

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.018

基于 SBAS-InSAR 的合肥市地面沉降监测研究

陈厉丽¹, 熊立², 刘建敏¹, 陈义华¹, 李振生¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 江西省应急管理厅减灾备灾中心, 江西 南昌 330030)

摘要:文章采用短基线集合成孔径雷达干涉测量(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术对 Sentinel-1A 卫星升轨数据进行处理分析,对合肥市地面形变开展监测研究。结果表明:合肥市地面形变状态较为平稳,大部分地区地面年平均形变速率在 $-4\sim 4$ mm/a 之间;年平均形变速率超过 10 mm/a 的显著沉降区和抬升区各 5 处,其中高新技术产业开发区附近具有最大沉降形变速率,形变速率为 -24 mm/a,沉降量为 31 mm;竹溪站附近具有最大抬升形变速率,形变速率为 12 mm/a,抬升量为 20 mm。综合分析表明,合肥市地面沉降主要受断裂活动控制,后期受工程建设扰动较大,而地面抬升区分布主要受工程扰动控制。

关键词:地面沉降;短基线集干涉测量;Sentinel-1A 卫星;实测水准数据;形变分析

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)05-0685-06

Study on the monitoring of ground subsidence in Hefei City based on SBAS-InSAR

CHEN Lili¹, XIONG Li², LIU Jianmin¹, CHEN Yihua¹, LI Zhensheng¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Disaster Reduction and Preparedness Center of Department of Emergency Management of Jiangxi Province, Nanchang 330030, China)

Abstract:In this paper, small baseline subset interferometric synthetic aperture radar(SBAS-InSAR) technology is used to process and analyze the Sentinel-1A ascending orbit data, and the monitoring research on ground deformation in Hefei City is carried out. The results show that the state of ground deformation in Hefei City is relatively stable. The average annual ground deformation rate in most areas is within $-4\sim 4$ mm/a. There are five significant subsidence areas and five significant uplift areas with an average annual deformation rate exceeding 10 mm/a. Among them, there is the largest subsidence deformation rate near the high-tech industrial development zone, the deformation rate is -24 mm/a, and the subsidence amount is 31 mm; the Zhuxi station has the largest uplift deformation rate, the deformation rate is 12 mm/a, and the amount of uplift is 20 mm. Comprehensive analysis shows that the ground subsidence in Hefei City is mainly controlled by fault activity, and greatly disturbed by engineering construction in the later stage; the distribution of ground uplift area is mainly controlled by engineering disturbance.

Key words:ground subsidence; small baseline subset interferometric synthetic aperture radar(SBAS-InSAR); Sentinel-1A satellite; measured level data; deformation analysis

地面沉降是指在自然或人为因素作用下引起的区域性地面标高降低的一种环境地质现象,是

一种不可补偿的永久性地质灾害^[1],会引发内涝加重、地面水环境恶化、地裂缝等危害。地面沉降

收稿日期:2021-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41672052);合肥工业大学应用培育计划资助项目(JZ2020YYPY0244)

作者简介:陈厉丽(1997—),女,安徽池州人,合肥工业大学硕士生;

陈义华(1973—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者,E-mail:286241467@qq.com.

的发生具有缓变、不易察觉的特点,防治也具有一定难度。传统的地面沉降监测方法虽然精度高,但是存在监测点位密度低、测量周期长、工作量大、经济成本高等问题。起源于 20 世纪 60 年代的合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术有效弥补了传统沉降监测方法的缺点,为进行大范围、长时间的地面沉降监测提供了新的解决方案。合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术是 InSAR 技术在应用方面的一个延伸,理论上可以捕捉到 mm 级至 cm 级的地面形变信息。然而,随着 D-InSAR 技术的广泛应用,人们发现该方法会在监测长时间范围内的微小形变时出现时空失相干的现象,使得形变监测的精度降低^[2]。为了弥补 D-InSAR 技术的不足,获取长时序、高精度的地面形变,国内外研究者在 D-InSAR 技术基础上,对 InSAR 时间序列进行研究,常用技术有永久散射体 InSAR (persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)^[3]技术、短基线集 InSAR (small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)^[4]技术、干涉图堆叠 InSAR (stacking-InSAR)^[5]技术、临时相干点 InSAR (temporarily coherent point interferometric synthetic aperture radar, TCP-InSAR)^[6]技术及 SqueeSAR 技术(分布永久散射体卫星雷达监测技术)^[7]。

