

DOI: 10.12401/j.nwg.2023100

# 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2019~2022 年 大西安地表形变

冯旻譞<sup>1,2</sup>, 齐琦<sup>1,\*</sup>, 董英<sup>1</sup>, 曾磊<sup>1</sup>, 张新社<sup>1</sup>, 刘文辉<sup>1</sup>, 李勇<sup>3,4</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 张戈<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心 / 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质环境监测总站(陕西省地质灾害中心), 陕西 西安 710054; 4. 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 西安是中国地面沉降和地裂缝等地质灾害集中发育的地区之一。西安市的地面沉降与地下水超采密切相关。近年来, 西安市持续开展的地下水人工回灌, 地下水位有所恢复。笔者采用小基线集干涉测量 InSAR 技术对西安城区 2019 年 1 月至 2022 年 8 月期间的 47 景升轨 Sentinel-1A 数据进行处理, 获取了西安地区最新的地面形变特征。研究发现, 随着地下水位回升, 西安市目前地面沉降已经有效缓解, 典型沉降区鱼化寨、电子城等已经出现了地面回弹现象, 大范围的地面沉降几乎不可见, 仅在城区东南处见零星分布的沉降区。地下水位变化是导致地表回弹的重要原因。无论是电子城区域还是鱼化寨区域, 其地表抬升形变已经度过土层快速变形的弹性形变时期。总体回弹量在安全范围, 对周边的地铁及建筑的影响有限。

**关键词:** 西安; 地面回弹; 地下水; 地面沉降; 小基线集干涉测量 InSAR 技术

中图分类号: P542+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0178-08

## Monitoring Surface Deformation in Xi'an City from 2019 to 2022 Based on Sentinel-1A Data

FENG Minxuan<sup>1,2</sup>, QI Qi<sup>1,\*</sup>, DONG Ying<sup>1</sup>, ZENG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Xinshe<sup>1</sup>,  
LIU Wenhui<sup>1</sup>, LI Yong<sup>3,4</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geologic Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Geological Environment Monitoring Station (Shaanxi Geological Disaster Center), Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Xi'an is one of the areas in China where geological hazards such as ground subsidence and ground fissures are concentrated and developed. Ground subsidence in Xi'an is closely related to groundwater over-extraction. In recent years, groundwater levels have recovered as a result of the ongoing artificial recharge of groundwater in Xi'an. In this paper, 47 scenes of Sentinel-1A data from January 2019 to August 2022 in the urban area of Xi'an were processed using the small baseline subset InSAR technique to obtain the latest ground

收稿日期: 2023-02-12; 修回日期: 2023-04-19; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“西安城市地质安全体检与风险评估示范”(DD20211317), “西安城市地质安全调查评价与风险管理示范”(DD20211317), “西北典型地区地质灾害调查”(DD20221739)联合资助。

作者简介: 冯旻譞(1990-), 女, 博士, 助理研究员, 从事地质灾害调查、InSAR 技术应用等研究。E-mail: fmx98@sina.com。

\* 通讯作者: 齐琦(1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事工程地质、构造地质等研究。E-mail: xqq8901@163.com。

deformation characteristics of the Xi'an area. The main results obtained in this paper are as follows: with the groundwater level starting to rebound, ground subsidence in Xi'an has now been effectively alleviated, and ground rebound has been observed in typical subsidence areas such as Yuyuanzhai and Electronic City, etc. Extensive ground subsidence is hardly visible, and only scattered subsidence areas are seen in the southeast of the urban area. Changes in the groundwater table are an important cause of ground rebound. The surface uplift deformation in both the Electronic City area and the Yuhuazhai area has already passed the elastic deformation period of rapid soil deformation. The overall amount of rebound is within the safe range and the impact on the surrounding metro and buildings is limited.

**Keywords:** Xi'an; rebound deformation; groundwater; land subsidence; small baseline subsets InSAR technique

地面沉降是在人类工程经济活动影响下, 由于地下松散地层固结压缩, 导致地壳表面标高降低的一种局部的下降运动。这是一种区域性的缓变地质灾害, 在城市地区一般由于不合理开采地下水引发的, 成灾慢, 损失大, 不易治理。近年来, 地面沉降产生的地质环境问题日益严重, 在中国华北平原、长江三角洲、汾渭盆地等地区均发生不同程度地面沉降, 不均匀地面沉降产生的地裂缝更是危及到人民生命财产, 造成重大损失。地面沉降、地裂缝的发育与地下水水位变化密切相关(彭建兵等, 2012; 董英等, 2019)。

