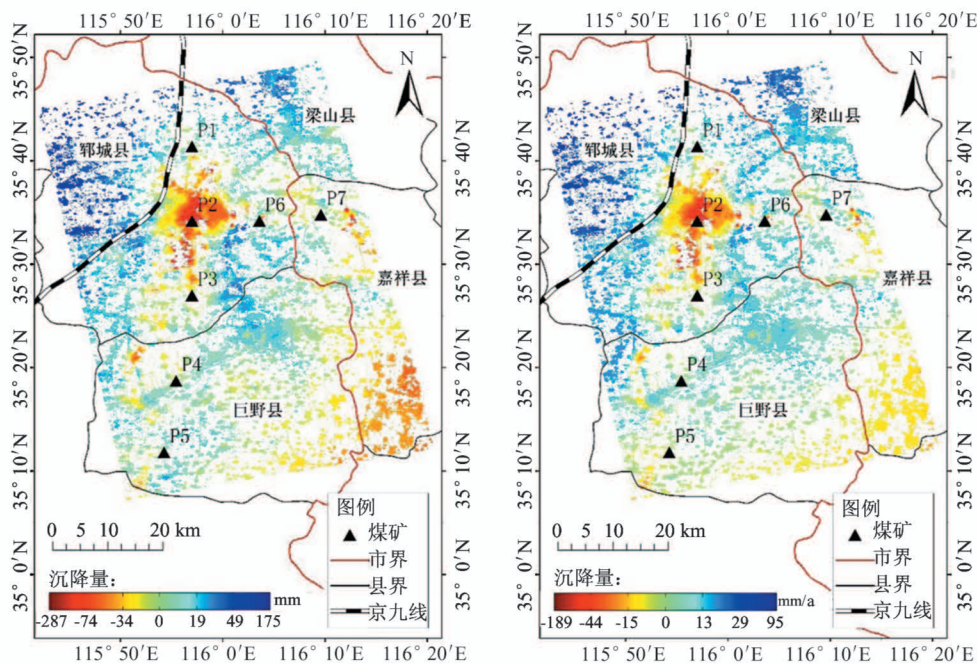


图 5 巨野煤田累积沉降与沉降速率

斗。沉降最为明显是郭屯煤矿(P2),累计沉降量达到 70 mm,沉降速率达到 45 mm/a。与 P2 邻近的郓城煤矿(P1)、彭庄煤矿(P6)和赵楼煤矿(P3)沉降量也较为显著,4 个煤矿累积沉降值均达到40 mm。万福煤矿(P5)由于开发时间较短,沉降值较小。与此同时,赵楼煤矿东部出现地面抬升现象,地面抬升速率约为 13 mm/a。

4 讨论

4.1 地面沉降的空间和时间规律

通过进一步分析 2017 年 5 月至 2018 年 11 月 7 个监测点的形变时间序列(图 6),结果表明沉降量

3 结果

将 21 景 Sentinel-1A 影像数据经过 SBAS-InSAR 处理,得到 2017 年 5 月至 2018 年 11 月整个巨野矿区沉降特征和演变过程(见图 5),其中负值表示地表发生塌陷,正值表示地表发生抬升。

总体而言,巨野煤田的地面沉降特征较明显,累计沉降量与沉降速率分布类似,沉降现象以不同煤矿为中心,四周沉降值降低,形成了明显的沉降漏

虽呈现小幅波动,监测点呈现明显的沉降特征,郭屯煤矿和彭庄煤矿的中心点累计沉降量均达到了 70 mm,其余中心点沉降量也在 25 mm 以上,并且赵楼和彭庄煤矿的沉降速率随着时间推移有着加剧的趋势。另一方面,嘉祥以西区域为地壳相对上升区,因此出现了一定的地面回弹。其原因可能是研究时段是研究区的丰水期,地下水的补给使得水位抬升,从而沉降率降低。另一方面,嘉祥以西区域为地壳相对上升区,因此出现了一定的地面回弹。就季节变化而言,研究区在 2-10 月发生持续沉降,当年最大沉降量发生在 10 月,而 10 月后出现小幅回弹,回弹值在 2 月达到最大值,然后开始新的沉降累