本文以合肥地区为研究区域,以 Sentinel-1A 卫星数据为数据源,采用 SBAS-InSAR 技术得到研究区地面形变值和形变速率,并利用同期实测水准数据对 SBAS-InSAR 技术监测结果进行精度验证;在此基础上,分析合肥地区地面沉降过程与机理,以为合肥城市建设和发展提供决策支持。

1 研究区域和数据处理流程

1.1 研究区域

合肥市是安徽省省会,位于江淮之间、长江三角洲西端;从区域构造位置看,合肥市位于合肥断陷盆地东缘中部;地形以平原、丘陵为主,第四纪松散堆积物广泛分布,基岩零星出露。本文研究区域为合肥市市区及周边地区,大致经纬度范围为 $117^{\circ}00' \sim 117^{\circ}40' E$, $31^{\circ}30' \sim 32^{\circ}10' N$ 。

1.2 数据源

本文收集覆盖合肥地区 17 景 Sentinel-1A 卫

星升轨干涉宽带(interferometric wide swath, IW)模式 VV 极化影像数据,时间跨度为 2016 年 8 月 29 日至 2018 年 4 月 9 日。精密轨道数据采用成像 21 d 后发布的精密定轨(precise orbit determination, POD)数据,定位精度可以达到 5 cm。数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据选择分辨率为 90 m 的 STRM3(Shuttle Radar Topography Mission Global Coverage, 航天飞机雷达地形测绘使命全球覆盖)数据。验证数据选择研究时段内 2016 年 11 月 10 日、2018 年 4 月 11 日的 33 个水准点实测资料。

1.3 数据处理流程

采用 SBAS-InSAR 技术反演地表形变,具体数据处理流程如图 1 所示。数据处理中的主要内容如下:

(1) 选定 2017 年 3 月 9 日的影像为超级主影像,作为统一配准的基准,将其他影像与超级主影像进行配准,得到干涉像对时空基线图。

(2) 用 D-InSAR 技术处理连接的干涉像对,进行相干性计算,结合分辨率为 90 m 的 SRTM3 DEM 数据消除平地 and 地形相位影响。

(3) 相位解缠是将干涉图中的缠绕相位还原成真实相位的过程,是 SBAS-InSAR 技术处理中的关键一步,相位解缠的结果直接关系到形变结果的精度。传统的二维相位解缠是将干涉图上相邻两点之间的相位差分别在水平和垂直方向上进行积分,易受到“平地效应”和噪声等因素的影响,导致相位数据不完整。本文研究数据为时间序列数据,为了充分发挥研究数据的三维特性,对满足条件的像对采用三维相位解缠方法,针对相干性低的区域,参考其他像对的相应区域进行处理,可获得比二维相位解缠更精确的结果;此外,研究数据的时相选择与时空基线相对扩大的阈值可保证紧凑的三角网,因而没有空缺和很多的边界连接,同时也保证了三维相位解缠的精度。

(4) 根据干涉图的相干性和条纹质量,结合相干系数图和解缠结果,评价干涉像对的质量,剔除质量较差的像对,然后通过外部地面控制点(ground control point, GCP)进行轨道精炼与重去平,扣除残余地形相位与轨道误差。

(5) 结合奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法,通过每个相干点的形变速率和高程系数组成的方程求解线性形变速率和高程误差。