近年来, 合成孔径雷达干涉测量法(InSAR)作为一种新型的空间对地观测技术, 具有精度高、监测范围广、全天候、效率高等特点, 在城市地面沉降监测中逐渐得到广泛应用(Fielding et al., 1998; Massonnet et al., 1993; Berardino et al., 2002; 廖明生等, 2014; 张勤等, 2017; Feng et al., 2018)。其已成为水准测量、GPS 监测和分层标准监测等传统城市地表变形研究方法的重要补充。多位研究者使用不同类型的数据对西安近十年的地表形变做了监测, 发现目前西安城区地表沉降速度在减缓, 部分地区已经出现了不同程度的回弹现象。张勤等(2009)利用 GPS 和 InSAR 测量技术研究 2005~2007 年西安地区地面沉降演化特征, 发现地裂缝和地面沉降在时空活动和分布方面都存在明显的关联性, 西安地面沉降量级减少到不足 100 mm/a, 地面沉降和地裂缝随着西安高新区的建设向南、西南、东南逐步扩展。Qu 等(2014)监测西安市 2005~2012 年形变, 发现西安有四大沉降区, 平均沉降速率在 50 mm/a。Peng 等(2019)基于 2012~2018 年的多源数据, 发现是鱼化寨是最大的沉降区, 最大沉降率为 136 mm/a。Shi 等(2020)基于 2007~2019 的数据发现, 西安沉降速率在逐渐变缓, 城区有明显的局部回弹变形;

2015~2019 年地下水补给区回弹量最大达 22 mm/a。孙月敏等(2022)研究 1992~2020 年西安鱼化寨及其周边的形变过程, 发现 2015 年至今, 地面沉降速率减小, 鱼化寨地区出现地面回弹现象, 但电子城区域仍在继续沉降。

近年来, 西安市采取了很多措施治理地表沉降, 亟需继续开展西安地面形变与地裂缝监测, 获取最新的监测成果。本次试验利用小基线差分干涉方法(SBAS-InSAR)选取 2019~2022 年覆盖西安市的 47 景 C 波段 Sentinel 升轨影像对近四年西安市城区的地表沉降进行监测, 并对比早期已有相关监测成果分析其变化趋势。对重点地区如鱼化寨、电子城等区域的地面沉降地裂缝发育与地下水开采、城市建设的诱因进行分析, 支撑城市规划和地下空间安全利用评价。

## 1 研究区概况

西安市位于渭河流域中部关中盆地, 辖境东西长约为 204 km, 南北宽约为 116 km。城市三面环山, 南面为秦岭高山, 海拔为 1000~3880 m; 北面是低山丘陵, 统称“北山”, 海拔为 700~1250 m。自南到北依次为山前洪积平原、黄土台塬、冲积平原, 构成阶梯状下降的地貌。西安属温带半干旱半湿润性气候, 多年平均降水量为 530~700 mm, 蒸发量为 900~1200 mm。降水集中在 7~9 月, 其雨量约占全年降雨量的 45%。文中选取的研究区域主要针对西安市主城区的地面沉降地裂缝发育地区进行监测, 包括西安市城三区莲湖区、新城、碑林区以及郊三区灞桥区、雁塔区以及未央区 6 个区, 总面积为 2330.26 km<sup>2</sup>, 覆盖经纬度范围约为 E 108°38'26"~109°7'3", N 34°1'10"~34°29'42"(图 1)。

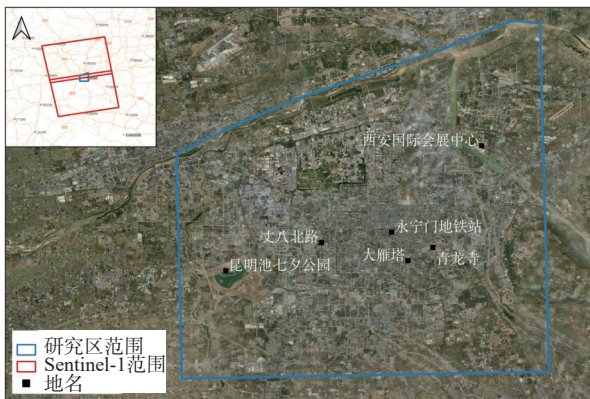


图1 研究区位置及 Sentinel 影像覆盖范围图

Fig. 1 Research area and Sentinel-1A SAR data coverage

## 2 InSAR 数据处理

西安城区范围内植被较少,气候干燥,比较适合 InSAR 监测。本研究使用的雷达影像数据为 Sentinel-1A 卫星干涉宽幅模式(Interferometric Wide swath IW)的 VV 极化 SLC 数据。该数据为波长 5.6 cm 的 C 波段、重访周期 12 d 的降轨影像。为了揭示近 4 年以来西安地面沉降和地裂缝的发展情况,影像数据时间覆盖范围为 2019 年 1 月至 2022 年 8 月,共计 47 幅影像数据。

