



引文格式:龚翔,许强,蒲川豪,等.兰州新区平山造城竣工后地表形变InSAR时序监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(2):236-245.DOI:10.13203/j.whugis20210553

Citation: GONG Xiang, XU Qiang, PU Chuanhao, et al. InSAR Time Series Monitoring and Analysis of Land Deformation After Mountain Excavation and City Construction in Lanzhou New Area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(2):236-245.DOI:10.13203/j.whugis20210553

兰州新区平山造城竣工后地表形变InSAR 时序监测与分析

龚 翔¹ 许 强¹ 蒲川豪¹ 陈婉琳¹ 修德皓¹ 纪 续¹

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

摘要:兰州新区是西北地区发展的重要窗口,近年来其大范围的平山造城导致不同程度的地面沉降,严重威胁了新区的经济社会发展。以兰州新区为研究对象,利用小基线集干涉测量(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术对覆盖研究区2017-05—2021-02的58景升轨Sentinel-1A影像数据进行处理,获得研究区地面沉降的分布特征及时空演化规律,并通过野外实地调查验证了SBAS-InSAR的测量结果,探讨了影响地面沉降的相关因素。结果表明,兰州新区地面沉降主要集中于平山造城的区域,面积约33.5 km²,最大沉降速率为-68 mm/a。地面沉降在空间上随着挖填方工程的开展向新区的东南方向发育,且地表呈长期持续的沉降过程。地面沉降与平山造城工程、挖填方厚度、地质、道路等多种因素密切相关,其中平山造城工程控制地面沉降的范围,填土厚度则控制了地面沉降的量级,而人工填土的性质是引起地面沉降的内在因素,同时道路建设会加快地面沉降的过程。研究结果可为新区的持续安全发展和城市建设提供科学依据。

关键词:小基线集干涉测量;平山造城;地面沉降;时空演化;影响因素

中图分类号:P237;P258

文献标识码:A

收稿日期:2022-02-11

DOI:10.13203/j.whugis20210553

文章编号:1671-8860(2024)02-0236-10

InSAR Time Series Monitoring and Analysis of Land Deformation After Mountain Excavation and City Construction in Lanzhou New Area

GONG Xiang¹ XU Qiang¹ PU Chuanhao¹ CHEN Wanlin¹ XIU Dehao¹ JI Xu¹

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China

Abstract: Objectives: Lanzhou New Area is an important window for the development of northwest China. In recent years, the large-scale construction of mountain excavation and city construction project has led to different degrees of land subsidence, which has seriously threatened the economic and social development of the new area. Methods: Taking Lanzhou New Area as the research object, this paper uses small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) to process 58 ascending Sentinel-1A image data covering the study area from May 2017 to February 2021. The distribution characteristics and spatio temporal evolution of land subsidence in the study area were obtained, and the SBAS-InSAR measurement results were verified by field investigation. Then the related factors affecting land subsidence were discussed. Results: The results show that land subsidence in Lanzhou New Area is mainly concentrated in mountain excavation and city construction area, with an area of about 33.5 km² and a maximum subsidence rate of -68 mm/a. In space, with the development of excavation and filling projects, the land subsidence develops to the southeast of the new district, and the land surface presents a long-term continuous

基金项目:国家自然科学基金(41790445,41630640)。

第一作者:龚翔,硕士,主要从事地质灾害预测与评价研究。1194193407@qq.com

通讯作者:许强,博士,教授。xq@cdut.edu.cn

settlement process. **Conclusions:** Land subsidence is closely related to many factors such as mountain excavation and city construction project, thickness of excavation and filling, geology and road. Specifically, mountain excavation and city construction project control the spatial extent of land subsidence, and then the filling thickness control the magnitude of land subsidence. The nature of artificial fill is an intrinsic factor causing land subsidence, while road construction will also accelerate the process of land subsidence. The research results can provide scientific basis for the sustainable and safe development of the new district and urban planning and construction.

Key words: small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR); mountain excavation and city construction; land subsidence; spatio temporal evolution; factors

地面沉降是在自然或人为影响下,由于地表岩土体的压缩固结,导致某一区域的整体下沉现象^[1]。常见的地面沉降往往由地下水的过度利用、岩溶塌陷、开采固体矿产导致的采空塌陷等引起^[2-3],但是近年来随着城市化进程的不断加快,快速城市化引起的工程环境效应成为了沉降新的主导因素^[4]。例如,兰州新区和延安新区,通过平山造城来创造平坦的建设用地,一定程度上缓解了城市发展空间不足的限制,但由于平山造城破坏了当地的地质平衡环境,在竣工后易产生严重的地面沉降灾害^[5-6]。2012-08,兰州新区被国务院确立为国家级新区,总占地面积约806 km²,是黄土高原地区第一个也是最大的国家级新区^[7]。兰州新区地处兰州市北部的秦王川盆地,由于兰州老城区城市化发展受到限制,因此当地政府做出了平山造城的决定。自此以来,工程建设迅速加快,大量的黄土丘陵被夷平,并填充到附近的沟谷中,从而有大面积的平坦用地用于城市化建设。如此大规模的挖填方工程严重改变了当地原状黄土的性质和水文地质条件,导致严重的地面沉降、建筑物倾斜和道路开裂,严重影响兰州新区的城市建设和可持续发展^[8]。因此,研究兰州新区地面沉降的分布特征及影响因素,可为新区建筑规划提供依据,有利于地面沉降的科学防控,具有十分重要的现实意义。

星载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)通过对监测对象以全面、连续地测量来获得目标微小的形变。凭借全天候、高分辨率、高精度等优势,InSAR技术已成为目前应用最广泛的大地测量技术之一,用于沉降、地震、滑坡等形变的监测之中^[9-12]。传统的差分雷达干涉测量技术(differential InSAR, D-InSAR)通过对不同时间获取的两景合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像的相位进行差分,可以得到两景影像在视线(line of sight, LOS)方向发生的地表形变^[13],但

