

张雪琪,朱武,李文梁,等. 2020. 时序 InSAR 技术用于延安新区高填方地面沉降监测[J]. 工程地质学报, 28(增): 102-107. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-342

Zhang Xueqi, Zhu Wu, Li Wenliang, et al. 2020. Monitoring the ground subsidence over Yan'an high-filled region by using time series InSAR technique[J]. Journal of Engineering Geology, 28(S): 102-107. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-342

时序 InSAR 技术用于延安新区高填方地面沉降监测*

张雪琪^① 朱武^{①②} 李文梁^① 张勤^{①②}

(^①长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054, 中国)

(^②地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054, 中国)

摘要 2018年8月,重大黄土丘陵沟壑区区域工程造地项目——延安新区岩土工程全面完成,共形成建设用地及生态综合治理用地 21.3 km²。为掌握工程造地的变形规律,本文基于自2014年10月~2019年7月期间的191景 Sentinel-1A 数据,利用短基线集时序 InSAR(SBAS-InSAR)技术,获取了研究区时空形变结果,并对沉降机理进行了讨论分析。结果表明沉降区主要集中在填埋区部分,最大年平均形变速率达到 10 cm·y⁻¹。通过对监测结果的分析 and 实地调查,推测出研究区域的地表沉降原因是大规模填方工程引起的填方体固结,其中填方厚度为控制沉降速率的主要因素。研究结果表明 SBAS-InSAR 技术在工程造地区域的地表沉降监测方面具有较强的能力,提取的形变结果可为生产单位和政府部门分析决策提供依据。

关键词 工程造地; 延安新城; SBAS-InSAR; 地面沉降; 原因分析

中图分类号: P642.26 **文献标识码:** A **doi:** 10.13544/j.cnki.jeg.2020-342

MONITORING THE GROUND SUBSIDENCE OVER YAN'AN HIGH-FILLED REGION BY USING TIME SERIES INSAR TECHNIQUE

ZHANG Xueqi^① ZHU Wu^{①②} LI Wenliang^① ZHANG Qin^{①②}

(^①School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

(^②State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China)

Abstract In August 2018, the land creation project over Yan'an loess hilly-gully region has completed its geotechnical engineering. A total of 21.3 km² of new land is created for urban construction. In order to monitor the ground subsidence due to land creation, 191 sentinel-1A images spanning from October 2014 to July 2019 are processed by small baseline subset InSAR(SBAS-InSAR) technique. The results showed that the subsidence area is mainly concentrated in the land filling area, where the maximum deformation rate reaches 10 cm·y⁻¹. Based on the analysis and field investigation, the severe subsidence over the study area is caused by the consolidation of filling soil, and the filling thickness is the main factor controlling the subsidence rate. Our result demonstrates the reliability of SBAS-InSAR technique in ground subsidence monitoring over soil-filling region, and the obtained

* 收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(资助号: 41790445, 41941019, 41731066), 科技部重点研发项目(资助号: 2018YFC1505101, 2019YFC1509802), 中央高校基金(资助号: 300102269207, 300102269303).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41790445, 41941019, 41731066), the National Key R&D Program of China(Grant Nos. 2018YFC1505101, 2019YFC1509802) and the Fundamental Research Funds for the Central University (Grant Nos. 300102269207, 300102269303).

第一作者简介: 张雪琪(1995-), 女, 硕士生, 主要从事 InSAR 方面的科研工作. E-mail: 2018126051@chd.edu.cn

通讯作者简介: 朱武(1982-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事 InSAR 方面的科研与教学工作. E-mail: zhuwu@chd.edu.cn

deformation results can provide sound management for local government.

Key words Land creation; Yan'an new city; SBAS-InSAR; Land subsidence; Cause analysis

