引文格式：吴启琛,于瑞鹏,王丽,等. 利用Sentinel-1的山东枣庄高新区地面沉降监测与分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 80-83. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2024.06.019

# 利用 Sentinel-1 的山东枣庄高新区地面沉降监测与分析

吴启琛[1,2]，于瑞鹏[1,2*]，王　丽[1]，赵乙泽[1]，范开放[1]
（1. 山东省第一地质矿产勘查院，山东　济南 250000；
2. 山东省地矿局索道智能变形监测重点实验室，山东 济南 250000）

**摘　要：**山东省枣庄市近年来城市发展迅速，受到地面沉降等地质灾害的威胁，需要利用有效手段对潜在隐患进行评估监测。本文利用小基线合成孔径雷达干涉测量（SBAS-InSAR）技术对获取的覆盖山东省枣庄市高新区的Sentinel-1数据进行分析，获取了此区域2018—2022年地面沉降分布。InSAR与全球导航定位系统获取的沉降数据证实了结果优于10 mm。通过对典型区域的时序沉降分析发现，城市建设过程中的地基排水和农业区的灌溉等对地面沉降影响较大，需密集监测城市地面沉降动态。本文的研究表明InSAR技术在大范围地表沉降中具有优势，可为城市地质灾害防治工作提供重要信息。

**关键词：**InSAR；地面沉降；枣庄
**中图分类号：**P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0080-04

# Land Subsidence Monitoring and Analysis of the High-tech Zone in Zaozhuang City, Shandong Province Using Sentinel-1

WU Qichen[1,2], YU Ruipeng[1,2], WANG Li[1], ZHAO Yize[1], FAN Kaifang[1]
(1. No.1 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250000, China;
2. Key Laboratory of Cableway Intelligent Deformation Monitoring of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In recent years, Zaozhuang City in Shandong Province has developed rapidly and is threatened by geological disasters such as land subsidence. Effective methods need to be used to evaluate and monitor potential hazards. We used the small baseline synthetic aperture radar interferometry (SBAS InSAR) technology to analyze Sentinel-1 data covering the high-tech zone of Zaozhuang City, and obtained the distribution of land subsidence in this area from 2018 to 2022. Then, we compared the subsidence results from InSAR with global navigation positioning system, and confirmed that the accuracy of InSAR results were better than 10 mm. Through time series settlement analysis of typical areas, we found that the dewatering during urban construction and irrigation in agricultural areas affected the land subsidence, requiring intensive monitoring of urban land settlement. The research indicates that InSAR technology has advantages in large-scale surface subsidence and can provide important information for urban geological disaster prevention and control work.

**Key words:** InSAR, land subsidence, Zaozhuang

随着城市的扩张，矿产、地下水资源的持续开采，我国许多城市面临严峻的地面沉降防治现状[1]。例如，上世纪20年代以来，我国华北平原由于地下水超采，天津、北京和沧州等城市陆续出现严重的地面沉降[2-4]，给居民日常生活和公路、桥梁、高铁等基础设施的安全运营带来严重威胁。山西太原、大同与山东枣庄等资源型城市，由于煤炭资源的大规模开采，饱受地面塌陷等灾害困扰[5]。由于不良地质条件等因素影响，城市建设过程中也会造成严重地质灾害。例如，2018年2月7日，佛山市地铁2号线施工过程中发生塌陷事故，造成严重人员伤亡[6]。因此，周期性大范围的地面沉降监测对识别与防治潜在隐患具有非常重要的意义。

水准和全球定位系统等高精度地面沉降监测手段在城市地面沉降监测中具有非常重要的意义，但其很难进行高分辨率周期性监测任务。合成孔径雷达干涉测量（InSAR）具有不受云雾影响、全天时全天候等优势，在广域地面沉降监测中发挥着越来越重要的作用[7-8]。特别是技术的不断发展与合成孔径雷达数据的不断积累，时序InSAR技术，例如永久散射体干涉测量（persistent scatterer InSAR, PS-InSAR）[9](与小基线

收稿日期：2023-04-27。
项目来源：山东省第一地质矿产勘查院青年基金资助项目（QN202103）。
第一作者简介：吴启琛（1990—），硕士研究生，工程师，研究方向为摄影测量与遥感，E-mail：413406010@qq.com。
通信作者：于瑞鹏（1982—），本科，高级工程师，研究方向为测绘地理信息与大数据，E-mail：309647769@qq.com。

