



引用格式: 牛全福, 陆 铭, 马亚娜, 等. PS-InSAR 技术在兰州市地面形变中的监测应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 7909-7915.
Niu Quanfu, Lu Ming, Ma Yana, et al. Application of PS-InSAR technology in ground deformation Monitoring of Lanzhou City[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7909-7915.

PS-InSAR 技术在兰州市地面形变中的监测应用

牛全福^{1,2}, 陆 铭^{1*}, 马亚娜¹, 傅键恺¹, 张 曼¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省应急测绘工程中心, 兰州 730050)

摘 要 近年来, 由于城市地表沉降带来的次生灾害后果愈加严重, 给城市的发展带来了诸多隐患, 因此对城市进行长时间序列的形变监测具有重要的现实意义, 而传统的监测方法无法获取城市大面积的地表形变信息。合成孔径雷达遥感(interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术在大规模地表形变监测中具有独特的优势。兰州市地质条件特殊, 地貌条件复杂, 是中国地质灾害发生频率较大的区域之一。采用 63 景 Sentinel-1A 和 5 景 Sentinel-1B 数据基于永久散射体合成孔径雷达干涉(persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR) 测量技术获取了 2014 年 10 月—2020 年 4 月的兰州市城区的地面形变场。研究结果表明, 兰州市城区地表形变较小, 临近城区周边的几处村镇存在着不同程度的沉降, 且部分区域的沉降呈现出逐渐加快的趋势。

关键词 地面沉降; Sentinel-1A; 永久散射体干涉; 时间序列
中图分类号 P237; 文献标志码 A

Application of PS-InSAR Technology in Ground Deformation Monitoring of Lanzhou City

NIU Quan-fu^{1,2}, LU Ming^{1*}, MA Ya-na¹, FU Jian-kai¹, ZHANG Man¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Gansu Emergency Surveying and Mapping Engineering Center, Lanzhou 730050, China)

[Abstract] In recent years, the secondary disasters caused by urban surface subsidence have become more serious and have brought many hidden dangers to the development of the city. Therefore, long-term deformation monitoring of the city has important practical significance, while traditional monitoring methods unable to obtain information on the surface deformation of a large area of the city. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology has unique advantages in large-scale surface deformation monitoring. Lanzhou City has special geological conditions and complex geomorphic conditions. It is one of the areas where geological disasters occur frequently in my country. 63 scenes of Sentinel-1A and 5 scenes of Sentinel-1B were used to obtain the ground surface deformation field of Lanzhou City from October 2014 to April 2020 based on persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR). The research results show that the surface deformation in the urban area of Lanzhou is relatively small, and several villages and towns adjacent to the urban area have different degrees of subsidence, and the subsidence in some areas has gradually accelerated.

[Keywords] land subsidence; Sentinel-1A; permanent scatterer interferometry; time series

地面沉降是社会经济发展中普遍存在的地质问题^[1-2], 是在自然因素或人为因素作用下引起的局部下沉或区域性下沉现象, 通常会引起建筑物倾斜、生产设施毁坏、地基失稳等, 严重影响人们的正常生活和生产, 是城市可持续发展的重要障碍之一^[3]。为此, 对城市地表进行长时空维度的沉降监测、掌握地表沉降监测资料具有十分重要的现实意义^[4-5]。传统的地表沉降监测主要依赖重复精密水准测量、基岩标、分层标测量以及全球导航卫星定

位监测网等, 其特点是监测精度高, 但监测成本高、范围较小、点位密度低等, 难以揭示整体形变特点^[6-7]。近年来发展起来的合成孔径雷达干涉测量^[8]及合成孔径雷达差分干涉(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR) 测量^[9], 可获取大面积、全天候、高精度和高分辨率的地表三维空间微小变化, 在地表形变监测方面显示出前所未有的优越性^[10-11], 已成为城市地表形变监测的热点课题^[12-14]。

收稿日期: 2020-11-12; 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(41461084); 甘肃省住房和城乡建设厅建设科技项目计划(JK2021-57); 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2020C-40)

第一作者: 牛全福(1973—), 男, 汉族, 甘肃兰州人, 博士, 副教授。研究方向: 3S 与地质灾害风险评估、3S 技术集成及应用。E-mail: 330398304@qq.com。