D-InSAR的精度往往受到地形误差、大气延迟、热噪声、时空失相干等因素的限制。由D-InSAR发展起来的小基线集技术(small baseline subset, SBAS)作为时序InSAR技术的一种,依靠其较短的时空基线,能减小大气扰动和时空失相关对干涉结果的影响,目前已成为一种较为成熟的区域地表形变监测方法^[14-16]。

本文采用SBAS-InSAR技术,对2017-05—2021-02时间段内的58景Sentinel-1A影像进行干涉处理,获得兰州新区地面沉降的时空分布特征,同时采用一系列详细现场调查对InSAR结果进行验证,量化分析影响地面沉降的主要因素,以期为新区的城市化建设和灾害的科学防控提供数据支撑。

1 研究区域

甘肃省兰州新区位于兰州市北部(如图1所示),地处秦王川盆地,距离兰州市约38 km,总面积达806 km²。兰州新区地理位置极其优越,是东西部地区交流的重要节点^[17]。

兰州市区沿黄河而建,受到“两山夹一河”的地理位置限制,经济社会发展受到影响,急需缓解快速城市化和人口增长带来的城市压力。因此,兰州新区应运而生,自从2012-08被国务院确立为国家级新区以来,兰州新区开始了平山造城工程,平山造城工程集中于新区的东南和东北方,其主要建设时间为2013—2017年。新区建设规划区域包括兰州市皋兰县、永登县等6个县,规划最终建成区域面积246 km²,平山造城项目影响人口近30万人^[18]。

兰州新区包括秦王川盆地及其周围黄土丘陵,盆地内地形较为平坦,由北向南逐渐倾斜,海拔高度1 900~2 180 m,盆地周围黄土丘陵剥蚀严重,沟谷发育,植被覆盖率不足5%,相对高差30~60 m^[19]。盆地内出露地层以粉土和碎石土

为主,黄土丘陵主要为风成马兰黄土,结构疏松,便于大规模开挖,是平山造城工程的主要物质

来源。

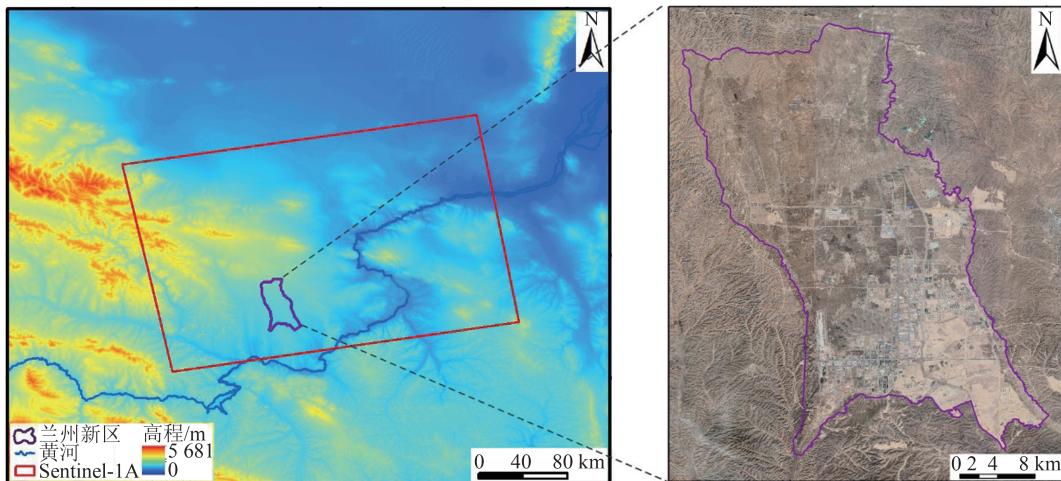


图1 兰州新区位置

Fig. 1 Location of Lanzhou New Area

2 数据与方法

2.1 研究区数据

本文主要研究兰州新区平山造城工后地面沉降的空间分布及其影响因素,选择覆盖整个兰州新区的 Sentinel-1A 影像数据对新区进行监测。Sentinel-1A 是欧洲委员会(European Commission, EC)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)为哥白尼全球观测项目发射的第一颗卫星,于 2014-04 发射,其搭载有 C 波段的合成孔径雷达,能全天候、高精度地对目标进行监测^[20]。由于兰州新区平山造城的主要建设期为 2013—2017 年,故本次研究选择 2017-05—2021-02 时间段内获取的 58 景升轨 Sentinel-1A 影像数据,以期获取兰州新区平山造城工后地面沉降的基本信息,Sentinel-1A 数据的具体参数见表 1。同时,本文选择 30 m 空间分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务高程数据作为外部地形数据,用以减小地形相位对干涉结果的影响。由于地面沉降与地质体直接相关,使用由中国地质调查局提供的 1:50 000 地质图分析地面沉降与地质的关系。选取 2020-12-31 的 Google Earth 光学遥感影像作为研究区的背景,并在此基础上对新区内的道路进行了解译,探讨地面沉降与道路网的关系。Sentinel-1A 数据在 SARscape 5.3 软件内进行处理,并将处理结果与其他所有数据导入 ArcGIS 软件下进行更为详细的分析和制图。

2.2 SBAS-InSAR 方法

由于兰州新区大范围挖填方导致该地区地

表发生变化,故本文使用更合适的 SBAS-InSAR 方法以减小平山造城引起的长时间失相干现象,并反演地表时序形变^[21]。首先,该方法选择具有较短时间基线和空间基线的 SAR 影像组成干涉集合,从而最大限度地提高时序相干点的数量,使干涉集合中的每一个干涉对都有较高的相干性;然后,对每个干涉对进行常规差分干涉处理,提取出高相干点并建立干涉相位方程组,基于奇异值分解的方法求解各相位分量;最后,采用时空滤波去除大气相位和非线性形变相位,求得地表时间序列形变和高程改正值^[22-24]。