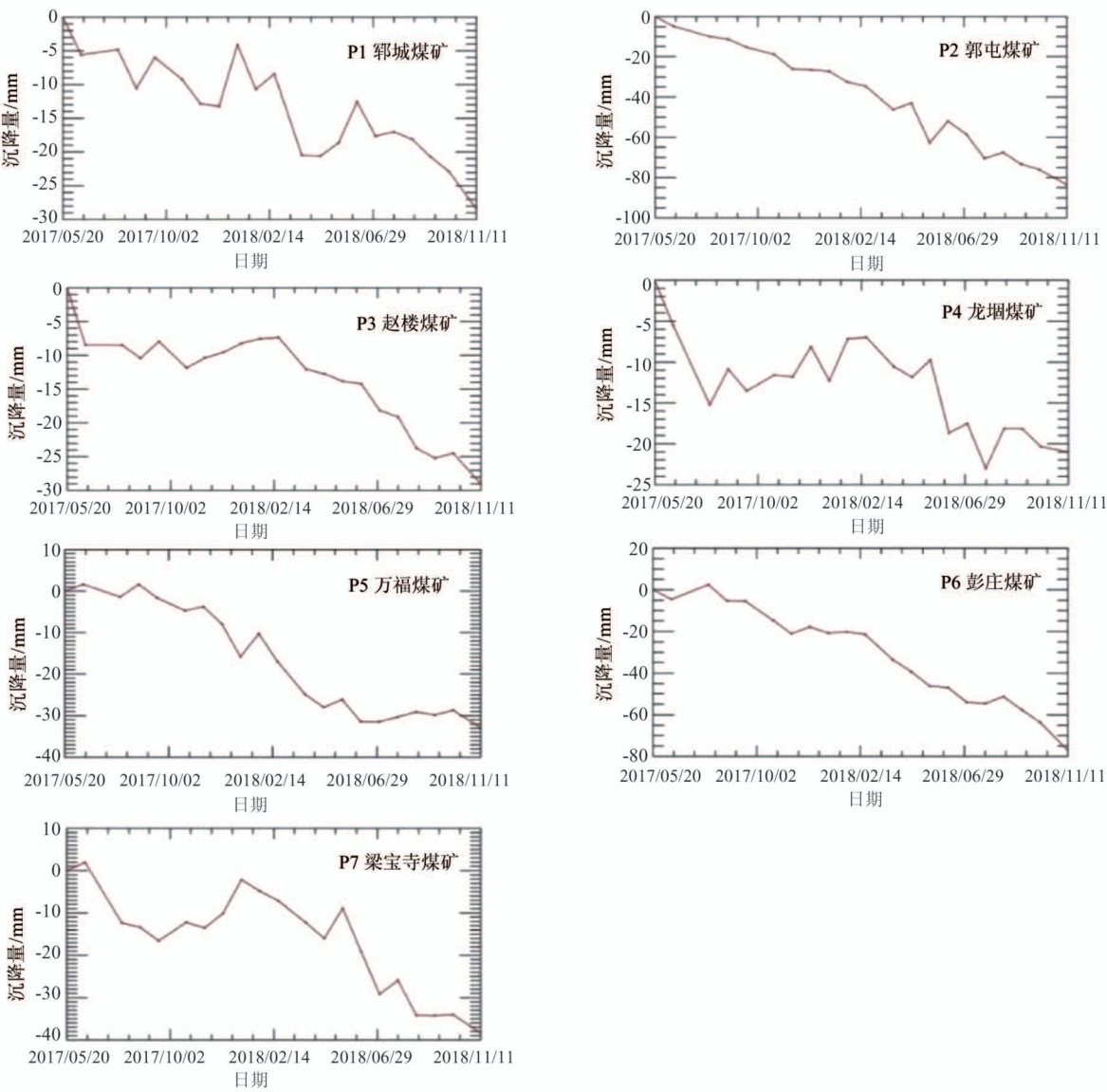


图 6 巨野煤田目标监测点时间序列沉降特征

积时期,该现象在郓城煤矿和梁宝寺煤矿尤为明显。

对发生地面沉降现象的区域进行了统计,得到巨野煤田地面沉降程度统计表(见表2)。2017年

5月至2018年11月,巨野煤田受到地面沉降灾害的土地总面积高达141.51 km²。值得注意的是,有87.12%的土地在监测时间段内累积沉降超过了24 mm,进一步表明矿区沉降灾害的严重程度。

表 2 巨野煤田地面沉降程度统计表

沉降量/mm	累积沉降面积/km ²	在发生沉降现象的土地中所占比例/%
0 ~ 8	4.20	2.96
8 ~ 24	14.03	9.92
24 ~ 45	25.98	18.36
45 ~ 67	25.70	18.16
67 ~ 98	37.77	26.69
98 ~ 287	33.83	23.91

4.2 地面沉降监测精度验证