为研究大西安区域 2019~2022 年期间的地表变化情况,对 47 景(path 84)升轨 Sentinel-1A 数据进行干涉处理。主要流程包括差分干涉像对的生成、相干目标选择、差分干涉图解缠、轨道精炼及重去平、地形残余相位和大气相位去除等步骤。为了减少时间去相干与空间去相干,使用 SBAS-InSAR 方法进行时间序列反演,探测西安城市地表毫米级别的变形。通过对时间和垂直基线阈值设置的方式,控制干涉影像对的数量,有限的影像下获取更多的干涉对,提高结果精确度和可靠性。设置空间基线阈值为 200 m,时间基线阈值为 90 d,进行差分干涉和并相位解缠,对质量差的解缠图进行剔除,最终选用了 134 个干涉对,其时空基线分布如图 2 所示。

## 3 地表形变结果分析

### 3.1 研究区地面沉降和地裂缝活动特征

采用 SBAS-InSAR 技术获取了覆盖西安城区的 2019~2022 年的地表形变速率(图 3)。研究区地面形

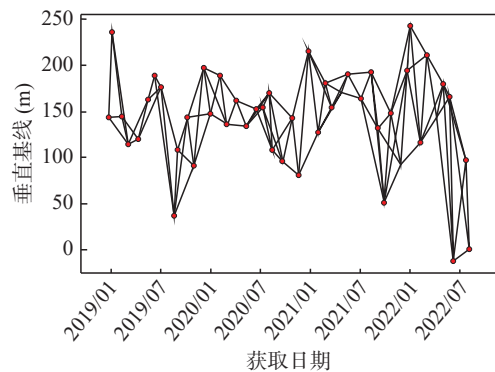


图2 SAR 干涉图的时空基线分布图

Fig. 2 Spatial and temporal baseline distribution of SAR interferogram

变的时空分布和形变方向发生了很大变化。2019~2022 年,研究区域的大范围的地面沉降逐几乎不可见,仅在城区东南处见零星分布的沉降区。典型的独立沉降区有:马腾空地铁站、长安公园等。此外,在传统认知的沉降区鱼化寨和电子城广场都出现沉降面积缩小,沉降速度减慢,地表出现反弹现象,变形趋势与西安市以往研究的趋势有显著不同。西安地面沉降及抬升受地层及地质结构因素等的控制,在南郊、西南郊等发育显著而在东郊不明显。

### 3.2 鱼化寨区域地面回弹情况分析

为详细研究鱼化寨区域地面回弹特征,利用 2019~2022 年获取的 47 景 Sentinel1A 数据,计算获得鱼化寨沉降区 2019~2022 年间的平均沉降速率及形变时序(图 4)。2019~2022 年,鱼化寨区域大部分地方有回弹现象,平均抬升形变速率最大约为 15 mm/a。为了更好的分析鱼化寨区域的回弹趋势,笔者利用已有研究成果(Shi et al., 2020)归纳总结区域内 2015~2022 年的地面沉降及回弹情况。形变区域在空间范围 and 变化趋势上一致,侧面验证了文中结论的可靠性。从北向南在鱼化寨沉降区选取 3 个选取采样点 A、B、C,分别获得 2015~2022 年的累积形变量(图 5)。从形变序列可看到(图 5),在 2018 年 8 月以前,鱼化寨地区一直在持续沉降。从 2018 年 9 月开始鱼化寨区域开始出现明显地面抬升现象,直至 2019 年上半年鱼化寨区域仍在持续回弹。地表抬升回弹期间,9 个月内抬升最大值约为 89 mm。2019 年 6 月开始,地表形变慢慢趋于稳定,抬升非常缓慢,累积抬升量约为 98.47 mm。