(6) 采用时间高通滤波、空间低通滤波去除

大气相位的影响,得到非线性形变相位;最后将线性形变相位与非线性形变相位叠加,得到完整的时序形变信息。

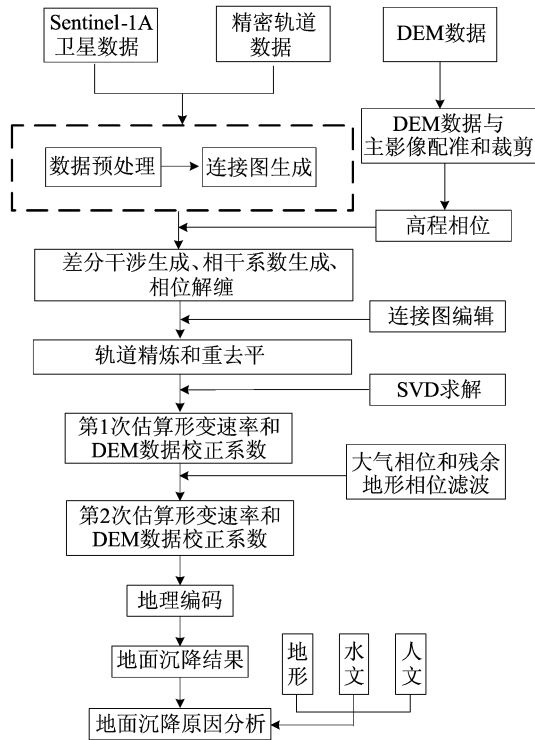


图 1 研究区数据处理流程图

2 合肥市地面沉降结果验证与分析

2.1 地面沉降 SBAS-InSAR 反演结果验证

在研究区选取 2016 年 11 月 10 日和 2018 年 4 月 11 日获取的 33 个实测水准点数据,计算地面累计沉降量,并将其与 SBAS-InSAR 技术反演结果进行对比验证,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,SBAS-InSAR 技术反演结果与实测水准数据结果显示的地面沉降趋势大致吻合,2 种方法获取的数据之间差值不超过 5 mm,这表明 SBAS-InSAR 技术反演的地面沉降结果是可靠的,精度可以达到 mm 级。