选取沉降最明显的郭屯煤矿为验证区域,采用 LALA’ 与 LBLB’ 两条不同方向的水准观测路线(图7),将距离最近的 SBAS-InSAR 监测点作为监测值,与水准测量结果分别计算年平均沉降值,对 InSAR 获取的地面沉降数据进行精度验证(图8)。

两条水准路线上 InSAR 与水准测量结果具有变化一致的趋势,两者也有细微差异。首先水准监

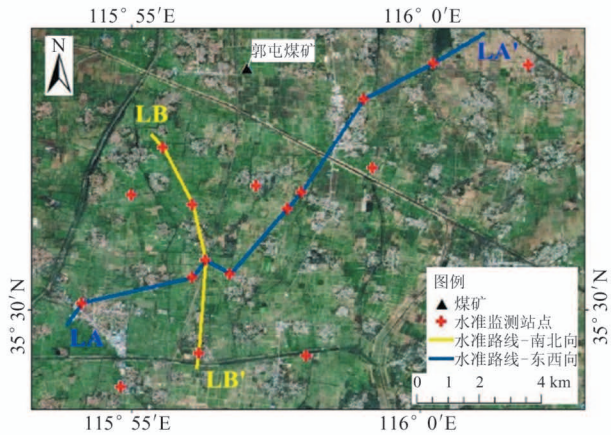
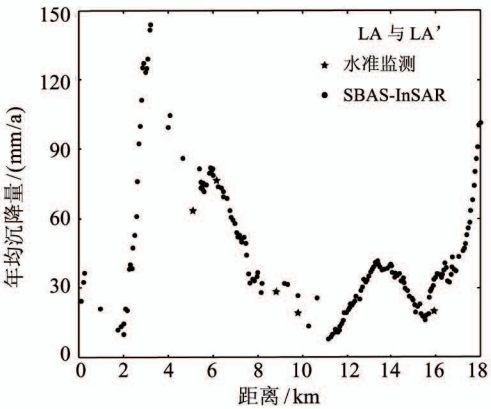


图 7 郭屯煤矿水准路线示意图



测数据的获取时间与 InSAR 地面沉降监测值的时间并不匹配。其次,C 波段雷达相比 L 波段等 SAR 数据,其波长穿透性弱,干涉条纹集中,降低了长时间序列地面沉降的监测精度。最后,水准测量是基于点的测量,而 InSAR 地面沉降监测值是基于像元的测量,两者的分辨率并不一致,两者之间进行比较会存在一定的误差^[21]。