* 通信作者: 陆 铭(1994—), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 硕士。研究方向: 3S 技术及其应用。E-mail: 515677580@qq.com。

随着 DInSAR 的应用研究及改进其在地表监测时存在着相位失相关和大气延迟等问题^[15], Ferretti 等^[16]提出了 PS-InSAR (persistent scatterer InSAR) 技术,并结合大气相位估算方法应用在加利福尼亚州的波莫纳地表形变监测中,因地表沉降监测的高精度和可信度而得到广泛应用。例如,任超等^[17]利用 20 景 Sentinel-1 时间序列数据,采用 PS-InSAR 技术提取了 2017—2019 年南宁市地铁沿线周边的沉降速率分布情况,为地铁运营的风险评估提供了重要的数据支撑。卢旺达等^[18]基于 24 景 Sentinel-1A 数据分别利用 PS-InSAR 技术和小基线集 (small baseline subset, SBAS) 的方法对天津市进行了沉降监测,发现沉降产生的位置与地下水漏斗形成的位置具有很高的-致性,且两种 InSAR 监测方法具有较高的一致性,为天津市的防灾减灾提供了有力的数据支撑。位于黄土高原西部黄河两岸的兰州市,是中国地质灾害最为严重的省会城市之一^[19]。近年来城市化进程的加快,高层、超高层建筑,尤其是 2013—2019 年城市地铁等大型工程的修建,已出现多处地表塌陷而引起政府各部门极大关注^[20-21]。采用 InSAR 新技术对兰州市区地表沉降进行多时空维度监测,全面掌握兰州市区的地表沉降变形时空特征十分必要。

以兰州市城区为研究区,收集了地铁修建期间的 2014 年 10 月—2020 年 4 月期间的 68 景 Sentinel-1 影像数据,结合 PS-InSAR 技术对研究区大型工程修建前后地表沉降规律进行监测,并对监测结果进行实地调研和分析,以为兰州城市化发展提供科技支撑。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

兰州(36°03'N, 103°40'E)地处中国地形版图的几何中心、黄土高原西部和甘肃省中部,辖五区三县,是黄河自西向东唯一横贯全境的省会城市。主城区位于黄河南北两岸及山涧峡谷,东西狭长、南北较窄,是中国典型的带状河谷型城市,地层主要为第四纪松散沉积物和新近系泥岩,下垫层为新近系泥岩和砂岩。南北两山主要为晚更新世松散的风成黄土所覆盖,这些松散的物质极易形成崩滑流等地质灾害^[22]。本次所选研究区主要为主城区及南北两山的山前斜坡,历来为地质灾害高发区(图 1)。

1.2 PS-InSAR 技术

PS-InSAR 最早是由 Ferretti 等于 2000 年提出,主要目的是克服传统 InSAR 技术存在的时空失相

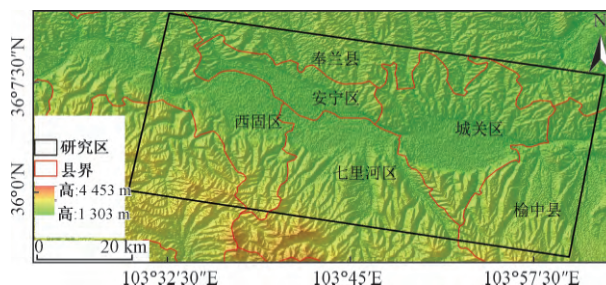


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

干和大气延迟相位的局限性^[23]。其基本思想是通过利用覆盖同一地区的多景雷达干涉图像(一般大于 20 景)构成图像时间序列、识别和提取散射特性稳定的永久散射体(如建筑物或者岩石等),利用永久散射体的相位变化特征获得时间序列上的地表形变信息^[24]。其基本原理如下。

对于研究区内选取的 N 幅 SAR 影像,基于时空基线和多普勒质心差分布最优的原则选取一景影像作为主影像,其余从影像与其进行精确配准,生成 $N-1$ 幅干涉图。则对任意景干涉图上的任一像元,其相位组成^[25]可表示为

$$\varphi = \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{move}} \quad (1)$$