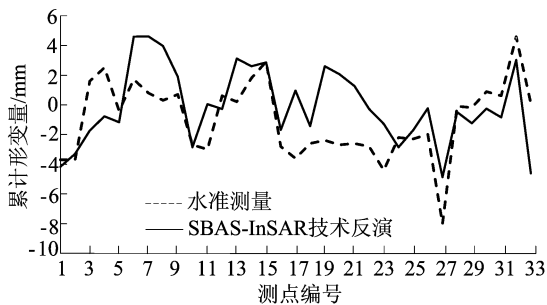


图 2 33 个测点水准测量与 SBAS-InSAR 技术反演结果对比

2.2 地面沉降结果分析

经过数据处理,得到 2016 年 11 月 10 日至 2018 年 4 月 11 日合肥市年平均形变速率和累计形变量,如图 3、图 4 所示。

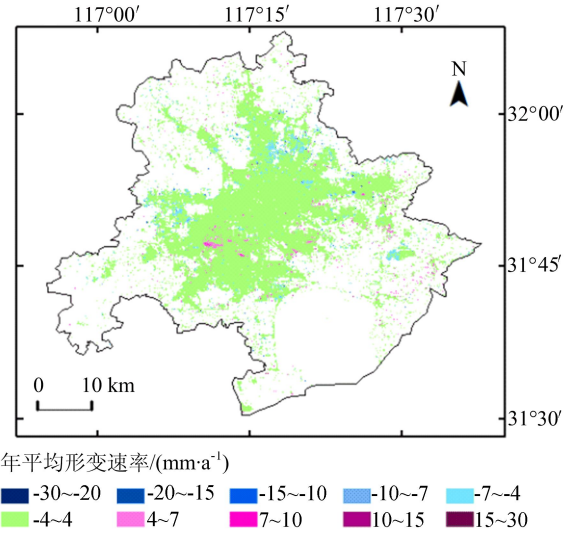


图 3 合肥市 2016-11-10—2018-04-11 年平均形变速率

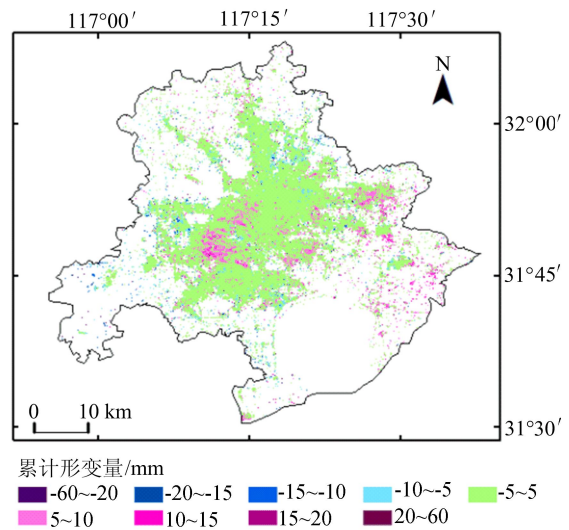


图 4 合肥市 2016-11-10—2018-04-11 累计形变量

5 个沉降区与 5 个抬升区位置及断裂分布如图 5 所示。

由图 3~图 5 可知:合肥市地面形变总体较平稳,大部分区域地面形变速率为 $-4 \sim 4$ mm/a,累计形变量为 $-5 \sim 5$ mm;年平均形变速率超过 10 mm/a 的区域面积占研究区总面积的 4%,可划分为 5 个明显的沉降区和 5 个明显的抬升区。

地面沉降明显的区域大都呈斑点状分布,5 个明显沉降区分别位于高新技术产业开发区、合肥北站、万达城、三十埠村及肥东县小王中份附近。其中,沉降速率最大处位于高新技术产业开