4.3 矿区沉降原因

随着采空区的扩张,巨野矿区采空区与煤柱的岩梁受力不同,因此岩层向地表方向移动,进而导致地表倾斜沉降盆地的形成,诱发了地面塌陷灾

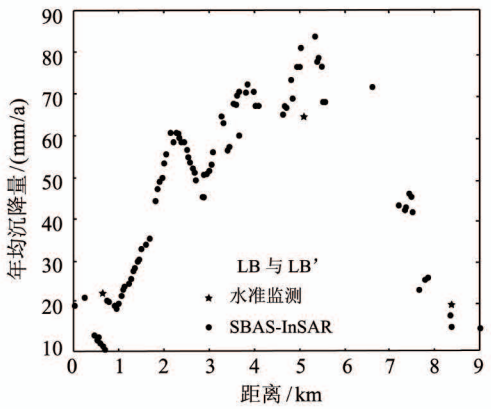


图 8 InSAR 与水准监测结果比较

害^[22]。而覆盖层厚度、平均工作宽度、开采厚度、开采宽度/厚度比、岩体等级和岩层强度的不同,造成地面沉降量的差异^[23]。同时,矿区的开采需要大量水资源,而大量开采地下水导致了地层的液压降低^[24],雨水及河流径流补给能力差也是产生地面沉降的原因。

5 结 论

本文采用 SBAS-InSAR 技术对巨野煤田的时空沉降特征进行了分析,获得了矿区的形变空间分布图和监测点的时间序列。选择沉降状况最为严重的郭屯煤矿作为验证区,通过与地面水准测量数据相比较,得出以下结论。(1) 2017 年 5 月至 2018 年 11 月地面沉降较大,有 123.28 km² 的土地发生了 24 mm 以上的地面沉降。其中,最大沉降量出现在

郭屯煤矿,中心沉降量可达 70 mm,中心沉降速率可达 45 mm/a。同时,在郓城、彭庄和赵楼煤矿形成了较为明显的沉降漏斗,中心沉降量超过 30 mm。随着时间推移,沉降速率有加剧的趋势,且煤矿开发时间越长,地面沉降现象越严重。(2) 研究区的地面沉降存在季节变化,研究区在 2 - 10 月处于沉降累积期,当年最大沉降量发生在 10 月,而 10 月后出现小幅回弹,回弹值在 2 月达到最大值,然后开始新的沉降累积。(3) 与水准监测进行对比发现,两者的变化趋势一致,误差均在 5 mm 以内,证明 SBAS-InSAR 的矿区沉降监测有着较高的可靠性。

在利用 SBAS-InSAR 技术对矿区地面塌陷的研究中,由于不同波长的 SAR 数据具有各自监测地面沉降的优势,通过融合不同的数据源不仅可以进行数据的相互验证,同时也能提高监测精度。另外,由于缺乏对应时间段内的矿区开采量等信息,难以对