式(1)中: φ_{atmo} 为大气扰动引起的干涉相位; φ_{noise} 为各种噪声引起的干涉相位; φ_{flat} 为平地效应引起的干涉相位; φ_{topo} 为地形起伏引起的干涉相位; φ_{move} 为两次观测目标沿视线方向移动引起的相位变化。

应用 PS-InSAR 技术进行 SAR 数据处理步骤主要包括:主影像选择与主从影像对配准,差分干涉图生成、PS 选定、平均变形速率估计和地形误差消除,PS 点变形时间序列分析与平均变形估算等^[26-27]。

1.3 数据及预处理

实验数据为 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 的 68 幅 SAR 影像,其中 Sentinel-1A 为 63 张, Sentinel-1B 为 5 张。图像获取时间跨度为 2014 年 10 月—2020 年 4 月,为干涉宽幅(interferometric wide swath, IW)模式、降轨、VV 极化,其空间分辨率为 5 m × 20 m(距离向 × 方位向),覆盖范围为 20 km × 25 km;同时,实验中还获取了对应成像日期的精密定轨星历数据,用于辐射定标;数字高程模型为 30 m 的 SRTM DEM 数据,用于配准、去平地效应和地理编码。

数据预处理包括数据格式转换、研究区裁剪,依据时空基线和多普勒质心频率参数选取 2017 年 5 月 2 日获取影像为主影像,其余 67 景为副影像,得到干涉像对时空基线分布图(图 2);经辐射定标、主副影像配准生成相干系数图后,使用 SRTM DEM

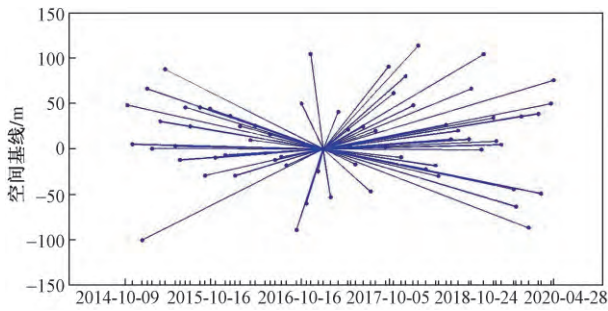


图2 时空基线分布

Fig. 2 Baselines of time and space

去地平效应;采用振幅离差指数法选取 PS 点、估算大气延迟相位并在干涉图中去除;最后获取 PS 点变形速率,并基于 Google earth 进行地理编码。

2 结果与分析

图3为 Sentinel-1 数据经 PS-InSAR 技术处理后,地理编码叠加于 Google earth 上的研究区 PS 点年均形变速率图。可以看出,在 2014 年 10 月—2020 年 5 月期间,兰州市的部分地区出现了较为明显的地表形变,年形变速率变化范围为 $-39.97 \sim 9.63 \text{ mm}$,且绝大部分 PS 点的年形变速率为 $5 \sim -10 \text{ mm}$ [图 3(b)]。其中,形变速率较大的区域主要位于南北两山的山前台地和坡脚处 [图 3(a)]。

为了探究兰州市城区 2014—2020 年间地面沉降时序变化,选择这 4 个具有代表性的沉降区域范围并进行分析。4 个沉降区域分别位于西固区的柳泉乡和杏胡台村(A),晏家坪村西侧(B),榆中县和平镇(C),城关区的白道坪村和上坪村(D)。

为了进一步分析图 3 中区域 A、B、C 和 D 在时间上的沉降细节和沉降趋势,将其细分成有明显沉降现象的数个小区域,并根据该区域的历史信息进行分析 and 验证。

从图 4(a) 可以看出, A 区域有两个较明显的沉

降区域,即区域 1 柳泉乡中坪村和区域 2 杏胡台村。图 4(d) 为 2 个形变区域在时间序列上的累积变形曲线。可见,区域 1 和区域 2 的地表形变趋势较为接近,累计沉降量均超过了 50 mm,均呈现出稳定且持续的沉降趋势。

为进一步分析地表沉降成因,收集了沉降区地质图进行叠加分析 [图 4(b)]。可以看出该范围地层主要以黄土、亚砂土砂岩为主,该地层在受围压增大时,极易产生不同程度的沉降现象。实地调查得知,中坪村及杏胡台村在 2014—2020 年间,在新修建住宅处发生多处明显的墙面裂缝和地表塌陷 [图 4(c)],验证了 PS-InSAR 在 A 处监测结果的可靠性。