发区,该处地面形变区域处于断裂 F2、F4 构成的三角区域中,形成多个沉降漏斗,最大沉降速率为 -24 mm/a ,累计沉降量为 31 mm ;面积最大的沉

降区位于合肥北站附近,该处位于断裂 F1、F6 和 F11 构成的三角区中,沉降区面积累计约为 $2\,350 \text{ hm}^2$ 。

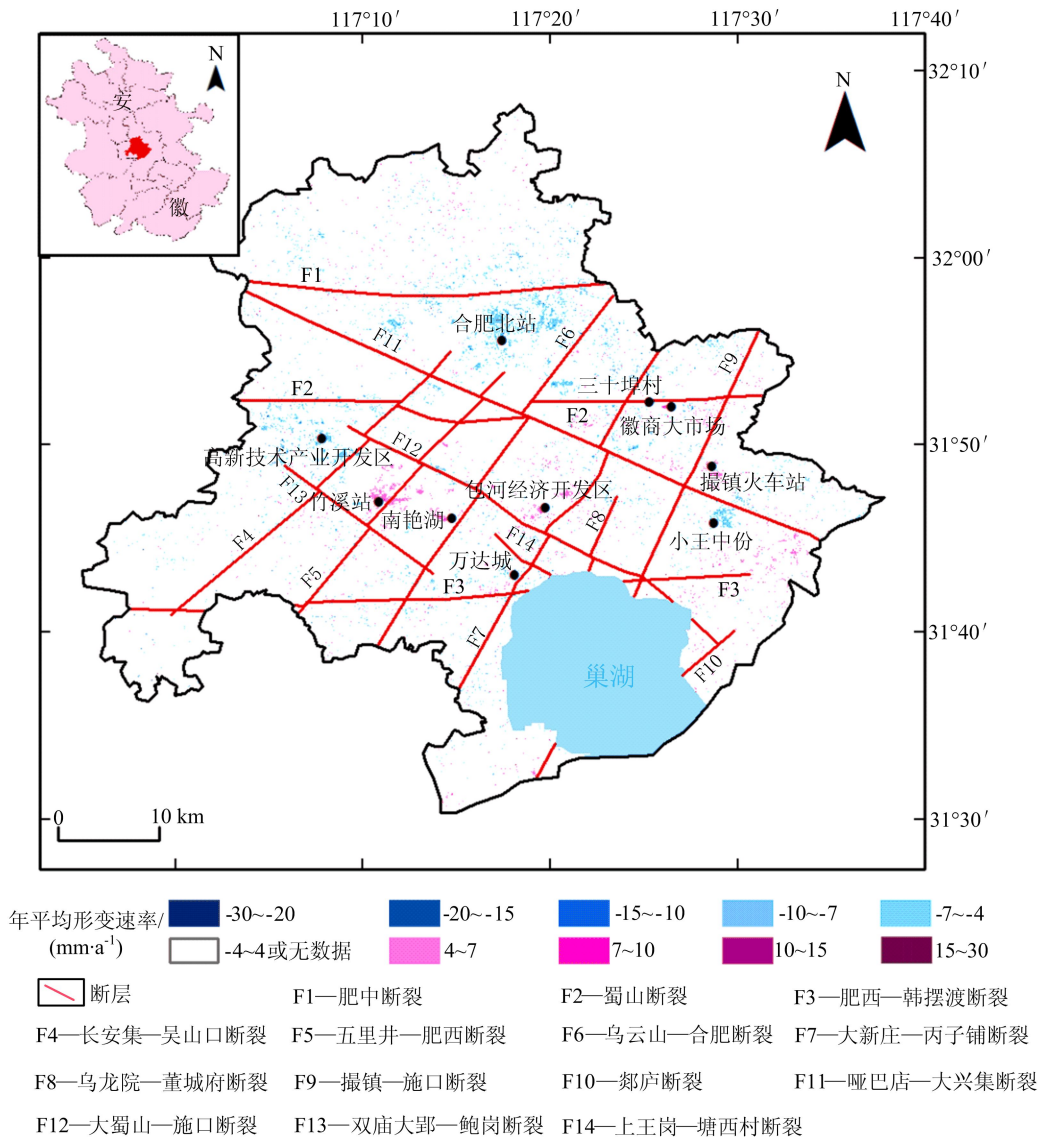


图 5 2016-11-10—2018-04-11 合肥市地面 5 个沉降区与 5 个抬升区位置及断裂分布

地面抬升明显的区域呈不规则几何状,5 个明显抬升区分布在竹溪站、南艳湖、徽商大市场、包河经济开发区和撮镇火车站附近。其中抬升速率最大区与抬升面积最大区均位于竹溪站附近,该处地面最大抬升速率为 12 mm/a ,累计抬升量为 20 mm ,抬升区面积累计约为 $3\,420 \text{ hm}^2$ 。

3 合肥市地面形变原因分析

考虑到合肥市地质背景和所处地理环境,推测引起地面形变的因素可能有构造活动、地下水过量开采和建筑工程活动等。

3.1 地下水开采的影响

合肥市水资源较丰富,天然河流、人工渠道纵横交错,天然湖泊及大、中、小水库星罗棋布,地下水仅零星开采,而且近年来合肥市对地下水开采开展严格管制,因此地下水开采引起的地面沉降可能性较小。基于短基线的研究也证实,合肥地区由地下水开采所引发的地面沉降目前尚不明显^[8]。

3.2 断裂构造的影响

合肥地区的区域构造特征受南部的大别造山带和东侧的郟庐断裂带控制,分布近东西向、北东—北北东向和北西—北北西向 3 组断裂。近东

西向断裂形成最早,属于大别造山带印支期前陆变形的产物,早期为南倾的逆冲断裂,晚期转变为正断裂,控制白垩系至古近系沉积。北东—北北东向断裂及其伴生的北西—北北西向断裂形成较晚,与斜贯合肥地区东部的郟庐断裂带密切相关,多形成于中生代,其中北东—北北东向断裂多为北西倾逆断裂,北西—北北西向断裂多为北东倾张扭性断裂^[9]。晚第三纪以来,合肥地区新构造运动较为活跃,主要表现为间歇性的差异升降运动,3组断裂仍有活动。本文的分析结果显示,沉降区明显受到3组断裂的控制,位于断裂控制的三角沉降带内,大多数沉降区位于北东—北北东向断裂的西北盘、北西—北北西向断裂的东北盘及近东西向断裂的南盘。合肥地区多条活动断裂的运动可能造成地表发生形变^[10],肥中断裂(F1)、哑巴店—大兴集(肥东)断裂(F11)、乌云山—合肥(西山驿)断裂(F6)3条断裂在2017—2019年期间的形变模拟显示,这些断裂附近的形

变差异主要受断裂活动的影响^[11]。尽管合肥地区剪应力值自2002年以来一直处于较低的水平^[12],区内活动断裂的运动仍是地面沉降的主要控制因素。

3.3 工程建设的影响

引起合肥市地面形变的可能因素还有工程建设。结合地图可以发现,重点形变区域多位于正在建设中的新区、工业园区,或沿铁路或市区外主干道线状分布,表明工程建设是合肥地区地面形变的影响因素之一。典型实例有竹溪站附近、三十埠村和徽商大市场附近的形变。

