利用哨兵卫星 SAR 影像数据监测 西安地铁沿线地面沉降

陈玉倩,伍吉仓*,宋瑞庆,宋鑫友,许正文

(同济大学 测绘与地理信息学院,上海 200092)

摘要:本文利用 79 景哨兵-IA(Sentinel-IA)卫星 IW 模式升轨数据,采用时序 InSAR 技术,对西安 地铁 2 号线、4 号线部分区段及其周边地区进行沉降监测。结果表明,2018 至 2020 年间,西安地 铁 2 号线凤栖原站附近沉降最为明显,最大视线向形变速率达到-18.4mm/a;西安地铁 4 号线飞 天路站、曲江池西站附近也有较显著的地面沉降,视线向形变速率分别为-7.9mm/a、 -7.0mm/a;西安电子城沉降中心的视线向形变速率为-8.0mm/a。结合研究区域经济发展状况、 人口密度和产业分布,分析沉降主要原因为城市地下取水,可以采取合理开采地下水、人工回灌 地下含水层等措施减缓地表沉降速率。

关键词: 沉降监测; 西安地铁; Sentinel-1A; 时序分析 中图分类号: P237 文献标识码: A

Monitoring ground subsidence along Xi´an metro line using Sentinel satellite SAR images

Chen Yuqian , Wu Jicang , Song Ruiqing , Song Xinyou , Xu Zhengwen (College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: In this paper , we use 79 S1A ascending data and multi-temporal InSAR technique to monitor the displacement of some sections of Xi´an Metro Line 2 , Line 4 and its surrounding areas. The research results show that from March 2018 to October 2020 , the settlement near Fengqiyuan of Xi´an Metro Line 2 is the most obvious , and the maximum line-of-sight velocity reaches – 18.4mm/a. There are also significant ground displacements near Feitian Road and Qujiangchixi on Xi´an Metro Line 4 , and the line-of-sight deformation rate is –7.9mm/a and –7.0mm/a respectively. At Xi´an Electronic City , there is an settlement center , its line-of-sight deformation rate is –8.0mm/a. Combined with the study of regional economic development , population density and industrial distribution , the main cause of subsidence is the overexploitation of groundwater. Measures such as rational exploitation of groundwater and artificial recharge of underground aquifers can be adopted to slow down the rate of surface subsidence. **Key words**: deformation monitoring; Xi´an metro; Sentinel-1A; time series analysis

0 引言

地铁大部分路段为地下线和地下车站,面临着 地表形变,塌陷等问题,有可能造成人员伤亡及财 产损失。因此,在地铁建造及运营期间,地铁及其 沿线地区亟需进行长期、连续、大面积、高精度的 形变监测。传统的形变监测技术,如 GNSS 和精密 水准测量需耗费大量的人力物力,难以获得大面积 连续形变时间序列,且 GNSS 技术受限于布点密度, 沉降监测的空间分辨率低。D-InSAR^[1]技术虽然有 大范围和高空间分辨率的优势,但受限于时空失相 干和大气延迟误差影响^[2],形变监测精度不高,为

- 收稿日期: 2022-02-19; 修订日期: 2022-04-23
- 基金项目:国家自然科学基金(42074022);上海市"科技 创新行动计划"科技攻关项目(20dz1201200); DAAD Thematic Network Project (No. 57421148).
- 作者简介:陈玉倩(1997-),女(汉族),河南洛阳人,硕士.
- 通讯作者:伍吉仓(1963-),男(汉族),安徽无为人,博
 士,教授,E-mail: jcwu@tongji.edu.cn.

此研发了时序 InSAR 处理技术。

本文使用 2018 年 3 月至 2020 年 10 月共 79 景 S1A 升轨 SAR 影像数据,在不假定形变模型的情况 下,对西安地铁 2 号线、4 号线部分区段及其周边 地区进行沉降监测,并对沉降结果进行分析。

1 数据处理方法

SNAP 是欧空局研制的一款针对哨兵卫星的遥 感数据处理软件,可用于获取干涉相位序列,结合 StaMPS^[3]可以实现时序分析。时序 InSAR 在极大程 度上降低了时空失相干和大气延迟的影响,且能够 提供大面积、高精度、高空间分辨率的形变时间序 列。下面简述该方法处理流程和基本原理:

(1) 干涉图生成。对影像进行分割,选择覆盖研究区域的条带,利用 SNAP 软件自动下载卫星精密轨道和研究区域 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM 数据。根据时空基线优选主影像,并基于轨道信息和 DEM 信息,利用"接缝线"处的相邻 burst 之间重叠区域的信息进行精密配准。根据 burst 的零多普勒时间(Zero Doppler Time) 去除 burst 之间的"接缝线"。基于研究区域的经纬度,根据像素坐标进一步裁剪无缝拼接后的影像。将主影像与从影像进行复共轭相乘,得到干涉图^[4,5];