表 1 Sentinel-1A 影像数据参数

Tab. 1 Sentinel-1A Image Data Parameters

| 数据 | 参数 | 描述 |
|-------------|----------------------|-----------------------|
| | 数据模式 | 干涉宽幅 |
| | 时间范围 | 2017-05-14—2021-02-10 |
| | 数据量/景 | 58 |
| | 轨道方向 | 升轨 |
| | 幅宽/km | 250 |
| Sentinel-1A | 空间分辨率/m ² | 5×20 |
| | 重访周期/d | 12 |
| | 入射角/(°) | 37 |
| | 极化方式 | 垂直极化 |
| | 雷达波长/cm | 5.6 |

以 SBAS-InSAR 处理后得到的数字高程模型(digital elevation model, DEM)改正值作为平山造城后的高程数据,以反映地表高程的变化情况。其测量高程的基本原理为通过 SAR 在不同的探测角度下对同一地面位置的点进行观测,解算获得多景 SAR 影像之间的相位差与目标高程

的关系,得到目标的 DEM^[25]。

本文通过上述方法处理数据的过程中,在空间基线和时间基线上分别设置 110 m 和 120 d 的阈值进行干涉对选择,共生成 231 个干涉图。在距离向和方位向采用 4×1 的多视方法,以提高干涉图的信噪比,从而提高相干估计的质量。使用最小费用流方法进行相位解缠,并在解缠过程中采用 0.4 的相干性阈值提取高相干点。针对平山造城工程地表形变监测的相关研究表明,高填方区的地表形变以沉降变形为主^[26-27],本文假定兰州新区地表形变以沉降为主,忽略水平变形的影响,根据 Sentinel-1A 的入射角(θ),将沿视线方向的形变(d_{LOS})按 $d_v = d_{\text{LOS}} / \cos\theta$ 的关系转换为垂直方向的形变(d_v),以反映兰州新区垂直方向的地表形变速率。

3 时序 InSAR 结果

3.1 地面沉降空间分布特征

通过 SBAS 技术对兰州新区 2017-05—2021-02 时间段内的 58 景 Sentinel-1A 影像进行处理,得到了兰州新区垂直方向的地表形变速率图(见图 2)。其中,正值表示靠近卫星的运动,即抬升变形,在图 2 中表现为绿色;负值表示远离卫星的运动,即地面沉降,在图 2 中表现为红色。

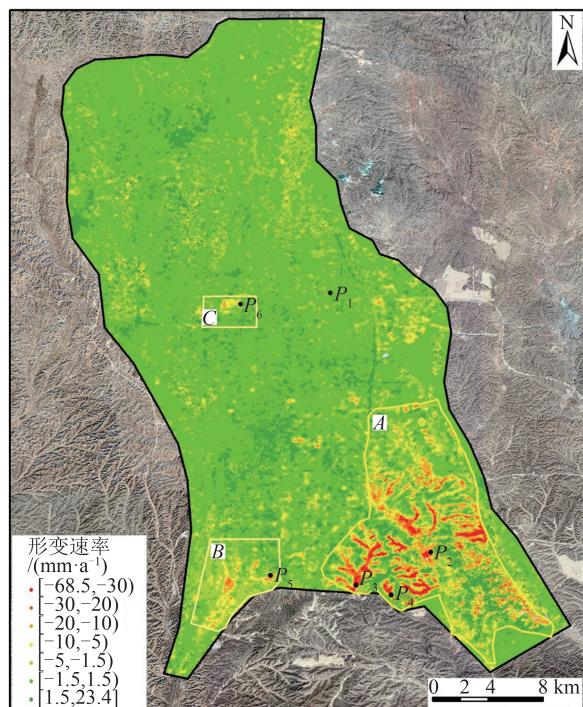


图 2 2017—2021 年兰州新区地表形变速率

Fig. 2. Ground Deformation Rate in Lanzhou New Area from 2017 to 2021

由图 2 可以看出,兰州新区大部分区域地表保持相对稳定,形变现象不明显,形变速率范围为 -1.5~1.5 mm/a。此外,在兰州新区还发现 3 个明显的沉降区,分别位于西岔镇西南部(区域 A)、中川镇南部(区域 B)、秦川镇南部(区域 C),其他区域还零星分布着小规模的沉降。其中,区域 A 沉降面积约为 33.5 km²,主要沉降速率范围为 -10~-43 mm/a,最大沉降速率高达 -68.5 mm/a。区域 A 是兰州新区地面沉降最为显著的区域,同时也是平山造城工程集中的区域。至 2021 年,区域 A 挖填方工程基本完成,山体大面积开挖,沟谷大面积填方,并逐渐在此区域内进行工程建设,如此大规模的工程活动给地表带来了较大的外部扰动,加快了地面沉降的过程。区域 B 沉降面积约为 1.5 km²,主要沉降速率范围为 -10~-27 mm/a,最大沉降速率达 -37 mm/a。区域 B 大部分区域在 2017 年以前为农村和荒地,在 2017 年之后由于城市化进程而经历了大量道路、基础设施及建筑的修建,从而导致地面沉降的发生。区域 C 沉降面积约为 0.17 km²,主要沉降速率范围为 -10~-17 mm/a,最大沉降速率为 -17 mm/a。区域 C 目前为兰州新区铁路口岸,于 2017 年正式竣工,受到车辆的动荷载及建筑等因素的影响,形成了一个明显的地面沉降中心。

3.2 地面沉降时空演化特征

为了研究地面沉降在空间上的演化规律,获取了整个兰州新区不同时间的累积形变量,如图 3 所示。2017—2021 年变形空间演化以 2017-05-14 为参照基准,并假定此时兰州新区的地表形变量为 0。从图 3 中可以看出,2017—2021 年兰州新区大部分地区在整个监测时间段内基本保持稳定状态,累计形变量为 -5~5 mm。此外,在新区东南部的平山造城区还监测到比较持续且快速的沉降变形现象。具体来说,兰州新区的东南部地面沉降范围不断扩大,累计沉降呈上升趋势,保持较高的沉降速率。在 2017-05—2019-08 期间,平山造城区地面沉降量增加较为迅速,最大累计沉降量达 202.9 mm;而在 2019-08—2021-02 期间,由于挖填方工程的不断推进,沉降整体向新区的东南角扩散,扩散速率逐渐趋缓,但累计沉降量仍持续增加,最大累计沉降量达到 284.6 mm。