B 区域(区域 3) 位于晏家坪西侧虎林路 [图 5(a)],该区域的地质主要以黄土、亚砂土、黏土和亚黏土为主 [图 5(b)],地层结构较为脆弱,沉降区位于砂岩黄土地层交界处,易产生形变。PS-InSAR 的监测显示,累计沉降量超过了 50 mm [图 5(d)],PS 点最大沉降速率达 39.97 mm/a 。实地调研发现 [图 5(c)],该区域位于烈士陵园东门附近,大面积的地面裂缝和下陷十分明显。在华林山大片民(商)用建筑位于黄土和亚沙土的斜坡面上,由于特殊的地理及地质,该区域仍处于一个不断下沉的状态。

C 区域(和平镇)为兰州市城镇化的重点区位之一,近年来有多宗土地被出让用于工业园区以及各类楼盘的开发。该区域的岩层构造同区域 A,为黄土和亚砂土为主 [图 6(b)],且与 A 处沉降区域相似也处于地层交界处,沉降现象明显,沉降范围遍布整个镇区,除西南部较为稳定外,其他区域(区域 4~6)均存在不均匀的沉降 [图 6(a)]。实地调研发现,徐家山庄(区域 6)至猪嘴岭村及其沿线的累计沉降超过了 60 mm [图 6(d)]徐家山庄西侧沉降速率达 34.37 mm/a ,沉降量和速率均较大,且呈

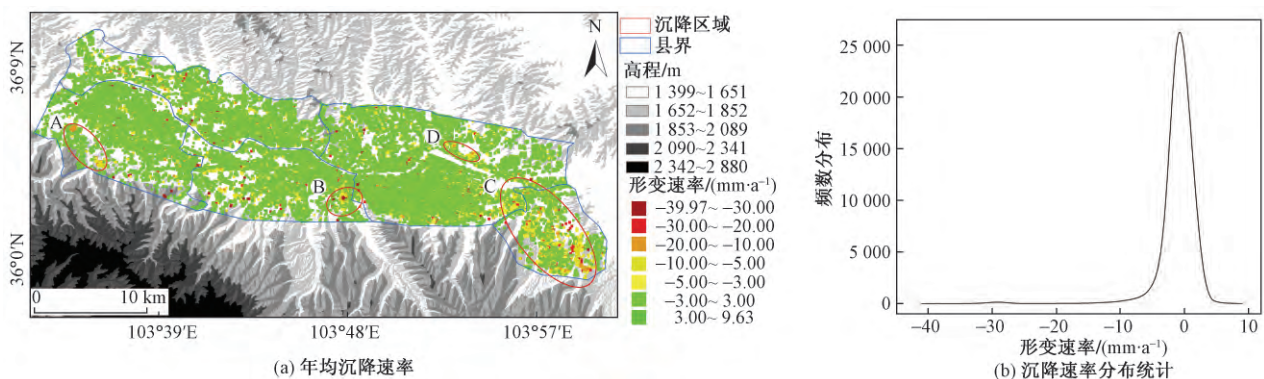
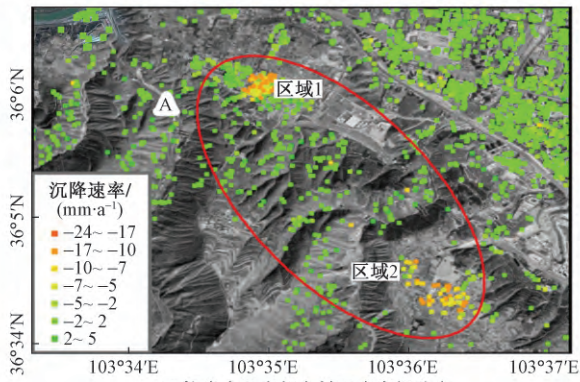
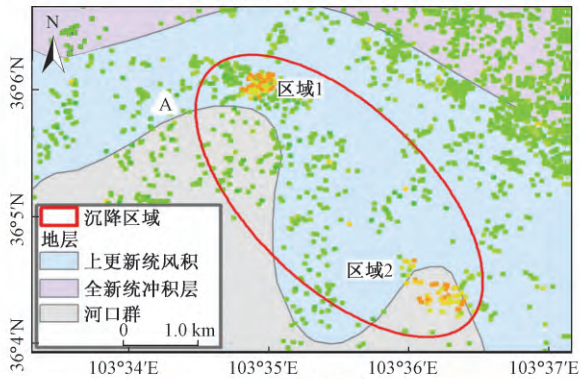