### 3.3 电子城区域

西京酒店及周边 2019~2020 年,地表仅轻微沉降,

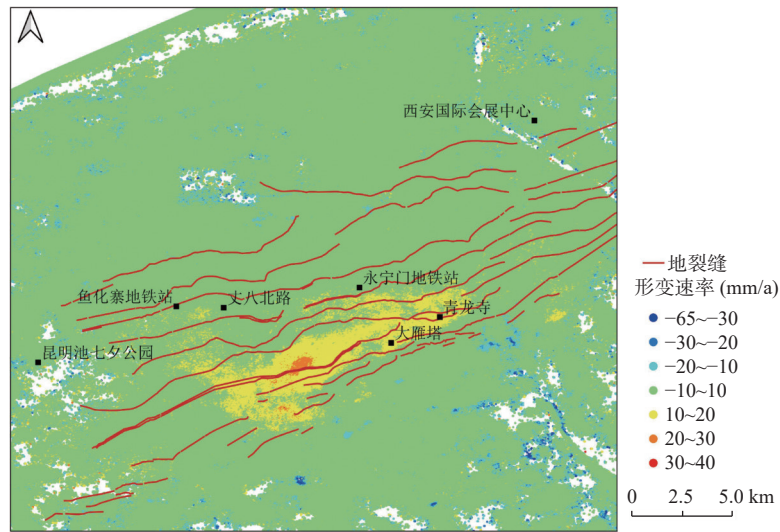
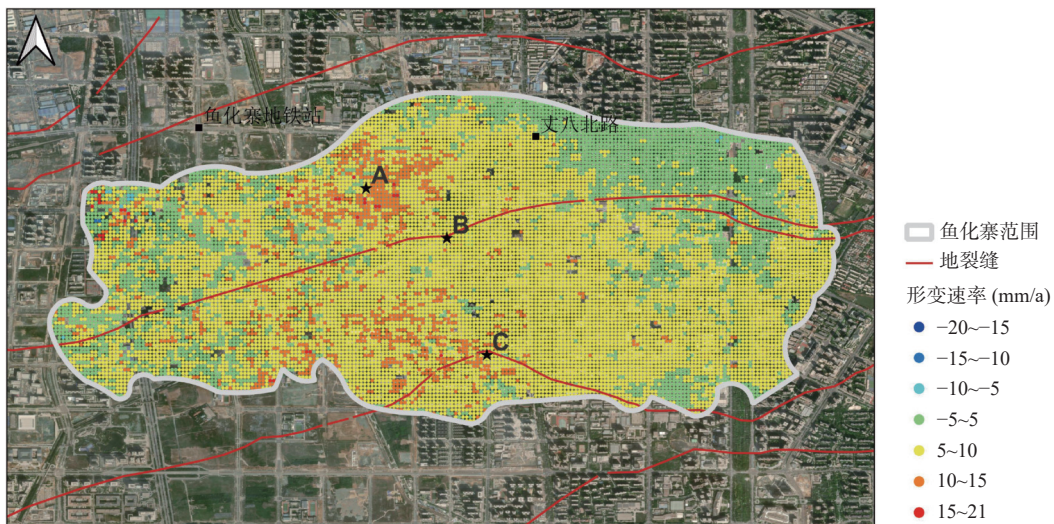


图 3 西安 2019~2022 年地表形变速率图

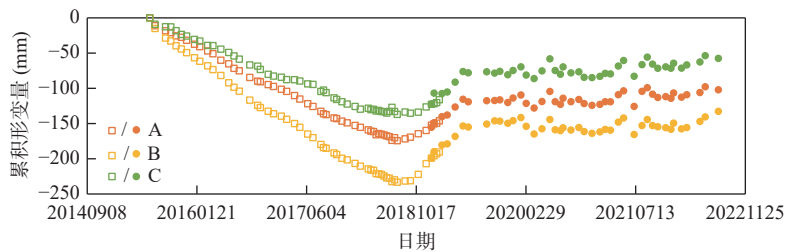
Fig. 3 Annual deformation rate map of Xi'an from 2019 to 2022