数据集干涉测量技术（Small baseline subset InSAR，SBAS-InSAR）[10]，可以利用SAR数据中保持相干或短时间内保持相干的像素进行分析，准确分离出InSAR数据中的大气扰动、地形误差和形变等信号，实现高精度变形监测，在我国上海[11]、天津[4]和陕西[12]等地表形变监测中取得成功应用。

本文利用SBAS-InSAR技术对覆盖山东省枣庄市高新区2018—2022年的145景的Sentinel-1数据进行分析，获取了地面沉降时空特征。将SBAS-InSAR观测与水准观测对比，验证了InSAR观测的可靠性。通过时序沉降分析发现，本区域的变形主要与施工建设等人类活动相关。

## 1　实验区与数据

枣庄市是以煤炭、电力、建筑工业等为主的工矿城市，由于多年矿业和地下水开采，枣庄市平原区存在大面积的地面塌陷和岩溶塌陷，山区存在崩塌与滑坡隐患[13-14]。1981—2009年间，发生塌陷200余次，给人民生命财产安全带来严重威胁[15]。实验区隶属于枣庄市高新区，经纬度范围为117.359 650°～117.476 103°E，34.825 223°～34.856 042°N，总面积16.75 km$^2$，主要涉及蒋庄村、西夹埠村、东夹埠村、袁庄村、张范西村、张范东村、黑石岭村以及大甘霖村8个村庄。实验区位于暖温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，冬春气候干燥少雨，夏秋湿润多雨。

Sentinel-1卫星作为欧洲空间局哥白尼计划的重要组成部分，用于海洋与陆地监测集应急响应。其工作模式分为条带模式、干涉宽幅（Interferometric Wide，IW）模式、超宽幅模式、波模式4种，其中IW为其主要工作模式，使用TOPS（Terrain Observation by Progressive Scan）成像，每幅数据中包含3个测绘子带，每个子带包含约9个burst，覆盖范围250 km。本文获取了2018-01-03—2022-12-08期间共145幅IW模式升轨SAR数据，将每幅数据与时间间隔最近的2幅影像进行组合形成干涉，如图1所示。本文获取了AW3D30（ALOS World 3D-30 m）数字地表模型去除地形相位和地理编码。同时本文获取了2022年3月、2022年6月和2022年9月获取的3次GPS(Global Positioning System)观测数据与InSAR结果进行比对。

## 2　SBAS-InSAR数据处理

由于Sentinel-1数据burst之间多普勒中心频率差异很大，配准精度需要达到0.001像素才能满足干涉需求[16]。因此，本文首先采用AW3D30 DSM结合精密轨道数据的方法进行几何配准，然后进一步采用增强谱分集方法实现高精度配准。将配准好的burst单元采样到参考影像空间，拼接为完整的单视复数影像，生成图1中对应的小基线干涉图。

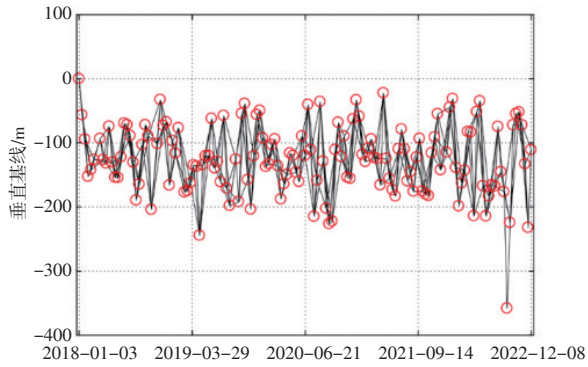



图1　干涉组合图

本文采用振幅离差与时间相干性阈值相结合的方式进行相干点选取。首先采用宽松的振幅离差阈值（<0.6）选择候选点，然后剔除时间相干性小于0.3的点。将最终选择的像素点进行三维相位解缠，每个像素点的解缠相位可以表示为：

$$\Delta\phi=\Delta\phi_{\mathrm{dem}}+\Delta\phi_{\mathrm{disp}}+\Delta\phi_{\mathrm{atm}}+\Delta\phi_{\mathrm{orb}}+\Delta\phi_{n} \tag{1}$$