0 引言

我国的黄土高原地区地表沟壑纵横,建设用地的紧缺,严重制约经济发展(Chen, 2019)。以延安市为例,该市三面环山且处于延河、南川河二水交汇之处,市区沿河谷地带呈“Y”字形展开,是典型的线性城市。延安市面积为 36 km^2 ,市区人口约 50×10^4 人,人口密度达到 $1.4 \times 10^4/\text{km}^2$ 。为了缓解用地压力,国家在 2011 年启动了以平山填谷为主要形式的造地工程,延安市第 4 次党代会确立了“中疏外扩,上山建城”的城市发展战略,即通过“削山、填沟、造地、建城”,将黄土沟壑地区整理成新区建设用地,建立了一个造地面积为 21.3 km^2 的新城市——延安新区,极大程度上改善了延安人多地少的现状(高建中, 2019)。然而“中疏外扩,上山建城”虽然拓宽了城市建设用地,缓解了人多地少,发展困难的现状,但是实施如此大规模,高填方的填埋工程必然会带来不可忽视的地质灾害和环境破坏,如山体滑坡,地面沉降,破坏野生动植物生存环境等。根据已有的研究资料表明,高填方地基在填筑完工之后,会发生较大的工后沉降,持续时间可达几年甚至是几十年,严重威胁到建、构筑物的建设及使用,进而威胁到城市和居民安全(郅彬等, 2018)。

为了保证平山造城工程的安全性,建立有效的预警机制,必须进行高效准确的变形监测。但是传统的基于离散点的地表变形监测方法耗时、耗力、耗人且时效性差,在大范围地表形变监测时效率低下。近年来兴起的合成孔径干涉雷达测量(InSAR)技术由于其监测范围广、全天候、成本低以及数据处理快等优点,已被广泛应用于滑坡、火山、地震、沉降等变形监测中(张静等, 2018; 陈汉亭, 2019)。

为了更好地研究高填方地区沉降变形的时空演化过程,本文以延安新区为例,利用小基线集合成孔径雷达干涉(SBAS-InSAR)技术获得了延安新区地区 2014 年 10 月~2019 年 7 月的时间序列变形。通过时间形变序列和年形变速率,完整地展示了延安新区沉降发展的时空特征。通过 InSAR 数据内部对比验证了此次研究结果的可靠性,并分析了延安新区沉降的原因。

1 研究区域

1.1 研究区域位置

延安新区位于陕西省延安市,延安市位于陕西省北部,地处黄河中游,黄土高原的中南部,市境介于北纬 $35^{\circ}21' \sim 37^{\circ}31'$,东经 $107^{\circ}41' \sim 110^{\circ}31'$ 之间(图 1)。延安新区位于清凉山北部和延河流域,距离延安市区仅 5 km,海拔 1200 m,属于温带半干旱大陆性季风气候(Wu et al., 2019),平均最高气温 17.2°C ,最低气温 3.5°C ,年平均降雨量为 512 mm,其特点是四季区分明显,春季干燥少雨,夏季炎热多雨,秋季湿润多阴,冬季雨雪稀少。

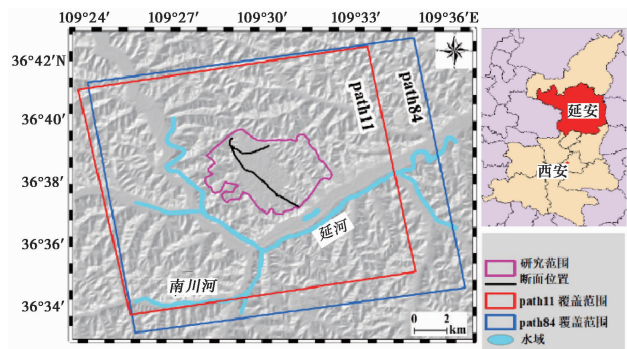


图 1 研究区及 Sentinel-1A 数据覆盖范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the research area and Sentinel-1A SAR data coverage

1.2 研究区域地理条件

延安市地处华北地台的鄂尔多斯台向斜的中部,其地层属华北区地台型地层系统中的一部分(高建中, 2019)。延安新区的主要地层有第四系全新统冲洪积层及淤积层、全新统冲洪积层、全新统滑坡堆积层、上更新统马兰黄土、上更新统冲洪积层、中更新统离石黄土,新近系红黏土,侏罗系碎屑岩层。图 2 是延安新区地质断面图,可以看出延安新区的主要覆盖物为黄土、古土壤以及红黏土。此类土壤具有高压缩性和湿陷性,导致施工难度大且极易引发地面沉降、滑坡等地质灾害。