灰线区域为鱼化寨原沉降区域, 根据 Shi 等(2020)修改

图 4 鱼化寨地区 2019~2022 平均地表形变速率图

Fig. 4 Annual deformation rate map of Yuhua寨 area from 2019 to 2022



□代表的累积形变量源自 Shi 等(2020); ●代表的累积形变量来自于文中计算结果

图 5 鱼化寨地区 2015~2022 年累计形变量图

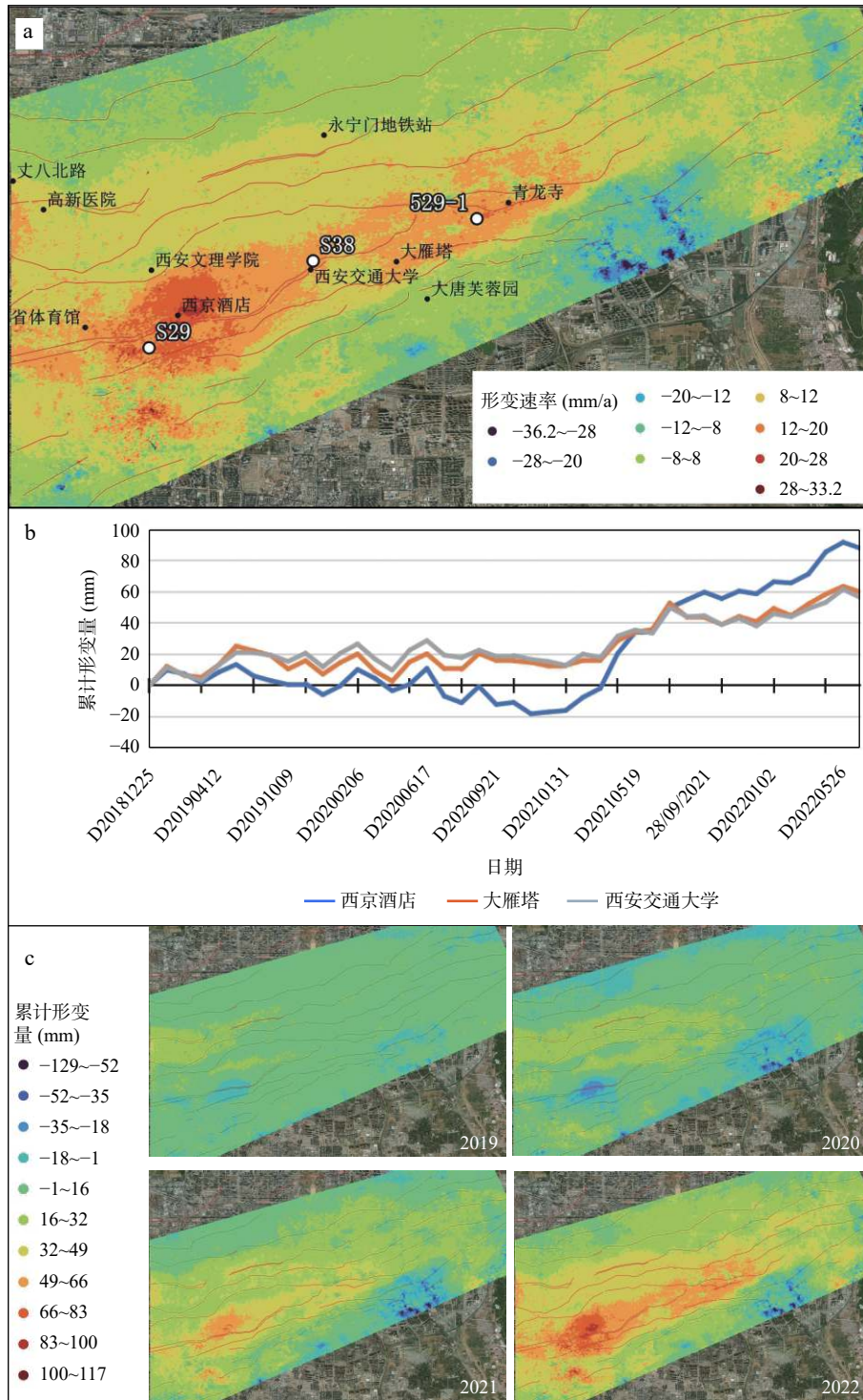
Fig. 5 Cumulative deformation of Yuhua寨 area from 2015 to 2022

累计沉降量不超过 20 mm, 形变速率不足 10 mm/a。而电子东街-大雁塔存在一个小范围的上升区域, 这

片区域始终缓慢上升, 累计上升量最大约为 18 mm。该形变趋势和空间分布与前人的研究结果基本一致,

这在很大程度上佐证了文中方法与结果的有效性 (Wang et al., 2019; Shi et al., 2020)。2021年1月起, 电子城大区域整体出现明显地表抬升现象, 形变中心位于西京酒店附近, 2021年10月之后抬升速率有所