(2)时序分析。基于振幅离散度初步选点。与永 久散射体干涉测量(Persistent Scatterer Interferometry, PSI)方法^[6]相比,为使选择的像素子集尽可能包含 数据集中所有 PS 像素,本文采用更高的振幅离散 度阈值。分离空间相关和空间不相关相位,去除仅 在干涉图子集中保持相位稳定的像素和由相邻 PS 像素中的散射体导致的像素点。使用 GACOS 数据 (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) 计算每景影像获取时刻的大气相位^[7],去除 对流层噪声。去除空间不相关地形误差及主影像对 其余空间不相关相位的贡献值,然后进行相位解 缠。使用时间域低通滤波估计辅影像的空间相关大 气和轨道误差(Atmosphere and Orbit Error, AOE) 相 位,时间域高通滤波估计主影像的空间相关大气和 轨道误差相位及空间相关地形相位,得到形变 相位。

2 实验数据处理与结果分析

2.1 研究区概况及数据源

研究区域如图 1 所示,其中 P1~P6 为沉降区 域的 6 个具有代表性的点,左侧线条为西安地铁 2 号线一期工程南段(会展中心站至韦曲南站),运营 时间约为 7 年,右侧线条为地铁 4 号线大唐芙蓉园 站至航天新城站,运营时间约为 3 年。两条地铁线 穿越西安市独有的地裂缝^[8,9],且客流量大,线路 周边高层建(构)筑物密集,交通繁忙。该研究区域 覆盖面积为 2111km²,地质条件复杂,存在长期的 地下水超采现象,对其开展沉降监测具有重要 意义。



Fig. 1 Overview of the study area

本文使用 2018-3-24 至 2020-10-27 的 79 景 Sentinel-1A 影像作为数据源, 79 景影像的时空基线 图如图 2 所示。哨兵 1 号空间基线控制得较好,根 据时间基线选择主影像日期为 2019 年 6 月 23 号。 从图 2 可以看出,空间基线最大为 125.2m,时间 基线最大为 492d。

2.2 地表沉降数据处理与分析

2.2.1 沉降分析

Sentinel-1A 有三个条带和两种极化方式(VH 和

VV),实验选择第二个条带(IW2),同极化(VV)的



数据,结合第1章数据处理的原理与方法,得到干 涉图。设置振幅离散度阈值为0.4,迭代计算每 幅干涉图中每个候选点的 γ 值,结合每个候选点的 振幅离散度和 γ 选择得到 214891 个 PS 点,平均每 平方公里 1018 个 PS 点。数据处理得到每米垂直基 线的最大空间相关 DEM 误差相位值为 0.06rad/m; 主影像轨道和大气误差相位最大值为 4.2rad。

PS 点视线向形变速率计算结果如图 3 所示, 图 3 (a) 为研究区域视线向形变速率,(b)、(c)、 (d)、(e)为(a) 的局部放大图。结果表明: PS 点 分布在人工建筑物多的地方,视线向形变速率以所 有像素的平均速率为参考。图 3 (b)表明形变最严 重的地区位于地铁二号线凤栖原站两侧,视线向形 变速率最大达到-18.4mm/a。





为进一步分析形变结果,在图 3 视线向形变显 著的区域选择 P1~P6 共 6 个点,绘制其位移时间 曲线,如图 4 所示。结果表明,凤栖原站左侧 P1 点视线向形变速率为-14.0mm/a,累积沉降量达到 36.2mm,右侧 P2 点视线向形变速率为-14.0mm/a, 累积沉降量达到 36.1mm。图 3 (c)表明地铁 4 号线 沿线形变最严重的区域位于飞天路站附近,该区域 的 P3 点视线向形变速率为-7.9mm/a,累积沉降量 达到 20.4mm。4 号线附近另一个沉降中心位于曲 江池西站,即图 3 (d),其右侧 P4 点的视线向形变 速率为-7.0mm/a,累积沉降量达到 18.0mm; 左侧 P6 点视线向形变速率为-5.4mm/a,累积沉降量达 到 14.0mm。电子城沉降中心,即图 3(e),该区域 中 P5 点的视线向形变速率为-8.0mm/a,累积沉降 量达到 20.6mm。由图 4 可知,每年第三季度地表 沉降量波动较大,这是由于一年内各季度承压水开 采量不同,造成地面沉降量不同^[10]。总体来看, 进入 2020 年后,形变速率呈现减缓趋势。