1.3 研究区域工程概况

延安新区“平山造城”工程是通过“削山、填沟、造地、建城”,将黄土沟壑地区整理成新区建设用

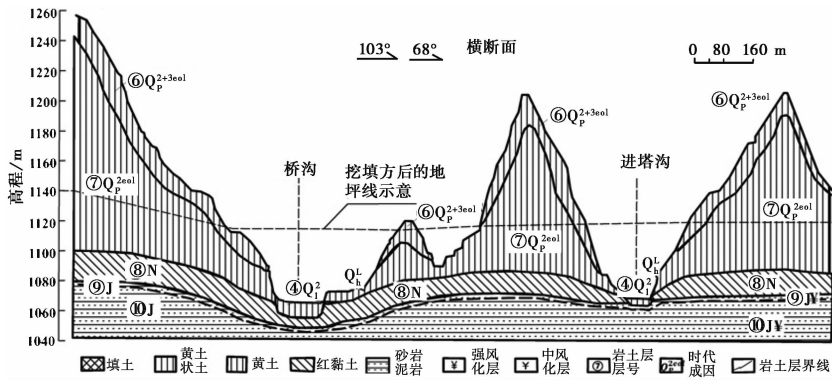


图2 研究区地质断面图(高建中,2019)

Fig. 2 Geological profile of the study area(Gao, 2019)

地。计划用10年时间,建成总面积为78.5 km²的新城。按照“依托老城,沿川展开,整流域治理”的原则,确定了新区的3大部分即北区,东区和西区,其中北区规划面积为38 km²,东区规划面积为32.3 km²,西区规划面积为8.2 km²。此“平山造城”工程是目前我国最大的湿陷性黄土岩土工程。2012年4月,延安新区岩土工程开工建设,2013年9月,岩土工程一期顺利完工,造地1.8×10⁴亩。此后5年间,陆续展开与老城区连接的6条沟道工程造地与土地综合治理工作。2018年8月,延安新区岩土工程全面完成,共形成建设用地及生态综合治理用地3.2×10⁴亩(高建中,2019)。图3为2014年和2019年延安新区地表覆盖分类图。可以看出在这段时间内,延安新区开展了快速的城市建设,建筑用地面积大幅度增加,这在很大程度上缓解了延安旧城区“人景争地,城市发展困难”的现状。

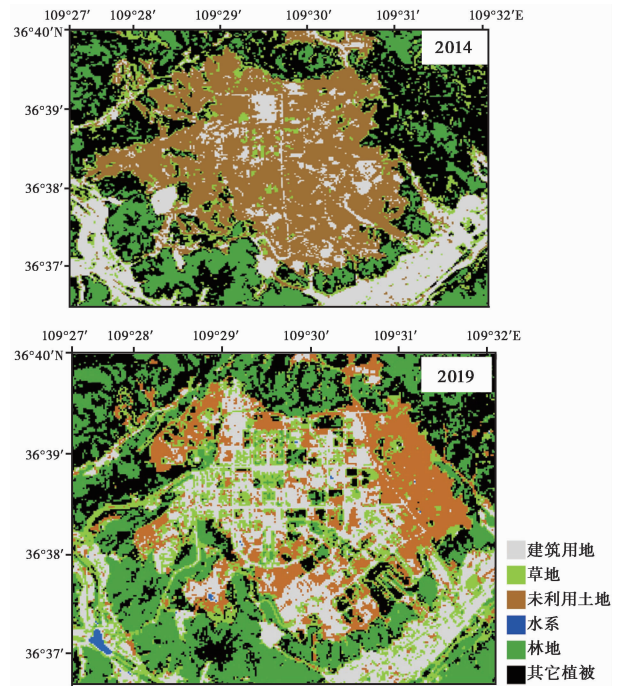


图3 延安新区地表覆盖分类图

Fig. 3 Land cover classification of Yan'an New Area

2 数据和方法

2.1 数据

本次实验分别收集了Path84和Path112个轨道的125景和68景的Sentinel-1A升轨数据,数据覆盖范围如图1所示,数据参数为表1所示。所用外部DEM为分辨率90 m的TanDEM-X DEM。

2.2 SBAS-InSAR 技术

本次实验中,主要利用Berardino于2002年提出的小基线集技术(SBAS-InSAR)获取研究区域的变形时间序列和沉降变形速率(冯凯文等,2020)。该方法流程包括以下步骤:首先,选取现有N+1幅SAR数据中的一幅作为主影像,将其余的N幅SAR

表1 Sentinel-1A 数据参数

Table 1 Parameters of Sentinel-1A

编号	1	2
卫星	Sentinel-1A	Sentinel-1A
Path	11	84
轨道方向	升轨	升轨
入射角/(°)	33.7571	43.8270
方位角/(°)	-10.59	-9.36
数据量	68	123
时间段	12/03/2017~12/07/2019	23/10/2014~29/07/2019