为了研究兰州新区地面沉降时序演化特征,在显著地面沉降区选择 6 个特征点,研究其在

2017-05—2021-02的时间序列形变,如图4所示。6个特征点在新区内的位置见图2,其中, P_1 为位于兰州新区的稳定控制点, $P_2\sim P_4$ 为位于平山造城区的沉降点, P_5, P_6 为位于平山造城区之外的沉降点。从图4可知,各沉降点都表现为持续沉降的形变特征,累计沉降在不断增大,而稳定控制点 P_1 在整个监测时期基本保持稳定状态,累计形变在2 mm范围内波动。选取的5个沉降点均呈现出不同速度的非线性沉降,其中, P_2 和 P_6 为最大和最小累计沉降点,其累计沉降量分别为165 mm和44 mm。可以发现, $P_2\sim P_4$ 对应的平山造城区累计沉降量都明显高于 P_5, P_6 对应的沉降区,这说明平山造城所引起的地面沉降更显著,对城市建设产生更大的威胁。图4中光滑曲线为各特征点的拟合曲线,可以看出,工后地面沉降呈现长期持续变形的特征,说明新区在平山造城工后一段时间内的地面沉降速率并没有明显减小的趋势。

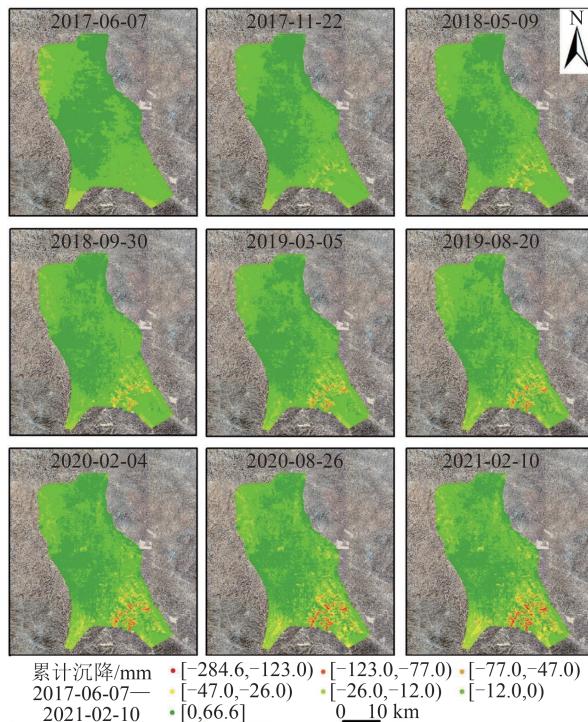


图3 兰州新区2017—2021年地面沉降空间演化过程

Fig. 3 Spatial Evolution of Land Subsidence in Lanzhou New Area from 2017 to 2021

此外,由于缺少地面位移监测数据,使用现场调查进一步验证了新区沉降结果的准确性。其中, $P_2\sim P_6$ 特征点的沉降变形现场调查结果如图5所示。 P_2 位于公路旁边的人行道,在持续的累计沉降下逐渐凹陷,形成多个深度不一的塌陷坑。 P_3 为填方体之上的一处黄土裂缝,其通过长时间的不均匀沉降形成。 P_4 为一大面积的草地,

其沉降有向沉降漏斗发育的趋势。 P_5 位于平山造城区外一新修建的小镇内,混凝土花台在不均匀沉降下形成竖向的拉裂缝。 P_6 也处于平山造城区外,路面在车辆长期反复的动荷载作用下逐渐下沉。由此可见,InSAR沉降结果与现场调查结果基本一致,进一步验证了时序InSAR技术在新区地面沉降探测中的可靠性。

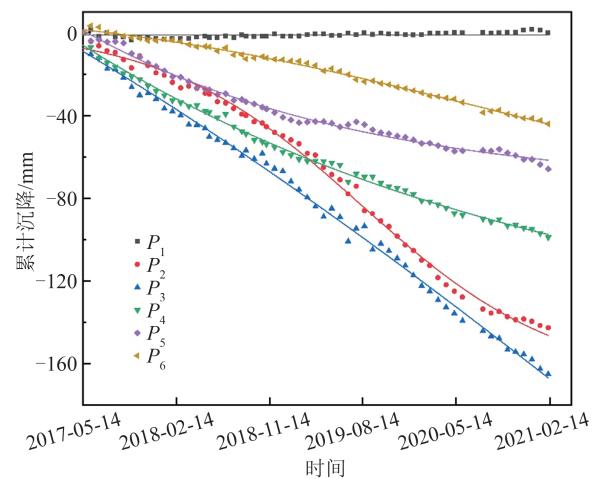


图4 兰州新区特征点时序形变

Fig. 4 Time-Series Deformation of Feature Points in Lanzhou New Area

4 讨论

4.1 地面沉降与平山造城工程的关系

兰州新区平山造城工程于2013年开工建设,挖填方工程快速扩张,至2021年工程面积已达108.69 km²,大规模挖山填沟势必会产生显著的人为地面变形,因此本文以整个兰州新区为研究对象,分析平山造城工程对地面沉降分布的影响。

图6表示沉降观测点在平山造城区内的分布情况,从图6中可以看出,绝大多数沉降区都分布在平山造城工程范围内,沉降的空间分布与挖填方工程具有较强的相关性。同时,为了定量分析地面沉降与平山造城工程的关系,提取时序InSAR结果中形变速率小于-10 mm/a的观测点,统计分析在平山造城区内观测点所占的百分比。结果表明,受持续的挖填方工程的影响,87.5%的观测点都位于平山造城区内,可见兰州新区的地面沉降集中分布于平山造城区,这表明兰州新区大规模的挖填方工程控制着地面沉降的空间分布。此外,由图6还可以看出,填方区与地面沉降分布具有显著的一致性,统计填方区观测点的密度,发现填方区形变速率小于-10 mm/a的观测