放缓, 10个月内区域最大累计抬升形变量为76 mm。整个抬升形变区可见北东向的线性抬升带, 一直向青龙寺方向延伸, 地面回弹的发展表现为长轴方向与地裂缝方向近平行的椭圆形(图6)。在观测时间段内,



a. 2019~2022 形变速率图; b. 典型点位累计形变量; c. 区域累计时序形变图

图6 电子城地区形变图

Fig. 6 Deformation analysis of Dianzicheng area

电子城区域仍在持续抬升形变,最大累计回弹量约为 108 mm,中心最大平均形变速率可达 59 mm/a。

### 3.4 其他沉降区域

除了这两处大片地表回弹区以外,西安城区还分布有零星的沉降点,如马腾空地铁站、黄渠头地铁站等。这些地方地表一直在持续沉降中。以马腾空地铁站为例,沉降速率在 20~30 mm/a,近 4 年的累积沉降量最大约为 89 mm。马腾空地铁周边既无断裂经过,也无地裂缝经过。沿线附近由于施工建设隧道开挖,破坏原有土体结构和应力条件。地表沉降区内高层建筑数量快速增加,建筑物密集。多种因素叠加共同造成地铁 5 号线马腾空及其沿线的持续的不均匀地面沉降。

## 4 地面回弹变形驱动机制分析

西安市地面形变原因较为复杂,所处自然环境背景和城市化建设过程中高度频繁的人类活动均对地表形变有一定的影响。众多学者研究表明,承压水的超采应该是引起西安市内地面沉降的主要原因(Liu et al., 2018; 董英等, 2019; Peng et al., 2019; Wang et al., 2019; Shi et al., 2020; 冉培廉等, 2021; 孙月敏等, 2022; 王润泽等, 2023)。地下水位变化会造成土层表现出弹性、塑性、粘弹性和粘塑性等诸多不同力学性质的变形特性。西安地下土壤主要为黏土、粉质黏土与砂、砂砾石不等厚互层组成。在过量开采地下承压水的情况下,含水砂层被挤压,孔隙度减小,承压水头的大幅下降,使砂层和黏性土层原有的水力平衡被破坏,黏性土层中的孔隙水压力逐渐降低,随着孔隙水的排出,从而能在较短时间内产生较大的地面沉降量。承压水引起的地面沉降主要压密地层为粉土层、粉质黏土层和黏土层。地下水回灌过程中承压含水层水位上升时,黏土的压缩变形大多是不可逆的塑性和粘塑性变形,但砂土可以发生可能恢复的弹性和粘弹性变

形。弹性变形可以迅速恢复,而粘弹性变形的恢复具有时间依赖性。因此,在地下水禁止开采及回灌初期,承压水含水层地下水位快速恢复,地层将会短时快速回弹;地下水位将缓慢上升,地层将会持续慢速变形。近几年西安地区随着“引汉济渭”工程实施和城中村改造工程施工,地表水补给得到明显加强,市政供水基本实现城区的全覆盖,已全面禁止开采地下水,地下水位持续下降得到控制。此外,由于近十几年的城市建设,成片的住宅区和商业楼等大面积兴建,各建筑的容积率和密度都很高,导致建筑荷载在地表的不均匀分布高。西安城区的出露地层主要为上更新统的风积黄土,具有较大孔隙和高压缩性,短期增加的建筑物高荷载,对地面沉降的发展起到了一定的促进作用。随着城市改造推进,城区新增的建筑面积正在逐年减少,高层建筑从中心城区向四周扩展,中心城区的建筑荷载在一定程度下降,有利于形变区的回弹。因此,西安城区近几年表现出沉降速度减慢,甚至在典型沉降区如鱼化寨区域地表出现抬升现象,而沉降区仅随着人类工程增加在西南郊零星地区出现。

鱼化寨区域的产业主要以酒店、服装、化工等为主,存在众多写字楼、工业园区及居民楼,具有较高的人口密度,用水需求较大。2018 年鱼化寨正式开始拆迁改造,于 2020 年基本完成拆迁工作(图 7)。该地区的人口密度急剧下降,建筑荷载降低,用水需求也随之减少。为解决鱼化寨沉降问题,西安市 2018 年实施了鱼化寨地区地面沉降应急治理地下水回灌专项工程等一系列地下水回灌措施。在改造过程中将处理过的地表水注入地下含水层,采用人工补给地下水的回灌措施。大量的地下水回灌使得地下水得到有效的补充,地下水位有明显的快速回升。因此,在地下水位上升和人类活动减少的共同作用下,鱼化寨地区地表出约 90 mm 的快速回弹现象,土层表现为可恢复的弹性变形特征,持续时间 9 个月。从 2019 年 7 月开始,地表形变速度开始变缓,小于 10 mm/a,并可能