影像配准至主影像的像空间上。通过控制时间基线阈值与空间基线阈值生成相干性较好的M幅干涉对。

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2} \quad (1)$$

对于由 t_a 和 t_b 两个时刻获取的主从影像生成的第 j 幅差分干涉图, 其中任意一点的干涉相位可表示为:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_j(x, r) &= \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \\ &\approx \delta\varphi_j^{disp}(x, r) + \delta\varphi_j^{topo}(x, r) + \delta\varphi_j^{atm}(x, r) + \\ &\quad \delta\varphi_j^{noise}(x, r) \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \delta\varphi_j^{disp}(x, r) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \\ \delta\varphi_j^{topo}(x, r) = \frac{4\pi B_{\perp j} \Delta Z}{\lambda R \sin\theta} \\ \delta\varphi_j^{atm}(x, r) = \varphi_{atm}(t_B, x, r) - \varphi_{atm}(t_A, x, r) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $1 \leq j \leq M$, $\delta\varphi_j^{disp}(x, r)$ 为形变相位; $\delta\varphi_j^{topo}(x, r)$ 为高程误差相位; $\delta\varphi_j^{atm}(x, r)$ 为大气影响产生的相位; $\delta\varphi_j^{noise}(x, r)$ 为数据处理过程中引入的随机误差相位。 λ 为波长; R 为斜距; θ 为雷达视角; ΔZ 为 DEM 误差; $d(t_A, x, r)$ 和 $d(t_B, x, r)$ 分别为相对于 t_0 的累积形变量。本次实验时空基线参数分别设置为 49 d, ± 200 m 和 61 d, ± 200 m, 生成干涉图之后, 利用外部 DEM 去除地形相位。其次, 对干涉图进行滤波, 解缠并去除大气误差。采用基于加权功率谱的自适应滤波方法进行两次滤波, 滤波窗口分别是 16×16 和 32×32 , 步长为 2。采用基于 Delaunay 三角剖分的最小费用流方法进行相位解缠并去除趋势项。最终, 进行形变计算。由于在处理过程中产生 M 幅干涉图, 根据式 (3) 可以得到 M 个方程, 用矩阵形式表示为:

$$\delta\varphi(x, r) = A\varphi(x, r) \quad (4)$$

式中, A 为 $M \times N$ 阶系数矩阵; $\varphi(x, r)$ 为点 (x, r) 在 N 个时刻对应的未知形变相位构成的矩阵, 当 $M \geq N$ 时, 根据最小二乘法得出:

$$\varphi(x, r) = (A^T A)^{-1} A^T \delta\varphi(x, r) \quad (5)$$

当 $M < N$ 时, 方程有无数解, 使用 SVD 方法联合求解多个小基线, 最终可得到不同时刻所对应的累积形变量。

3 实验结果

3.1 DEM 变化提取

为了获取研究区域地表高程变化, 本次实验利用 InSAR 技术获取了研究区域地表高程误差, 将获

取结果用于外部 DEM 改正, 并将改正结果与 SRTM-DEM 进行做差, 最终获取了研究区域的地表高程变化情况。

图 4 展示了延安新区 2015 年和 2019 年 DEM 相对于 2001 年 DEM 的变化情况, 图中正值(蓝色部分)代表地表高程增大即填方区, 负值(红色部分)代表地表高程减小即挖方区。