二号线南段沉降量随时间不断减少,2006~ 2007 年沉降量为 60~70mm,2010~2011 年沉降量



Fig. 4 Deformation time series of P1~P6

下降为 40~50mm^[10]。由文献[11]可知, 2015 年 9 月到 2016 年 5 月三爻站和凤栖原站之间累积沉降 量为 31mm; 电子城沉降中心累积沉降量 18mm。结 合本文研究发现,随着时间推移,沉降中心逐渐南 移至凤栖原站附近,且图 3 (b)和(d)所在沉降区 有连成片的趋势。文献[12]表明,电子城沉降区 2015~2017 年大部分地区沉降速率小于 20mm/a。 文献[13]研究发现,电子城沉降速率逐渐减小。经 过对比分析,上述研究结果与本文实验结果的沉降 中心位置基本保持一致,各沉降中心的形变速率也 符合其逐渐减缓的趋势,这在很大程度上证实了本 文方法的有效性。

2.2.2 沉降原因分析

过量开采地下深层承压水是导致西安地表沉降 的主要原因^[10,12,14~16]。图 3 (b) 和(d) 显示的结果 表明,2号线凤栖原站及4号线曲江池西站附近道 路复杂,高层建筑物分布密集,造成地面负荷过 大,且该区域为居民聚集区,人口密度大、水资源 需求量大,造成地下水超采,引起地面沉降。引进 黑河水供城市用水,可以减少承压水开采量,减缓 地表的沉降速率;从图3(c)可以看出,4号线飞 天路站附近,工业园区发达,厂房分布密集,导致 地下水超采,造成地面沉降,可通过地区功能疏解 和经济转型缓解地面沉降^[17];从图 3 (e) 可以看 出,沉降中心电子城与两条地铁线相距较远,但其 位于城区内, 商业繁荣, 且有多所学校、银行、医 院等,人口密集,需水量巨大,导致地面沉降。可 以采取停止开采地下水,人工回灌地下含水层等方 法减缓地面沉降速率。

3 结论

本文介绍了利用 SNAP 软件和 StaMPS 实现时 序 InSAR 方法的基本原理和数据处理流程。利用西 安地铁2号线南段、4号线及其周边地区2018年3 月至2020年10月的79景 Sentinel-IA 卫星数据, 实现了对复杂地表形变地区的高精度形变监测。结 果表明,沉降最严重的区域位于西安地铁2号线凤 栖原站附近,最大视线向形变速率为-18.4mm/a。 研究区域内还存在3个沉降中心,分别为电子城、 地铁4号线飞天路站和曲江池西站。沉降区域内工 业园区密集,人口密度大,导致地下水超采,造成 地表沉降,可制定合理的地下水采、灌方案减缓地 面沉降速率。

参考文献

[1] 葛大庆,王艳,郭小方等.基于相干点目标的多基线 D-InSAR 技术与地表形变监测 [J].遥感学报,2007,11
 (4): 574~580.

Ge Daqing , Wang Yan , Guo Xiaofang et al. Surface deformation monitoring with multi-baseline D-InSAR based on coherent point target [J]. Journal of Remote Sensing , 2007 , 11 (4) : 574 ~ 580. (in Chinese)

- [2] Zhang Zhengjia et al. Surface deformation monitoring in Zhengzhou City from 2014 to 2016 using time-series InSAR [J]. Remote Sensing, 2018, 10 (11): 1731.
- [3] Hooper, A., P. Segall, H. Zebker. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2007, 112 (B7).
- [4] Hanssen, F Ramon. Radar Interferometry [M]. Heidelberg: Springer Netherlands, 2001.
- [5] A, J. Hu, Z. W. Li A, X. L. Ding B, J. J. Zhu A, L. Zhang B, Q. Sun A. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133 (1): 1~17.
- [6] Ferretti , A. , C. Prati , F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing , 2001 , 39 (1): 8~20.
- [7] Xiao, R., C. Yu, Z. Li, X. He. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 96: 102289.
- [8] 李尚哲.西安地铁4号线跨越地裂缝灾害研究 [D].西安: 西安工业大学,2018.
 Li Shangzhe. Study on the ground fractures disaster crossed by Xi´an Metro Line 4 [D]. Xi´an: Xi´an Technological
- University, 2018. (in Chinese)
 [9] 王新元. 西安地铁 2 号线穿越地裂缝处沉降研究 [D]. 西安: 西安科技大学,2008.
 Wang Xinyuan. Research on settlement of Xi´an Metro Line 2 crossing ground fissure [D]. Xi´an: Xi´an University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)

(下转第78页)

78 工程勘察 Geotechnical Investigation & Surveying

研究 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34 (3): 1262~1267. Zheng Zhijie, Zeng Jie, Zhao Wei et al. Application research of high density resistivity method in water exploring in karst area [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34 (3): 1262~1267. (in Chinese)