点密度为815个/km²,而整个兰州新区形变速率小于-10 mm/a的观测点密度却为64个/km²,表明填方区是平山造城区内最主要的沉降区,填

方工程是该地区地面沉降范围的主要控制因素,需要详细分析填方工程对地面沉降的具体影响。

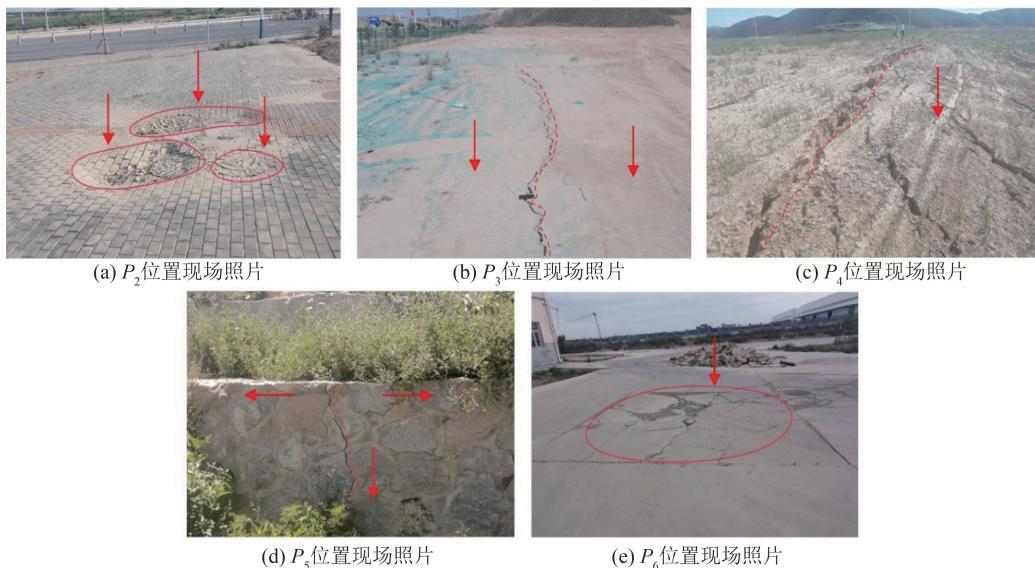


图5 兰州新区地面沉降现象

Fig. 5 Land Subsidence Phenomena in Lanzhou New Area

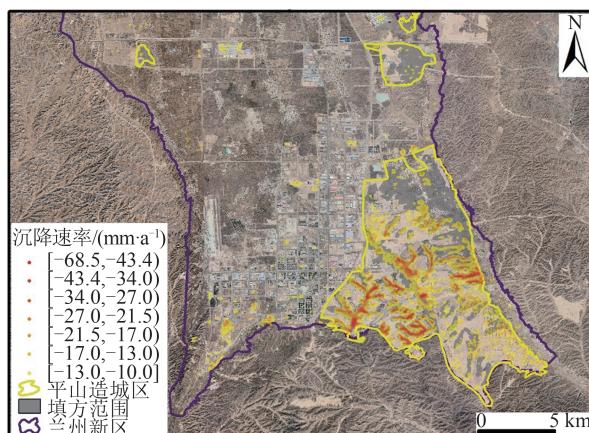


图6 兰州地面沉降与平山造城区域空间分布关系

Fig. 6 Spatial Distribution of Land Subsidence in Lanzhou New Area in Relation to the Mountain Excavation and City Construction Area

4.2 地面沉降与填方体厚度的关系

兰州新区平山造城工程涉及了大量的填方工程,人工填土的分布及厚度也影响着地面沉降的空间分布及沉降速率。由于缺乏挖填方工程竣工后详细的地形数据,本文通过SBAS-InSAR计算得到DEM改正值来表征地表高程的变化。图7(a)表示挖填方体在平山造城区的分布特征,其中,正值表示填方工程区,在图7中表现为红色,填方体大致按照原沟谷展布;负值表示挖方工程区,在图7中表现为绿色,挖方体为原始黄土丘陵山体。图7(b)表示挖填方体附近地面沉降速率的大小,对比图7(a)可以看出,地面沉降在

空间上沿着填方体发展,且在高填方区有更高的沉降速率,因此填土厚度可能控制地面沉降的量级。

为了进一步研究填方厚度与地面沉降的关系,在填方厚度变化较大的区域绘制两条剖面线,提取剖面上各观测点的形变速率以及挖填方厚度,探讨地面沉降速率沿各剖面线的变化情况,剖面线位置见图7(a)。由图8(a)、图8(b)可以看出,挖填方厚度与地面沉降有较好的空间相关性,在挖填方厚度曲线处于峰值时,即在较高填方厚度处,往往有较大的沉降速率,如A-A'剖面最大沉降速率为-41 mm/a,对应的填方体厚度为11 m,而B-B'剖面最大沉降速率为-28 mm/a,对应的填方体厚度为9 m。由填方体向挖方体逐渐过渡时,地面沉降速率会随着填方体厚度的减小而减小,至挖方体上时形变速率会出现较小的正值,即挖方区出现轻微地面抬升现象。

为了分析地面沉降与填土厚度的关系,提取了兰州新区所有形变速率小于-10 mm/a观测点的填土厚度,并进行了统计分析。图9(a)表示不同填土厚度下观测点所占的百分比,可以发现,随着填土厚度的增加,较低沉降速率(-10~-20 mm/a)的观测点所占比例减少,较高沉降速率(小于-30 mm/a)的观测点所占比例明显增加。例如,当填土厚度为5 m时,较高沉降速率的

点所占比例为10%，而当填土厚度增大到15 m时，其所占比例增长到42%。图9(b)表示不同填土厚度下的沉降速率，图9中间的正方形表示数据的平均数，代表沉降数据的平均水平，可以看出，随着人工填土厚度的增加，平均沉降速率也明显增大。具体而言，厚度小于5 m的填土中观