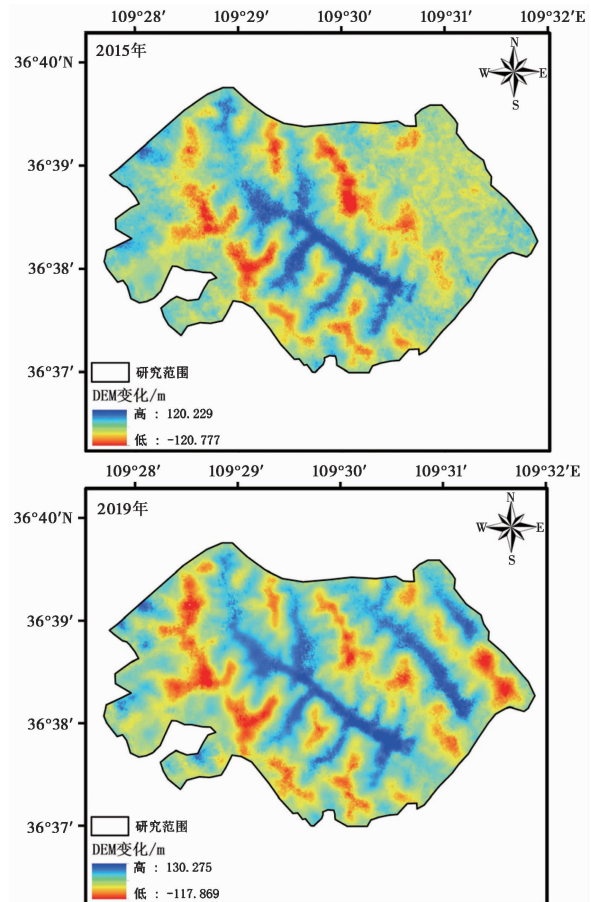


图 4 延安新区 2015 年和 2019 年 DEM 变化图

Fig. 4 DEM changes of Yan'an New Area in 2015 and 2019

3.2 年形变速率

通过实验, 我们利用干涉对个数为 243 和 322 的两组数据获取了延安新区 2014 年 10 月至 2019 年 7 月的时空湿陷形变场的年度形变速率图。由图 5 和图 6 可以看出延安新区及其附近多处地区(图中黑色矩形范围)处于沉降状态, 其中 A、B 两处为新区内两条主要的沉降带, 新区周边未进行岩土工程的区域均处于稳定状态。不同轨道的 Sentinel-1A 数据监测到 2014 年 10 月~2019 年 7 月和 2017 年 3 月~2019 年 7 月的年最大沉降形变速率分别达到 $10 \text{ cm} \cdot \text{y}^{-1}$ 和 $8 \text{ cm} \cdot \text{y}^{-1}$ 。

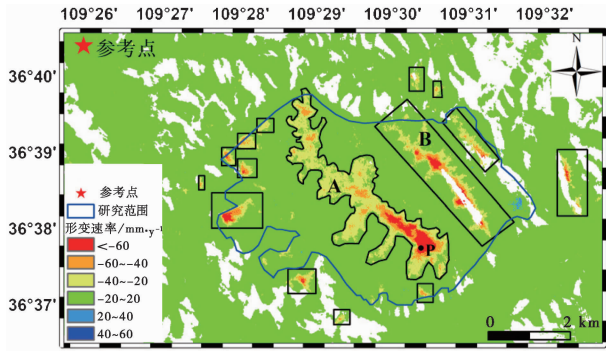


图 5 2014-10~2019-07 年平均形变速率图

Fig. 5 Annual land subsidence rate map between 2014-10 and 2019-07

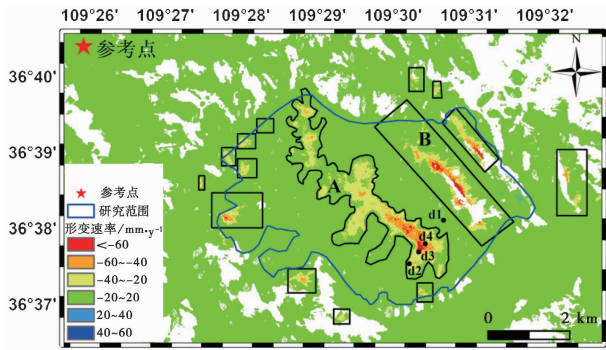


图 6 2017-03~2019-07 年平均形变速率图

Fig. 6 Annual land subsidence rate map between 2017-03 and 2019-07

在沉降中心处选择一个点 P (P 点位置如图 5 所示) 做沉降形变序列分析, 结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, P 点在 2014-10~2019-07 年间形变基本呈线性, 形变速率约为 $10 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$, 累积沉降量达到 50 cm 左右。