式中，$\Delta\phi$为解缠相位；$\Delta\phi_{\mathrm{dem}}$，$\Delta\phi_{\mathrm{disp}}$，$\Delta\phi_{\mathrm{atm}}$，$\Delta\phi_{\mathrm{orb}}$和$\Delta\phi_{n}$分别为DEM误差、形变、大气扰动、轨道误差和噪声引起的误差分量。本文通过二次多项式移除残余的轨道误差，利用基线与地形之间的线性关系估计移除DEM误差分量。利用低通滤波与高通滤波组合的方式估计并移除大气扰动的影响。移除上述误差后，时序地面沉降可以通过最小二乘的方式获取。

$$\boldsymbol{A}V_{\mathrm{los}}=\boldsymbol{\Phi},V_{\mathrm{los}}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{\Phi},d_{\mathrm{los}}^{t_i}=d_{\mathrm{los}}^{t_{i-1}}+V_{\mathrm{los}}^{t_i}\Delta t_i \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{A}$为干涉图时间构成的构造矩阵；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{los}}$为视线向变形速率向量；$\boldsymbol{\Phi}$为解缠相位向量；$d_{\mathrm{los}}^{i}$和$V_{\mathrm{los}}^{i}$分别为$ti$时刻的累积变形与变形速率；$\Delta_{ti}$为对应干涉图的时间间隔。由于研究区地形起伏小，因此本文假设地表变形以沉降为主，将视线向变形用公式（3）投影至垂直方向。

$$d_{\mathrm{vert}}=\frac{d_{\mathrm{los}}}{\cos\theta} \tag{3}$$

式中，$\theta$为入射角；$d_{\mathrm{los}}$和$d_{\mathrm{vert}}$分别为视线向和垂向变形。

## 3　结果与分析

### 3.1　平均变形速率与验证

本文以站点JZ01为基准，利用Sentinel-1数据获

取的2018—2022年研究区平均沉降速率图，最大沉降速率为−27.4 mm/a，共探测到34 292个相干目标，密度约为2 047个/km²。由于农田、植被覆盖区等季节性变化较大，相干性整体较低，相干点主要分布在村落附近，探测到的局部沉降多与新建建筑或农业灌溉等人类活动等相关。

为了验证观测的有效性，本文将SBAS-InSAR结果与9个站点的GPS三期监测数据进行对比（图2）。可以看到，InSAR与GPS观测吻合较好，除了站点JC11在2022年6月—9月2种观测相差10.1 mm，其余站点在2个时间段内的结果相差均优于10 mm。2次观测的均值分别为−1.5 mm和−5.5 mm，标准差为3.9 mm和4.5 mm。由于本文将GPS数据与站点80 m范围内InSAR观测的平均值进行对比，空间位置上的差异可能引入上述误差。

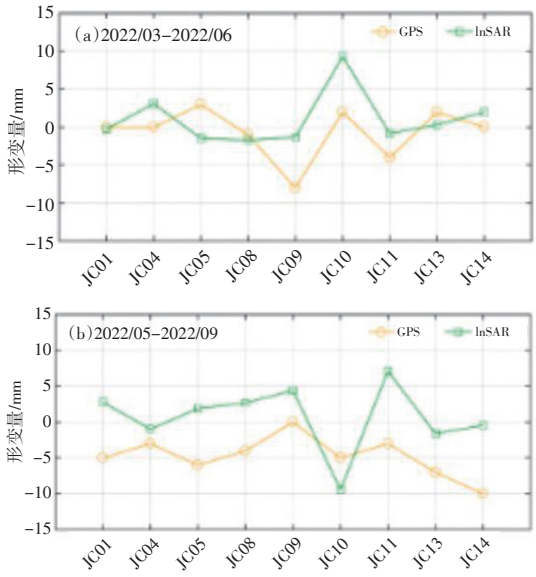



图2 InSAR结果与水准监测结果对比

### 3.2 时序沉降分析

图3给出了西夹埠村西侧沉降速率图，此处以厂房为主，西邻店韩路，南北两侧均为农耕用地，最大沉降速率为23.8 mm/a。图3中点P1累积沉降显示点P1前期以季节性形变为主，此形变特征可能与降水和枯水期抽取地下水用于周围农田灌溉有关。点P1于2021年12月中旬左右开始出现形变加速，最大沉降位移达到27.1 mm。点P2位于沉降区南部，该点前期形变相对稳定，2020年8月下旬出现明显的加速现象，如图3中黑色虚线所示。点P2的最大沉降量达到40.8 mm。通过分析此处光学历史数据显示，2020年期间，此区域厂房在2020年期间出现扩建现象，建设过程中地基排水会导致周边区域出现沉降[17]。