a. 2018 年 9 月; b. 2018 年 11 月; c. 2019 年 12 月

图 7 鱼化寨地区城市建设发展演化的光学影像图

Fig. 7 Optical image of Yuhuaizhai area

会继续保持很长的一段时间。

电子城区域由于基础设施较完善,相关建筑载荷引起的地面沉降已趋于稳定。区域内用水设施较完备,自备井早已被限制开采地下水,政府积极实行人工回灌的措施。因此,该区域内的形变主要受承压水的水位影响。笔者收集了2015~2022年区域的承压水位(图8),可以看到电子城区域的水位一直是稳定上升。西京酒店附近S29点的水位从2020年9月起有大幅度的突然升高,截止2021年12月,该地区潜水水位从350.1 m上升至380.4 m。相对应的西京酒店周边从2021年1月起,有明显的地表回弹表现,1月至10月期间抬升速度较快,整体抬升量约为80 cm(图6)。在S29水位区域升幅稳定后,2021年10月至观测期结束,累积抬升40 mm,电子城区域的形变速率变缓,逐渐趋于稳定。

因此无论是电子城区域还是鱼化寨区域,地下水位快速恢复都引起了地层大幅度短时的回弹。鱼化

寨地区地表快速抬升持续了9个月,电子城区域的地表快速抬升持续约10个月,这个阶段可以视作土层快速变形的弹性形变阶段。鱼化寨区域的A、B、C三点分别有80%、79%、76%的抬升形变发生在这个阶段。而电子城区域西京酒店、大雁塔、交通大学分别有88%、85%、86%的形变发生的在这个阶段(图9)。地表快速抬升并不会持续永久发生,具有一定的时段限制。以西安地区土层的性质来看,土层的弹性回弹阶段持续时间不超过10个月,随即进入随时间缓慢形变的粘弹性阶段。一般来说,可恢复的地表变形占受地下水引起地表总形变的比例很小(Zhang et al.,2015),地表抬升的累积形变量有限。目前各区域的总体回弹量在安全范围,对周边的地铁及建筑的影响有限。未来仍需对西安地面形变进行继续监测,及时发现变化。笔者尝试通过地下水水位和含水层补给相关数据,以及实验室测试黄土岩土参数,对地面沉降和抬升程度进行定量预测。

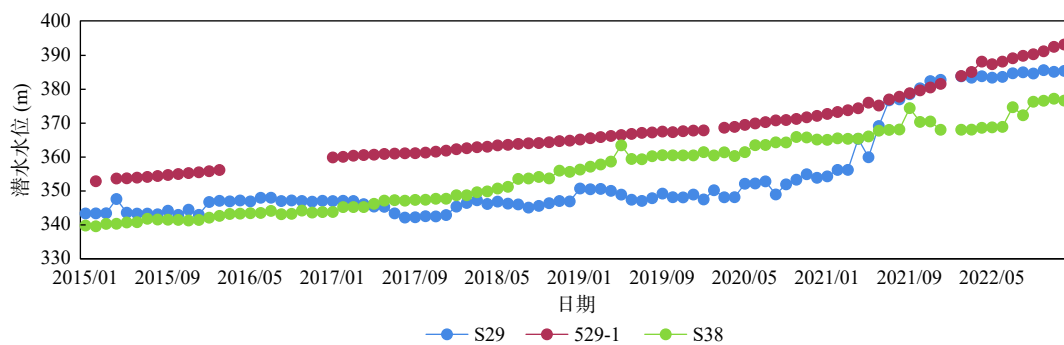


图8 电子城区域地下水水位变化曲线图

Fig. 8 Groundwater levels variation of Dianzicheng area

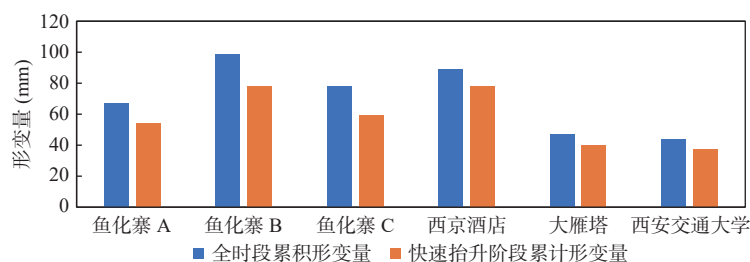


图9 快速抬升阶段与监测时间段的累计形变对比图

Fig. 9 Comparison of cumulative deformation between the rapid uplift stage and the whole monitoring period