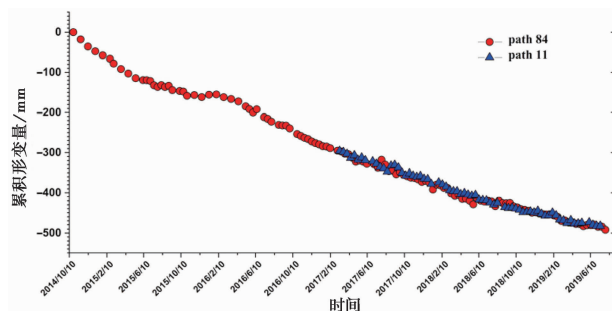


图 7 P 点形变时间序列图

Fig. 7 The time-series deformation at point P

4 沉降原因分析

4.1 填土固结与地表形变关系分析

延安新区是典型的黄土高填方地区, 资料显示,

延安新区主要堆积物由离石黄土和马兰黄土组成。填充区主要由素土、废弃石料以及建筑垃圾等组成, 其中素土一般由挖方区产生的马兰黄土、离石黄土或新近系红黏土组成 (刘博榕, 2016)。这些黄土均属于湿陷性黄土, 而马兰黄土更是成为了主要的湿陷区。这些湿陷性黄土自身具有较强的压缩性和触变性, 极易引起沉降 (高飞, 2019; 丁景园, 2018)。由此, 我们推测由地基压缩以及填方体沉降固结是引起延安新区沉降形变的重要原因之一。

对比图 4 和图 5 可知, 沉降变形区域主要分布在 DEM 高程变大的区域即填方区, 而 DEM 高程变小的区域即挖方区处于稳定状态, 说明大规模的填方工程是引起地面沉降的重要原因。

为了定量分析填方体和地面沉降的关系, 图 8 为研究区域两个断面的垂直形变和 DEM 高程变化对比结果, 图中蓝色线条代表断面形变信息, 红色线条代表未进行岩土工程之前的断面 DEM 高程信息, 绿色虚线为岩土工程完成后的地坪线, 地坪线以上为挖方区, 地坪线以下为填方区。横纵断面中均可看到沉降漏斗, 而且沉降漏斗与填方区位置一一对应, 但是不同位置的变形程度不同, 两个断面中沉降速率最大分别达到 $33 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 和 $40 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 。图 8a 中 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7$ 处填方厚度分别为 55 m, 60 m, 55 m, 60 m, 85 m, 75 m, 75 m, 沉降速率分别为 $25 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $30 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $32 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $23 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $40 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $33 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ 、 $33 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$; 图 8b 中 $l_1, l_2,$

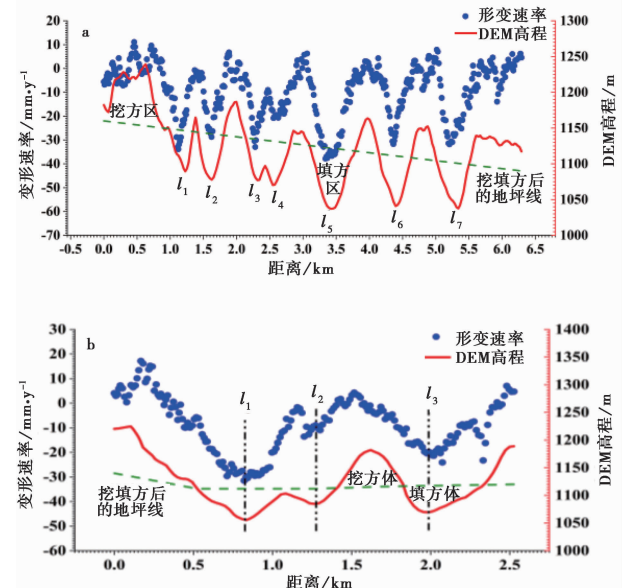


图 8 地表高程变化与形变速率对比图

Fig. 8 Comparison of surface elevation change and deformation rate

l_3 处填方厚度分别为 55 m, 25 m, 45 m, 沉降速率分别为 $33 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ 、 $12 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ 、 $24 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ 。经对比可知, 填方体深度是影响沉降速率的重要因素, 填方深度越大, 沉降速率越大。

为了进一步验证填方体深度与地面沉降之间的关系, 我们选取了图 6 中填方深度不同的 4 个点 d1, d2, d3, d4, 对其进行了时间序列变形分析。图 9 为 2014 年 10 月~2019 年 7 月 4 个点的时间序列变形结果。d1, d2, d3, d4 共 4 个点填方深度分别处于 10~20 m、40~50 m、70~80 m、100~110 m 之间, 累积沉降量分别达到 40 mm、110 mm、440 mm、500 mm。结果表明, 4 个点的时间序列变形都呈现为线性变形, 不同填方深度的点位累积变形量不同, 填方深度越大, 时间序列累积形变量越大, 而且, 随着填方深度的增加, 沉降速率也快速变大。