竹溪站附近地面抬升与铁路和公路建设有明显相关性,形变区域北侧为合肥应流工业园与在建中的繁华大道,东侧为东湖高新合肥创新中心和在建中的合九线铁路,西侧为应流工业园。2016—2018年4个时间点竹溪站附近地面卫星影像如图6所示,竹溪站附近地面累计形变量如图7所示。

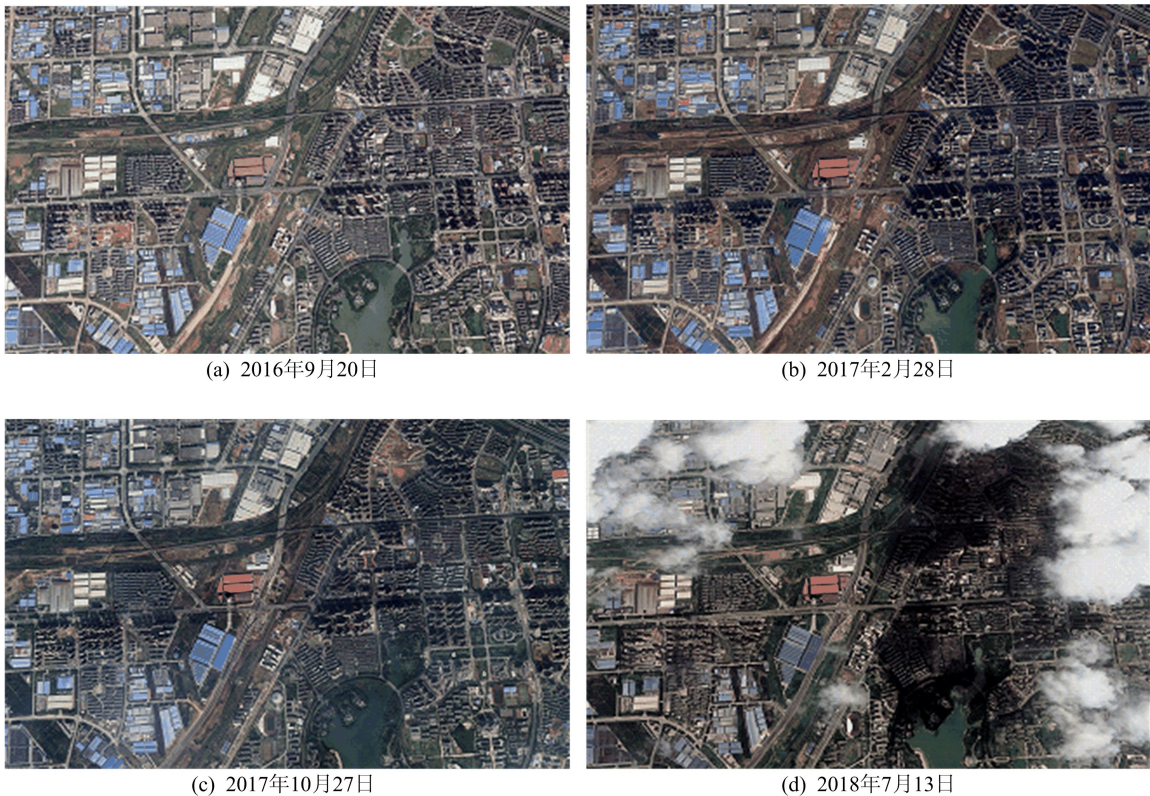


图6 2016—2018年4个时间点竹溪站附近地面卫星影像

从图6、图7可以看出,整个研究时段内铁路工程动土痕迹明显,对应该区域整体上呈抬升状态,累计最大抬升量为18 mm左右;从图6b、图6c可以看出,在2017年2月28日至2017年10月27日,铁路建设痕迹不明显,但新增了1条