测点的平均沉降速率约为 -16 mm/a ，而厚度大于15 m的填土中的观测点的平均沉降速率则为 -28 mm/a ，地面沉降速率与填土厚度有着较好的相关性。可见，人工填土的厚度控制了地面沉降速率的量级，即填土厚度越大，沉降速率越高。

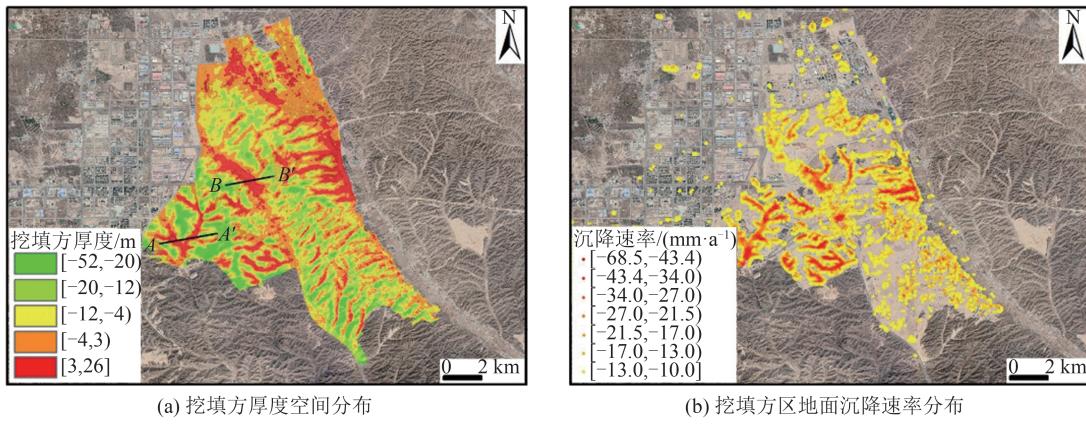


图7 挖填方厚度与地面沉降空间分布关系

Fig. 7 Comparison Between the Thickness of Excavation and Filling and Spatial Distribution of Land Subsidence

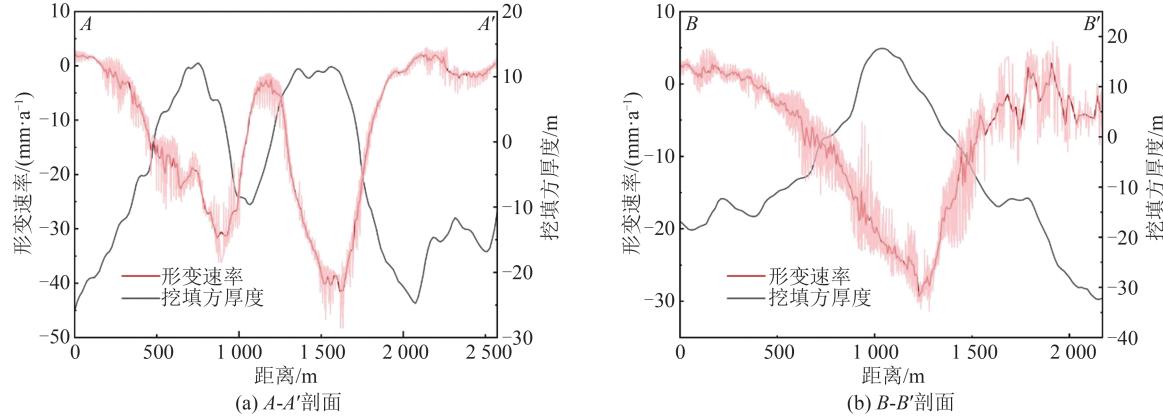


图8 A-A'和B-B'剖面填方厚度与地面沉降分布对比

Fig. 8 Comparison of Excavation and Filling Thickness and Land Settlement Distribution in A-A' and B-B' Sections

