

# 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-1A (Sentinel-1A) 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了  $-18.4\text{mm/a}$ ; 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  $-7.9\text{mm/a}$ 、 $-7.0\text{mm/a}$ ; 西安电子城沉降中心的视线向形变速率为  $-8.0\text{mm/a}$ 。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  $-18.4\text{mm/a}$ . 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  $-7.9\text{mm/a}$  and  $-7.0\text{mm/a}$  respectively. At Xi'an Electronic City, there is a settlement center, its line-of-sight deformation rate is  $-8.0\text{mm/a}$ . 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<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>, 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<sup>[3]</sup>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<sup>[4,5]</sup>;

(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<sup>[6]</sup>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<sup>[7]</sup>,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<sup>[8,9]</sup>,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 211km<sup>2</sup>,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。

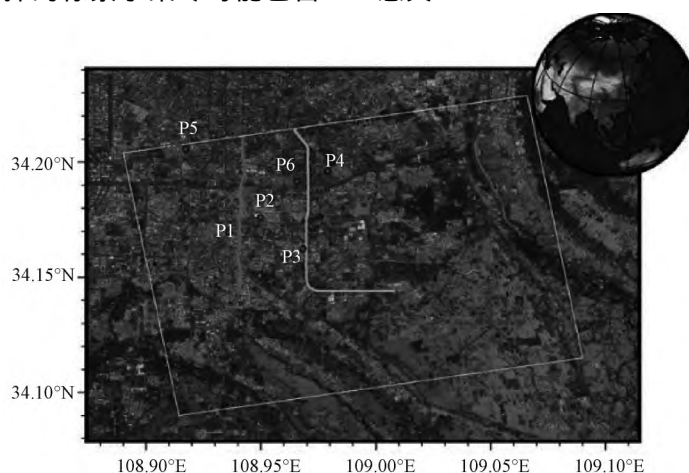


图 1 研究区概况

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

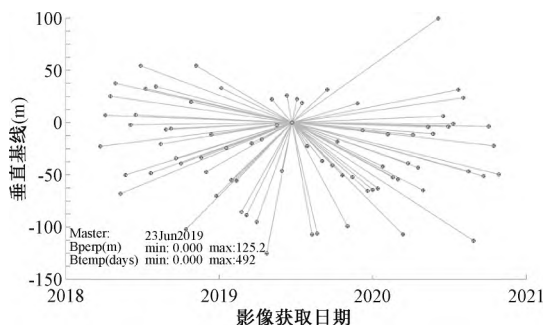


图2 时空基线图

Fig.2 Spatiotemporal baseline map

数据，结合第1章数据处理的原则与方法，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 $\gamma$ 值，结合每个候选点的振幅离散度和 $\gamma$ 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。

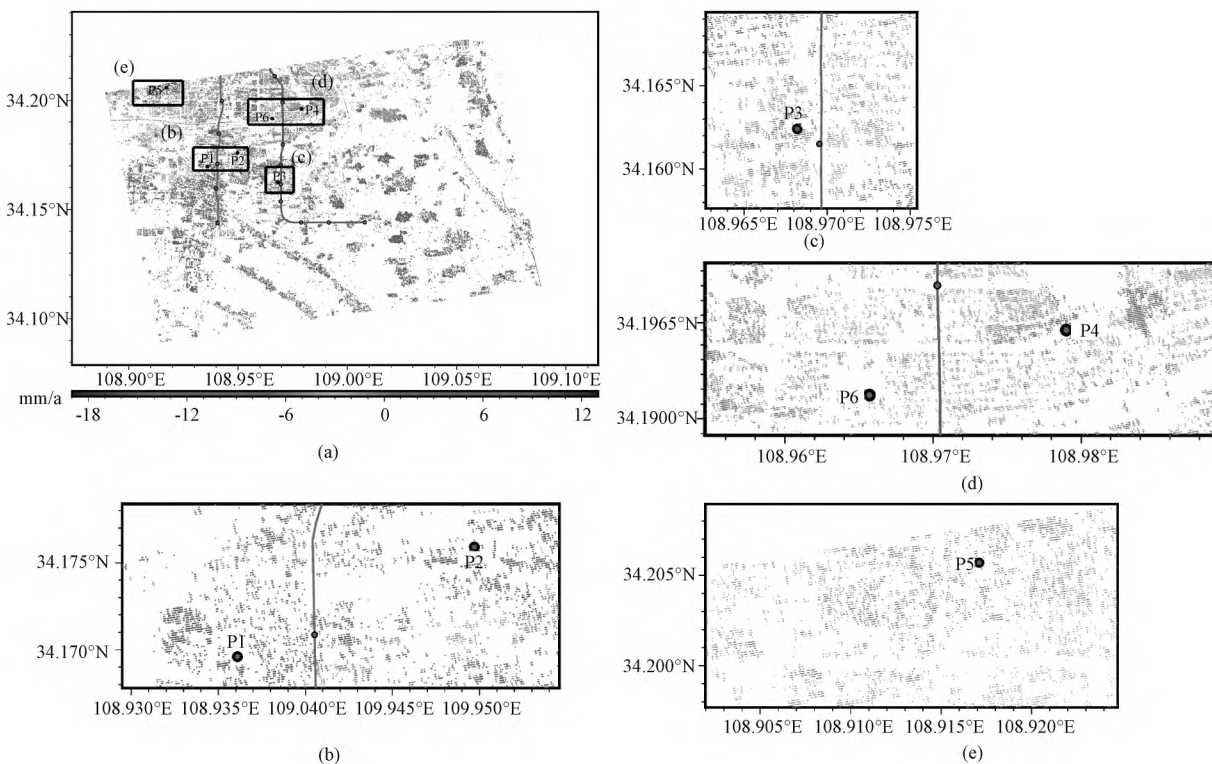


图3 视线向形变速率

Fig.3 LOS velocity

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<sup>[10]</sup>。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

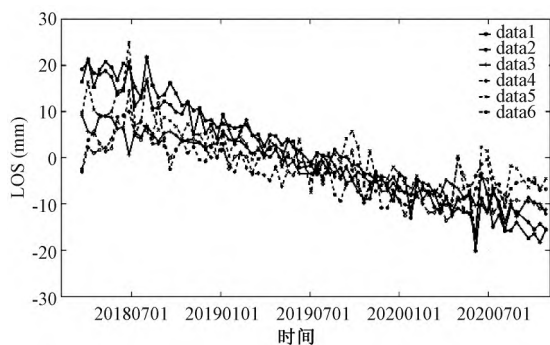


图4 P1~P6点的形变时间序列

Fig. 4 Deformation time series of P1~P6

下降为 40~50mm<sup>[10]</sup>。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<sup>[10,12,14~16]</sup>。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<sup>[17]</sup>;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-1A 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. 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. 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)