- [9] 薛胜利,凌丹丹等.激电测深在延安地区浅层地下水调查评价中的应用[J].地质与勘探,2019,55(6): 1463~1472.
 Xue Shengli, Ling Dandan et al. Application of the induced polarization sounding method to the survey of shallow groundwater in the Yan'an area [J]. Geology and Exploration, 2019,55(6): 1463~1472. (in Chinese)
- [10] 李富,邓国仕,袁建飞等.确定探采结合井位的综合物探 方法技术研究——以乌蒙山区为例 [J].地球物理学进展, 2018,33 (3): 1218~1225.
 Li Fu, Deng Guoshi, Yuan Jianfei et al. Combination of

exploration and mining technology research method of geophysical exploration wells: in Wumeng mountain area as an example [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33 (3): 1218 ~ 1225. (in Chinese)

 [11] 郭嵩巍,闫强. 瞬变电磁法在内蒙古乌拉特前旗明安镇西找 水工程中的应用 [J]. 科学技术与工程,2020,20 (7): 2564~2572.
 Guo Songwei, Yan Qiang. Application of transient electromagnetic methods in water exploration of the west of Ming'an Town in Wulateqianqi , Inner Mongolia [J]. Science Technology and Engineering , 2020 , 20 (7) : 2564 ~ 2572. (in Chinese)

- [12] 康方平,蒋建良,彭杰等.综合物探方法在湖南某贫水板 岩地区找水的应用研究 [J]. 工程地球物理学报,2020, 17 (2): 258~264.
 Kang Fangping, Jiang Jianliang, Peng Jie et al. Application of integrated geophysical method to water search in a poor slate region of Hunan Province [J]. Chinese Journal of Engineering
- [13] 黄国民,李世平,陶毅等.广西碎屑岩地区电法找水实例
 [J].物探与化探,2019,43 (1):77~83.
 Huang Guomin, Li Shiping, Tao Yi et al. A case study of water prospecting by electrical method in clastic rock area of Guangxi
 [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019,43 (1):77~83. (in Chinese)

Geophysics, 2020, 17 (2): 258~264. (in Chinese)

 [14] 杨剑,王永华,焦彦杰等. EH4 电磁系统在西南抗旱救灾找 水中的应用 [J]. 物探与化探,2011,35(6): 754~757.
 Yang Jian, Wang Yonghua, Jiao Yanjie et al. The application of EH4 electromagnetism to water resource exploration and drought resistance in Southwest China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011,35(6): 754~757. (in Chinese)

(上接第51页)

[10] 刘超. 西安地铁二号线南段地面沉降成因分析 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

> Liu Chao. The analysis of the cause of land subsidence in south section of Xi´ an Metro Line 2 [D]. Xi´ an: Chang´ an University, 2012. (in Chinese)

[11] 张艳梅,王萍,罗想等.利用 Sentinel-I 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. Using Sentinel-I

data and SBAS-InSAR technology to monitor surface subsidence in Xi'an [J]. Bulletin of Surveying and Mapping , 2017, (4): $93 \sim 97$. (in Chinese)

- [12] 彭米米,赵超英,张勤等.利用 Sentinel-IA 数据监测大西安 2015-2017 年地面沉降 [J].地球物理学进展,2018,33 (6): 2264~2269.
 Peng Mimi, Zhao Choaying, Zhang Qin et al. Monitoring Xi´an land subsidence during 2015 - 2017 using Sentinel-IA images [J]. Progress in Geophysiscs, 2018,33 (6): 2264~2269. (in Chinese)
- [13] 孙月敏,杨天亮,卢全中等.基于 SBAS-InSAR 的西安市鱼 化寨地区地面沉降与地裂缝时空演变特征研究 [J].工程 地质学报,2022,30(2):553~564.

Sun Yuemin , Yang Tianliang , Lu Quanzhong et al. Spatial-

temporal evolution characteristics of land subsidence and ground fissure in Yuhua Village of Xi´an City using SBAS-InSAR technique [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30 (2): $553 \sim 564$. (in Chinese)

- [14] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用 [M]. 西安: 陕西 科学技术出版社, 2000.
 Wang Jingming. Theory and application of ground fissures and their disasters [M]. Xi´an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [15] Qu, F., Q. Zhang, Z. Lu, C. Zhao, C. Yang, J. Zhang. Land subsidence and ground fissures in Xi´an, China 2005 – 2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 155: 366~76.
- [16] Peng, J. B., X. H. Sun, W. Wang, G. C. Sun. Characteristics of land subsidence, earth fissures and related disaster chain effects with respect to urban hazards in Xi´an, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75 (16): 1~15.
- [17] 李广宇,张瑞,刘国祥等. Sentinel-IA TS-DInSAR 京津冀地区 沉降监测与分析 [J]. 遥感学报, 2018, 22 (4): 633~646. Li Guangyu, Zhang Rui, Liu Guoxiang et al. Sentinel-IA TS-DInSAR subsidence monitoring and analysis in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22 (4): 633~646. (in Chinese)