图4给出东夹埠村年沉降速率图，此处以厂房和

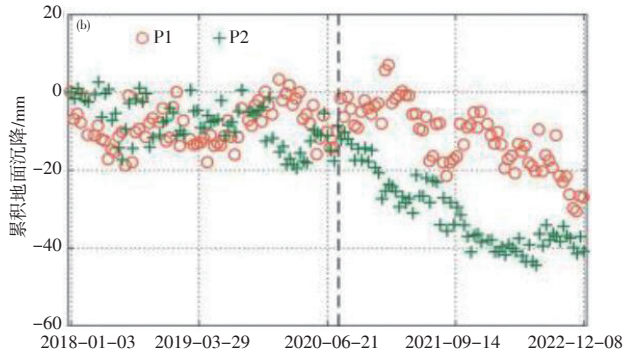



图3 西夹埠村西侧沉降速率及P1-P2点时序位移

居民住宅楼为主，区域内最大沉降速率为26.1 mm/a。点P3-P5的时序位移如图4所示，可以看出，3个点均存在不同程度的形变加速，加速现象发生的时间存在差异。点P3在2019年3月下旬至2021年9月中旬之间具有明显的形变加速特征，该时间段内的累积沉降量约为70.0 mm，形变加速结束后，点P3达到基本稳定状态，最大沉降量为76.6 mm。点P4和点P5在观测前期均保持相对稳定状态，2020年12月和2021年9月2个特征点先后出现明显的形变加速，截至观测期结束，点P4和点P5的最大沉降量分别为−59.5 mm和−37.2 mm。通过调查发现观测期内该区域经历了大范围的建筑物重建工作，施工活动地基排水加速了对地表稳定性的破坏，由于区域内局部范围施工活动的进程不同，因此形变加速的发生时间及加速程度也存在差异。

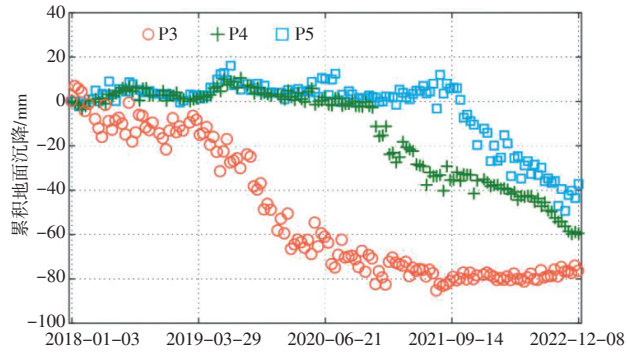



图4 东夹埠村沉降速率及P3-P5点时序位移

图5给出了大甘霖村西侧年平均沉降速率，此处建筑物沿道路和铁路轨道分布，周围零星分布居民地，区域内最大沉降速率为20.2 mm/a。点P6位于交通线路北侧，由5中时序沉降可以看出该点存在长期的缓慢变形，最大沉降量为75.4 mm。由于此处人口聚集，靠近交通线路，因此推断是长期的交通运输活动和频繁的社会活动导致点P6周围区域地沉降现象的发生。点P7位于建筑物处，周边均为农田，该点在观测前期基本稳定，2020年11月发生明显的形变加速直至观测结束，最终累积沉降量为40.3 mm。观察点P7所在位置的历史光学影像，发现该区域在观测期内