## 5 结论

(1) 随着一系列地下水回灌工作的开展,西安城区内地下水位线有所回升,地面沉降活动减弱。典型沉降区鱼化寨、电子城等已经出现了地面回弹现象,

总体回弹量在安全范围。沉降区渐分散并缩小,呈现出明显的离散趋势。地下水位变化是导致地表回弹的重要原因。

(2) 2018年9月鱼化寨区域开始出现明显地面抬升现象,直至2019年上半年鱼化寨区域仍在持续回弹。地表抬升回弹期间,抬升最大值约为89 mm。电

子城区域从 2021 年开始, 地表回弹开始明显加剧。最大的地面回弹位于西京酒店附近, 累计回弹量约为 120 mm。

(3) 西安地区地下水位快速恢复都引起了地层大幅度短时的回弹。大部分地表抬升形变都发生在这个阶段, 持续时间不超过 10 个月, 然后进入随时间增加缓慢抬升形变的阶段。各区域的总体回弹量在安全范围, 对周边的地铁及建筑的影响有限。

## 参考文献(References):

- 董英, 张茂省, 刘洁, 等. 西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 95-102.
- DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling Relationship between Groundwater and Ground Fissures of Land Subsidence in Xi'an City and Risk Prevention and Control Technology[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 95-102.
- 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LIAO Mingsheng, WANG Teng. Time Series InSAR Technology and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- 彭建兵, 张勤, 黄强兵, 等. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- PENG Jianbing, ZHANG Qin, HUANG Qiangbing, et al. Xi'an Ground Fissure Geohazard [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 冉培廉, 李少达, 杨晓霞, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的西安市地面沉降监测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 66-74.
- RAN Peilian, LI Shaoda, YANG Xiaoxia, et al. Monitoring of Xi'an city land subsidence based on SBAS-InSAR[J]. Journal of Henan Poly technic University (Natural Science), 2021, 40(3): 66-74.
- 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): 553-564.
- 王润泽, 费敏, 梁世川, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术监测西安市地表形变特征[J]. 测绘通报, 2023, 1: 173-178.
- WANG Runze, FEI Min, LIANG Shichuan, et al. Monitoring of surface deformation characteristics in Xi'an based on SBAS-InSAR technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023, 1: 173-178.
- 张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1214-1222.
- ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, DING Xiaoli, et al. Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1214-1222.
- 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1300-1307.
- ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision Space Observation Technique for Geological Hazard Monitoring and Early Warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307.
- 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 And Remote Sensing, 2002, 40: 2375-2383.
- Feng M, Bie L, Rietbrock A. Probing the Rheology of Continental Faults: Decade of Post-Seismic InSAR Time-Series Following the 1997 Manyi (Tibet) Earthquake[J]. Geophysical Journal International, 2018, 215: 600-613.
- Fielding E J, Blom R G, Goldstein R M. Rapid Subsidence Over Oil Fields Measured by SAR Interferometry[J]. Geophysical Research Letter, 1998, 25: 3215-3218.
- Liu N, Huang Q, Wang L, et al. Dynamic Characteristics Research of a Ground Fissure Site at Xi'an, China[J]. Tunnelling And Underground Space Technology, 2018, 82: 182-190.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138-142.
- Peng M, Zhao C, Zhang Q, et al. Research on Spatiotemporal Land Deformation (2012-2018) Over Xi'an, China with Multi-Sensor SAR Datasets[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 664.
- Qu F, Zhang Q, Lu Z, et al. 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: 366-376.
- Shi W, Chen G, Meng X, et al. Spatial-Temporal Evolution of Land Subsidence and Rebound over Xi'an in Western China Revealed by SBAS-InSAR Analysis[J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3756.
- Wang B, Zhao C, Zhang Q, et al. Sequential InSAR Time Series Deformation Monitoring of Land Subsidence and Rebound in Xi'an, China[J]. Remote Sensing (Basel, Switzerland), 2019, 11: 2854.
- Zhang Y, Wu J, Xue Y, et al. Land Subsidence and Uplift Due to Long-Term Groundwater Extraction and Artificial Recharge in Shanghai, China[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23: 1851-1866.