开采量和形变量建立合适的关系模型,定量分析地面沉降和矿物开采的关系,这也是未来研究的方向。

参考文献

- [1] 白泽朝. Sentinel-1A 数据 DInSAR 地表形变监测研究与实践[D]. 郑州:解放军信息工程大学地理空间信息学院, 2017: 9-12
- [2] Ji M W, Li X J, Wu S C, et al. Use of SAR interferometry for monitoring illegal mining activities: a case study at Xishimen Iron Ore Mine[J]. *Mining Science and Technology*, 2011, 21(6): 781-786
- [3] Xie H, Oommen T, Zhong L, et al. Consolidation settlement of Salt Lake County tailings impoundment revealed by time-series InSAR observations from multiple radar satellites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 199-209
- [4] 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
- [5] 陈艳玲, 黄城, 丁晓利, 等. 星载 SAR 干涉技术最新研究进展[J]. 天文学进展, 2006, 24(4): 296-307
- [6] 种亚辉, 董少春, 胡欢. 基于时序 InSAR 技术的常州市地面沉降监测与分析[J]. 高校地质学报, 2019, 25(1): 131-143
- [7] 全云霄, 黄岩, 陈宇, 等. D-InSAR 矿区地表沉降监测及时空分析[J]. 测绘科学: 2020, 45(3): 67-73
- [8] Xu B, Feng G, Li Z, et al. Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: a case study of Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 652
- [9] 陈炳乾. 面向矿区沉降监测的 InSAR 技术及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学环境与测绘学院, 2015: 9-10
- [10] 王延霞, 史照良, 曹敏, 等. 基于短基线子集(SBAS)干涉技术的地表时序沉降估计[J]. 高校地质学报, 2014, 20(2): 333-340
- [11] Wempen J M, Mccarter M K. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(1): 159-163
- [12] 陶秋香, 刘国林, 刘伟科. L 和 C 波段雷达干涉数据矿区地面沉降监测能力分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3681-3689
- [13] 周传义, 王志伟, 王珂, 等. 基于 ALOS 数据的济宁矿区地表沉降监测与分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 43-45
- [14] 张辉, 丁姗姗. 巨野煤田深部资源开采灾害防治途径[J]. 煤炭工程, 2013, 45(S2): 112-113, 116
- [15] 滕德宾. 巨野特大型煤田生态地质环境综合评价研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2011: 37-40
- [16] 卜华, 吴晓华, 孙英波. 山东巨野矿区环境地质背景[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 90-94
- [17] Zhang K Q, Gann D, Ross M, et al. Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 290-306
- [18] Goldstein R. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 22(18): 2517-2520
- [19] 朱煜峰. 矿区地面沉降的 InSAR 监测及参数反演[D]. 长沙: 中南大学地球科学与信息物理学院, 2013: 35-39
- [20] 赵佳曼, 柯长青, 陆燕燕, 等. 小基线集雷达干涉测量在无锡地面沉降监测中的应用[J]. 高技术通讯, 2018, 28(6): 508-519
- [21] 张金芝. InSAR 技术在地面沉降监测中的应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学测绘科学与工程学院, 2011: 39-42
- [22] Yan W T, Chen J J, Yan Y G. A new model for predicting surface mining subsidence: the improved lognormal function model[J]. *Geosciences Journal*, 2019, 23(1): 165-174
- [23] Hay-Man N A, Ge L L, Yan Y G, et al. Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia[J]. *Engineering Geology*, 2010, 115(1): 1-15
- [24] 方晓. 基于 D-InSAR 技术的济宁地区地面沉降监测研究[D]. 西安: 长安大学地球科学与国土资源学院, 2015: 69-73

Surface subsidence monitoring in Juye coalfield based on SBAS-InSAR technology

Irfan Ahmed Soomro, Fan Yubin, Guo Weina, Ke Changqing

(School of Geographic and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023)

Abstract

Excessive exploitation of mineral resources can easily induce ground deformation and other geological disasters, which poses a serious threat to the production and lives of the mining area. 21 Sentinel-1A scenes from May 2017 to November 2018 are adopted, then a connection chart is generated by setting the temporal (365 d) and spatial (2371 m) baselines. Based on this, the image pairs are interfered by small baseline subset (SBAS) technique. The parameters of land subsidence are inverted through the generated interferometric phase, and the deformation field and point monitoring sequence of the Juye coalfield are obtained. The results show that the cumulative settlement over 24 mm occurs in 87.12% of the land in Juye coalfield, and the maximum land subsidence occurs in Guotun coal mine, the settlement rate is 45 mm/a and the cumulative settlement is more than 70 mm. The land subsidence in Juye coalfield is caused by natural and human factors, of which the exploitation of coal mine and the overuse of groundwater are the main reasons. Compared with the leveling data, the overall trend of subsidence monitoring is consistent, which demonstrates that the surface deformation monitoring results based on the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) method are reliable. It provides a reference basis for rational exploitation of mineral resources and environmental protection in mining areas.

Key words: small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR), exploitation of coal mining, subsidence of the mining area, Juye coalfield