存在建筑物施工活动，且施工活动的开展时间与形变加速时间基本吻合，因此认为是施工活动的开展导致地表稳定性的加速破坏。

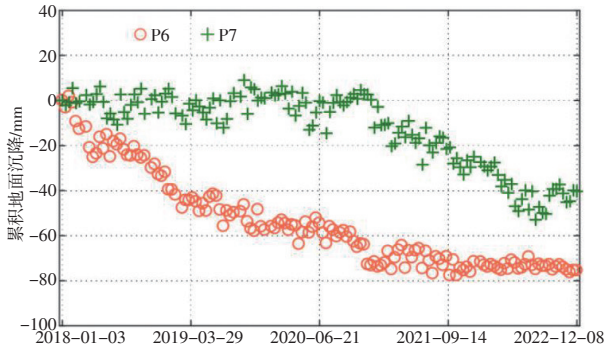



图5　大甘霖村西侧年平均沉降速率及P6–P7点时序位移

通过对研究区的形变探测，发现研究区内形变主要是由建筑物施工、交通运输活动以及农业灌溉活动等引起，尤其是建筑物施工活动对研究区地表稳定性破坏最强。研究还发现，随着施工活动的结束，对地表稳定性的破坏逐渐减小，形变趋于稳定。综上所述，要切实关注研究区内各工程建设活动的开展状况，同时关注交通轨道引起的相关变形现象，保证安全。

## 4　结　论

本文利用SBAS-InSAR方法对2018—2022年升轨Sentinel-1 SAR数据集进行分析，获取了覆盖枣庄高新区的时空沉降特征，发现频繁的人类活动影响了研究区内地表沉降的时空特征。通过InSAR观测与研究区内9个GPS站点三期观测对比，证实了InSAR观测的有效性。2022年3–6月与2022年6–9月GPS观测与同期InSAR观测差值的均值与标准差均优于10 mm，显示InSAR精度为毫米级。通过典型区域时序分析发现，建设中地基排水过程以及农田区灌溉等人类活动对地表沉降影响较大。随着Sentinel-1与我国陆探卫星的不断运转，SAR数据持续积累，未来可将多轨道多波段观测数据进行结合，获取精细三维地表形变，为更好地解译地表变形过程提供依据。

## 参考文献

[1] 殷跃平,张作辰,张开军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005(2):1-8

[2] Bai L, Jiang L M, Zhao Y, et al. Quantifying the Influence of long-term Overexploitation on Deep Groundwater Resources Across Cangzhou in the North China Plain Using InSAR Measurements, Journal of Hydrology[J/OL]. 2022, 605: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127368

[3] Zhou C, Gong H, Chen B, et al. Quantifying the Contribution of Multiple Factors to Land Subsidence in the Beijing Plain, China with Machine Learning Technology[J]. Geomorphology, 2019, 335(15):48-61

[4] 范景辉,郭华东,郭小方,等. 基于相干目标的干涉图叠加方法监测天津地区地面沉降[J]. 遥感学报,2008(1):111-118

[5] Wei T, Xiang J Z, Mahdi M, et al. Land Subsidence and Rebound in the Taiyuan Basin, Northern China, in the Context of Inter-basin Water Transfer and Groundwater Management[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 269, 112 792

[6] 张严,朱武,赵超英,等. 佛山地铁塌陷InSAR时序监测及机理分析[J]. 工程地质学报,2021,29(4):1 167-1 177

[7] 李德仁,廖明生,王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):664-668

[8] 龚卉,魏以宽,唐晓霏,等. 省级地质灾害监测体系关键技术应用研究[J]. 地理空间信息,2020,18(3):27-30

[9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20

[10] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(11): 2 375-2 383

[11] 杨梦诗,廖明生,史绪国,等. 联合多平台InSAR数据集精确估计地表沉降速率场[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(6):797-802

[12] 梁芳,杨维芳,李蓉蓉. 基于SBAS-InSAR技术的矿区地表形变监测研究[J]. 地理空间信息,2022,20(11):44-48

[13] 宋印胜,李公岩. 山东省枣庄市新城区环境水文地质条件定量评价[J]. 山东国土资源,2004,20(2):49-51

[14] 张斌,王标,胡蕾,等. 山东省枣庄市地质灾害现状研究及防治建议[J]. 山东国土资源,2022,38(1):37-43

[15] 李公岩,李元仲,杨蕊英,等. 模糊数学评判山东省枣庄地质灾害现状与发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(3):81-84

[16] Yagüe-Martínez N, Prats-Iraola P, F. Rodrí G G, et al. Interferometric Processing of Sentinel-1TOPS Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2016,54(4): 2 220-2 234

[17] SHI X G, Zhang S C, Jiang M, et al.Spatial andTemporal Subsidence Characteristics in Wuhan (China), during 2015-2019, Inferred from Sentinel-l Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry[J]. NaturalHazards and Earth System Sciences,2021,21(8):123-128