公路,即集贤路,由于汽车相较于火车对地基压力小,因此公路路基厚度也低于铁路路基,由图7可知,对应该时段内的地面抬升较为平缓。

三十埠村与徽商大市场相距较近,均发生了幅度比较大的小面积地面形变,前者沉降,而后者

抬升,地面形变与持续的工程建设有明显的关系。其中沉降区三十埠村附近靠近徽商新驿科技平台物流园与在建中的合宁铁路,在整个研究时段内地面持续沉降,最大累计沉降量为 -25 mm 左右;抬升区徽商大市场附近地面累计抬升量最大为 16 mm 。从卫星影像图中可以看出,整个研究时段内,该区域一直存在工程建设,西南方向有正在修建中的东风大道公路与商杭高速铁路,中间区域与南侧新建了几个食品公司,其中包括安徽玛仕达可食品有限公司、安徽新希望白帝乳业有限公司等。

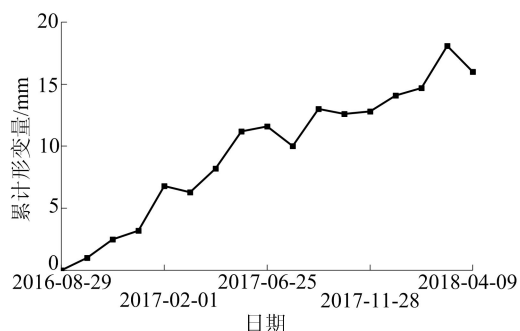


图 7 2016—2018 年竹溪站附近地面累计形变量

综合来看,合肥市地面沉降的主控因素是断裂活动,其次是工程建设扰动,地下水过量开采影响不明显;地面抬升的主控因素是工程建设扰动。

4 结 论

本文采用 SBAS-InSAR 技术监测 2016 年 8 月 29 日至 2018 年 4 月 9 日合肥地区地面形变,结果表明,研究区地面形变总体不明显,显著形变区域有 5 个沉降区和 5 个抬升区。地面沉降区位于高新技术产业开发区、合肥北站、万达城、三十埠村及小王中份附近;地面抬升区位于竹溪站、南艳湖、徽商大市场、包河经济开发区和撮镇火车站附近。

合肥地区地面形变主要受断裂和工程建设影

响,其中沉降区域分布主控因素是断裂和工程建设,抬升区域分布主控因素是工程建设。

[参 考 文 献]

- [1] 袁悦. 基于 SBAS-InSAR 技术的海口地区地面沉降监测及机理分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020.
- [2] 梁泽浩,王晋,李广雪. 基于时序 InSAR 的即墨市区地表形变监测[J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(1):77-81.
- [3] YOU M, TIMOTHY T M, LEE S, et al. Displacement measuring of coastal area using PS-InSAR[J]. Journal of Coastal Research,2019(91):291-295.
- [4] SHI W, CHEN G, MENG X M, 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.
- [5] SHA Y L, LIU G X, WANG X W, et al. Ground subsidence detection of Beiquan mining area based on stacking time-series InSAR[J]. Geomatics Science and Technology,2020,8(2):60-67.
- [6] 鹿璐,范洪冬,郑美楠,等. 基于 TCP-InSAR 的采动区铁路动态沉降监测与时序分析[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(2):164-168.
- [7] KIM D J, LEE Y C. Comparison of SqueeSAR analysis method and level surveying for subsidence monitoring at landfill site[J]. Journal of Cadastre & Land InformatiX,2018,48(2):137-151.
- [8] 魏雪梅. 短基线集技术的合肥地表形变监测研究[J]. 测绘科学,2018,43(7):67-71.
- [9] 方良好,郑颖平,疏鹏,等. 合肥盆地东缘北西向断裂活动[J]. 华北地震科学,2020,38(3):6-12.
- [10] 李玲利,黄显良,姚华建,等. 合肥市地壳浅部三维速度结构及城市沉积环境初探[J]. 地球物理学报,2020,63(9):3307-3323.
- [11] 董雅竹. 基于 PS-InSAR 技术的地表形变过程研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [12] 彭苗枝,李运怀,管后春,等. 影响合肥城市地下空间开发的地质因素分析[J]. 桂林理工大学学报,2019,39(2):396-401.

(责任编辑 张淑艳)