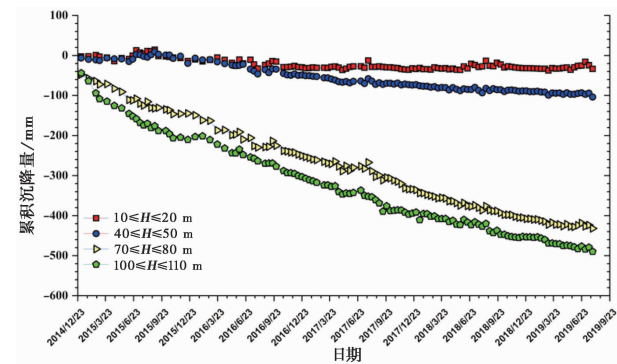


图 9 不同填方深度点位的平均形变速率图

Fig. 9 Graph of average deformation rate at points with different fill depths

5 结论

(1) 本文基于 2014-10~2019-07 和 2017-03~2019-07 两个时段间共 191 景 Sentinel-1A 数据, 利用 SBAS-InSAR 技术获取了延安新区的时空形变信息。结果表明研究区域沉降变形区域集中在填方区, 沉降速率最大达到 $10 \text{ cm} \cdot \text{y}^{-1}$, 挖方区与未进行岩土工程的区域处于稳定状态。

(2) 通过对研究区域的实地考察, 结合已有工程地质资料, 认为大规模填方工程引起的填土固结是导致地面沉降发生的重要因素。

(3) 通过定量分析, 发现填土厚度是控制沉降速率的主要因素, 填土厚度越大, 沉降速率越大。

本文中图 2 摘自《延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践》, 特此致谢!

参 考 文 献

- Chen G, Zhang Y, Zeng R Q, et al. 2018. Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the chinese loess plateau using time series InSAR: A case study of Lanzhou new district[J]. Remote Sensing, 10(2): 270.
- Chen H N. 2019. Research on deformation of high-filling airport facilities in western Sichuan using time-series in SAR techniques and datasets[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China.
- Ding J Y. 2018. Study on collapsibility of Loess under Self-Gravity based on High pressure consolidation Test[D]. Xi'an: Chang'an University.
- Feng K W, Dun J W, Yi X N, et al. 2020. Deformation analysis of woda village old landslide in Jinsha river basin using SBAS-InSAR technology[J]. Journal of Engineering Geology, 28(2): 384-393.
- Gao F. 2019. Research on settlement characteristics of loess high fill foundation.[D]. Lanzhou: Lanzhou University.
- Gao J Z. 2019. Engineering practice of land reclamation in loess hilly gully areas in Yan'an new district[M]. Beijing: China Building Industry Press.
- Liu B R. 2016. Yan'an district high fill settlement monitoring and prediction research[D]. Xi'an: Northwest University.
- Wu Q, Jia C T, Chen S B, et al. 2019. SBAS-InSAR based deformation detection of urban land, created from Mega-Scale Mountain excavating and valley filling in the loess plateau: The case study of Yan'an city[J]. Remote Sensing, 11(14): 1673.
- Zhi B, Wang P, Wang Y X, et al. 2018. Study on properties of secondary consolidation of structured loess under high fill[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1447-1453.
- Zhang J, Feng D X, Qi W, et al. 2018. Monitoring land subsidence in Panjin region with SBAS-InSAR method[J]. Journal of Engineering Geology, 26(4): 999-1007.
- 陈汉学. 2019. 基于时序 InSAR 技术的川西高填方机场设施形变研究[D]. 成都: 电子科技大学.
- 丁景园. 2018. 基于高压固结试验的黄土自重湿陷性研究[D]. 西安: 长安大学.
- 冯文凯, 顿佳伟, 易小宇, 等. 2020. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. 工程地质学报, 28(2): 384-393.
- 高飞. 2019. 黄土高填方地基沉降特性研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 高建中. 2019. 延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 刘博榕. 2016. 延安新区高填方沉降监测与预测研究[D]. 西安: 西北大学.
- 邳彬, 王番, 王永鑫, 等. 2018. 高填方下覆结构性黄土次固结特性研究[J]. 工程地质学报, 26(6): 1447-1453.
- 张静, 冯东向, 秦巍, 等. 2018. 基于 SBAS-InSAR 技术的盘锦地区地面沉降监测[J]. 工程地质学报, 26(4): 999-1007.