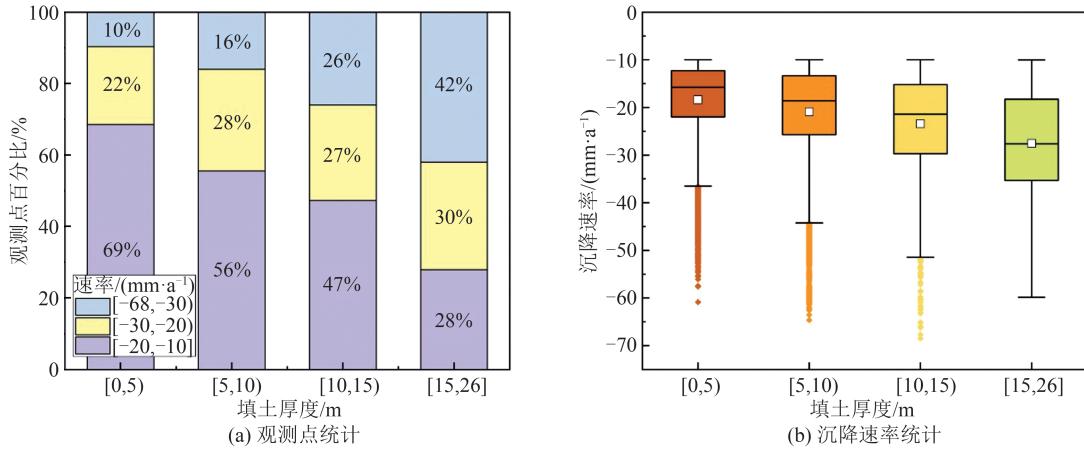


图9 不同填土厚度下的沉降速率统计

Fig. 9 Statistics of Settlement Rate Under Different Filling Thicknesses

4.3 地面沉降与地质的关系

兰州新区出露的地层主要以第四系人工填

土、第四系冲洪积堆积物、上更新统马兰黄土、新近纪砂质泥岩夹砂岩和志留系砂岩、千枚岩及板

岩等为主(见图10)。为了研究地面沉降在不同岩性条件下的分布特征,将兰州新区地质图与沉降变形结果进行空间叠加分析,如图10所示。

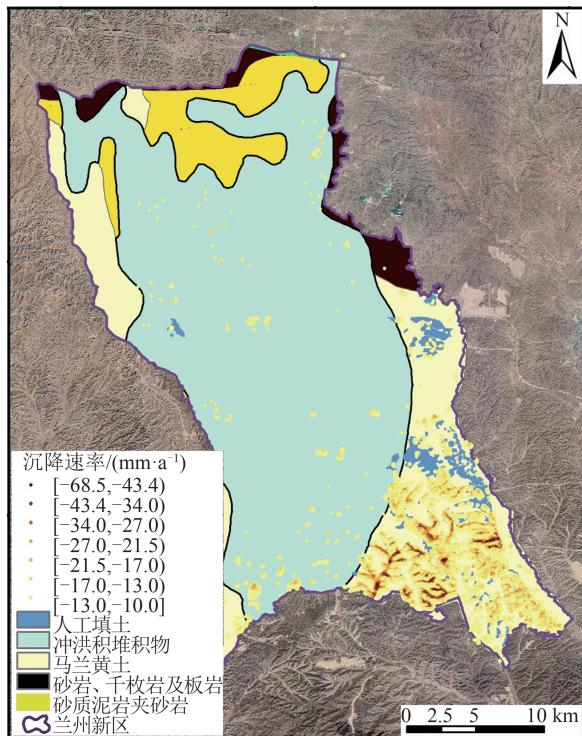


图10 地面沉降与地质的关系

Fig. 10 Relationship Between Land Subsidence and Geology

由图10可以看出,兰州新区地表形变的空间分布特征受岩性控制,较高的沉降速率主要集中在人工填土和黄土覆盖区,其中人工填土的主要组成物质为重塑压实黄土。在形变速率小于 -10 mm/a 的观测点中,90.9%的观测点都分布在结构疏松的黄土区域,其中又有64.7%的点都分布于人工填土之上。2017—2021年,大规模挖填方工程导致黄土覆盖区表层岩性发生改变,产生大范围的人工填土,其具有大孔隙、低强度的特性,相比原状黄土有着更大的孔隙比和压缩系数,极易在自重和外荷载的作用下压缩固结,导致地表高程的降低。因此,人工填土的性质是该地区地面沉降的主要内在因素。

4.4 地面沉降与道路网的关系

在兰州交通网建设过程中,车辆的动荷载作用会加快地面沉降的过程。图11表示交通网与地面沉降的空间分布关系,可以看出,交通网的分布与地面沉降具有较好的相关性,在平山造城工程区内,地面沉降区随道路延伸,且道路周边的沉降速率较高。同时,对道路一定距离内的沉降观测点进行统计分析,如图12所示。

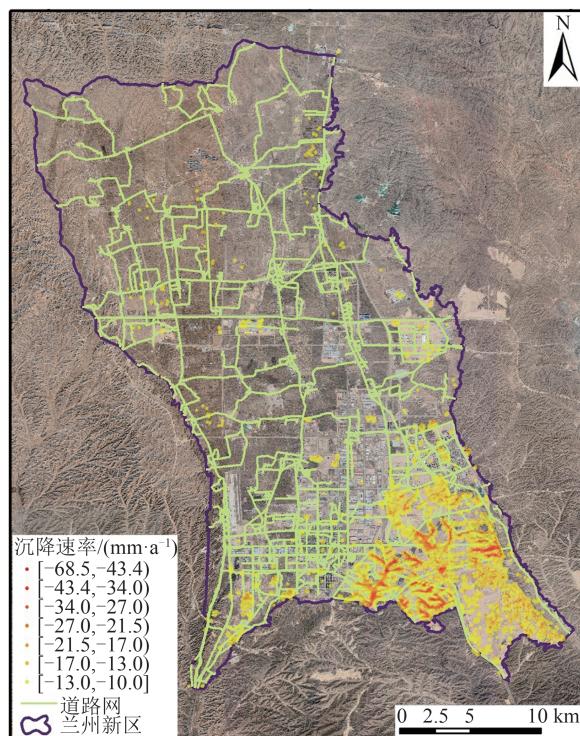


图11 地面沉降与道路网空间分布关系

Fig. 11 Spatial Distribution of Land Subsidence and Road Network

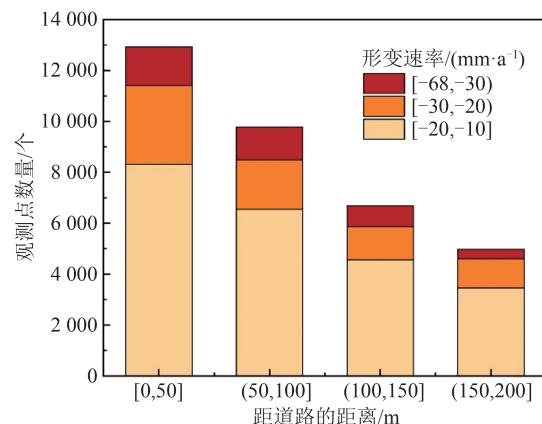


图12 沉降观测点与道路距离的关系

Fig. 12 Relationship Between Each Observation Point and Road Distance

由图12可见,在越靠近道路的位置,分布着更多的沉降观测点,在道路50 m范围内有12 931个沉降观测点,而距离道路更远的(150, 200] m范围内仅有4 981个沉降观测点。此外,沉降速率小于 -10 mm/a 的所有沉降观测点中有70.6%集中在公路网200 m的范围内。虽然兰州新区挖填方工程区的公路分布相对城区较为稀疏,但公路网所带来的长期振动荷载会加快道路周边土体的压缩固结,对兰州新区地面沉降有着较大影响。

5 结语

本文采用时间序列 InSAR 技术对覆盖兰州新区平山造城工程区的 58 景 Sentinel-1A 数据(2017—2021 年)进行了处理,得到该区域工后地面沉降的空间分布和时空演化特征,结合详细现场调查验证了时序 InSAR 结果,还量化分析了地面沉降与多种因素的关系。主要研究结论如下:

1) 兰州新区平山造城工程引起了大范围的不均匀沉降,根据地面沉降的空间分布特征,可将研究区地面沉降分为西岔镇西南部(区域 A)、中川镇南部(区域 B)、秦川镇南部(区域 C)3 个重点区域,其沉降速率范围主要为 $-10\sim-43 \text{ mm/a}$ 、 $-10\sim-27 \text{ mm/a}$ 以及 $-10\sim-17 \text{ mm/a}$,沉降面积分别为 33.5 km^2 、 1.5 km^2 以及 0.17 km^2 ,最大沉降速率分别为 -68 mm/a 、 -37 mm/a 以及 -17 mm/a 。

2) 地面沉降在空间分布上与新区的平山造城工程有很好的相关性。地面沉降多集中于平山造城的区域,并随工程发展逐渐向兰州新区东南部扩展。新区平山造城工后一段时间内地面沉降速率并没有出现明显减小的趋势,表明沉降变形还将持续一段时间。

3) 地面沉降与平山造城工程、挖填方厚度、地质、道路等多种因素密切相关,其中平山造城工程控制地面沉降的范围,填土厚度则控制了地面沉降的量级,而人工填土的性质是引起地面沉降的内在因素,同时道路建设会加快地面沉降的过程。

参 考 文 献

- [1] Xu Qiang, Pu Chuanhao, Zhao Kuanyao, et al. Time Series InSAR Monitoring and Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Subsidence in Yan'an New District[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 957-969. (许强,蒲川豪,赵宽耀,等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 957-969.)
- [2] Cigna F, Tapete D. Present-Day Land Subsidence Rates, Surface Faulting Hazard and Risk in Mexico City with 2014—2020 Sentinel-1 IW InSAR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112161.
- [3] Du Q S, Li G Y, Zhou Y, et al. Deformation Monitoring in an Alpine Mining Area in the Tianshan Mountains Based on SBAS-InSAR Technology[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021: 9988017.
- [4] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Land Uplift Monitoring and Analysis in Yan'an New District Based on SBAS-InSAR Technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 983-993. (蒲川豪,许强,赵宽耀,等. 利用小基线集 InSAR 技术的延安新区地面抬升监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 983-993.)
- [5] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Jiang Yanan, et al. Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1728-1738. (蒲川豪,许强,蒋亚楠,等. 延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1728-1738.)
- [6] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Remote Sensing Analysis of Land Subsidence and Vegetation Restoration Characteristics in Excavation and Filling Areas of Mountain Region for Urban Extension in Yan'an[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 597-609. (蒲川豪,许强,赵宽耀,等. 基于遥感分析的延安新区平山造城工程地面沉降及植被恢复特征研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 597-609.)
- [7] Li Songhui. Study on Foundation Treatment Method of Backfilling Loess Area with Large Thickness in Lanzhou New Area[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019. (李松徽. 兰州新区大厚度回填黄土区地基处理方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.)
- [8] Yan Binbin. Potential Hazard Assessment of Dam Failure Mudflow in Land Creation Projects in the Lanzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (闫彬彬. 兰州平山造地工程中溃坝泥流的潜在灾害评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.)
- [9] Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733. (朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.)
- [10] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9183.
- [11] Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of*

- Wuhan University, 2019, 44(7): 957–966. (许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957–966.)
- [12] Xu Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1651–1659. (许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651–1659.)
- [13] Chen Qiang. Detecting Regional Ground Deformation by Differential SAR Interferometry Based on Permanent Scatterers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (陈强. 基于永久散射体雷达差分干涉探测区域地表形变的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.)
- [14] Pu C H, Xu Q, Zhao K Y, et al. Characterizing the Topographic Changes and Land Subsidence Associated with the Mountain Excavation and City Construction on the Chinese Loess Plateau [J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1556.
- [15] Han Y K, Zou J G, Lu Z, et al. Ground Deformation of Wuhan, China, Revealed by Multi-temporal InSAR Analysis [J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3788.
- [16] Zhou C F, Gong H L, Chen B B, et al. Land Subsidence Response to Different Land Use Types and Water Resource Utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 457.
- [17] Chen G, Zhang Y, Zeng R Q, et al. 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, 2018, 10(2): 270.
- [18] Juang C H, Dijkstra T, Wasowski J, et al. Loess Geohazards Research in China: Advances and Challenges for Mega Engineering Projects [J]. Engineering Geology, 2019, 251: 1–10.
- [19] Zhang Lei. Research on Environmental Geology of Lanzhou New District [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (张磊. 兰州新区环境地质问题综合研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.)
- [20] Wang L X, Marzahn P, Bernier M, et al. Sentinel-1 InSAR Measurements of Deformation over Discontinuous Permafrost Terrain, Northern Quebec, Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248: 111965.
- [21] 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(11): 2375–2383.
- [22] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry: A Case Study of Danba, Sichuan [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2039–2049. (张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别:以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2039–2049.)
- [23] Zeng Qiming, Zhou Zimin, Zhu Meng, et al. Measurement and Analysis of Surface Deformation After the Sixth Nuclear Explosion in the Democratic People's Republic of Korea Using InSAR [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(22): 2351–2362. (曾琪明, 周子闵, 朱猛, 等. 朝鲜第六次核爆后InSAR地表形变测量与分析[J]. 科学通报, 2019, 64(22): 2351–2362.)
- [24] Mu Jialei. Research on Surface Deformation Laws Caused by Deep Anhydrite Mining with SBAS-InSAR [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (穆家雷. 基于SBAS-InSAR的深部硬石膏开采引起地表形变规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.)
- [25] Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, Zhang Qin, et al. Research on Loess Landslide Identification, Monitoring and Failure Mode with InSAR Technique in Heifangtai, Gansu [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 996–1007. (赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡InSAR识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 996–1007.)
- [26] Wei Y M, Liu X J, Zhao C Y, et al. Observation of Surface Displacement Associated with Rapid Urbanization and Land Creation in Lanzhou, Loess Plateau of China with Sentinel-1 SAR Imagery [J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3472.
- [27] Wu Q, Jia C, Chen S, et al. 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, 2019, 11(14): 1673.