图3 兰州市年均沉降速率及其分布统计

Fig. 3 The average annual subsidence rate and its statistics of subsidence rate distribution of Lanzhou City



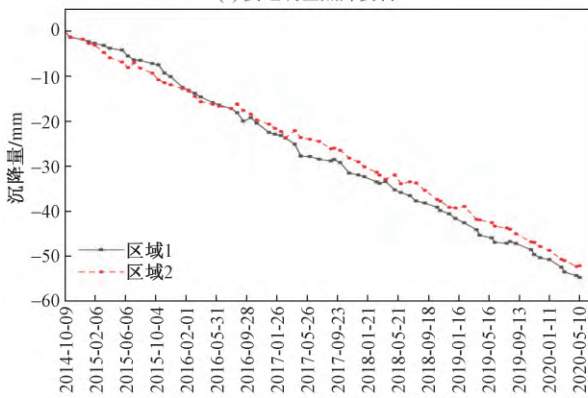
(a) 柳泉乡及杏胡台村PS点空间分布



(b) PS点的地层分布



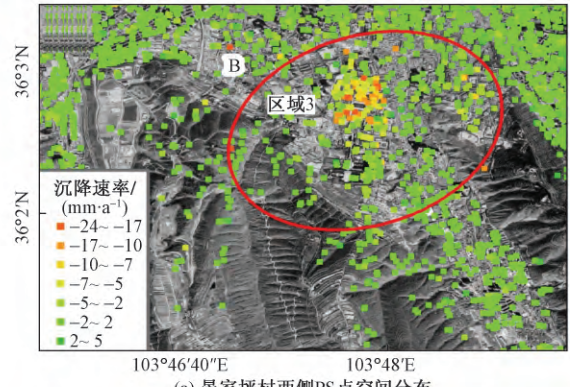
(c) 实地调查照片资料



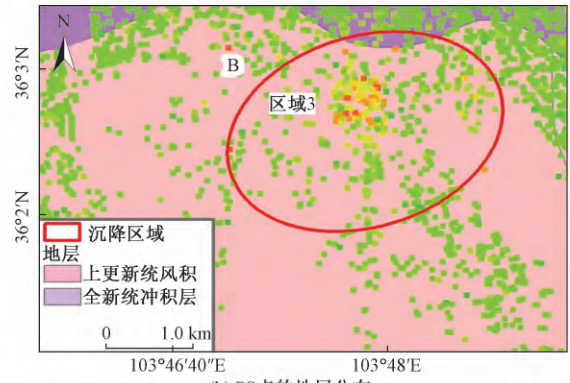
(d) 区域1和区域2累积沉降曲线

图4 A区域PS点沉降时空分布

Fig. 4 Time and space distribution of PS point settlement in Area A



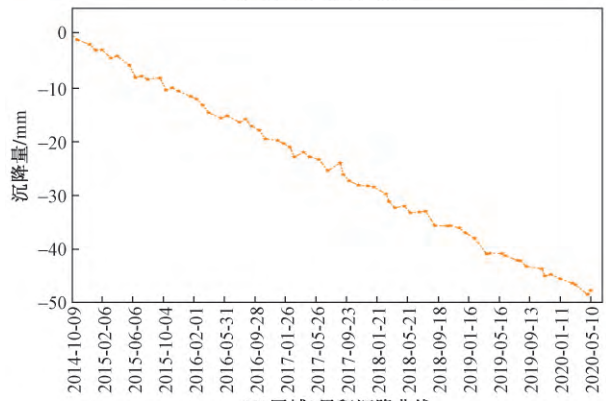
(a) 晏家坪村西侧PS点空间分布



(b) PS点的地层分布



(c) 实地调查照片资料



(d) 区域3累积沉降曲线

图5 B区域PS点沉降时空分布

Fig. 5 Time and space distribution of PS point settlement in Area B

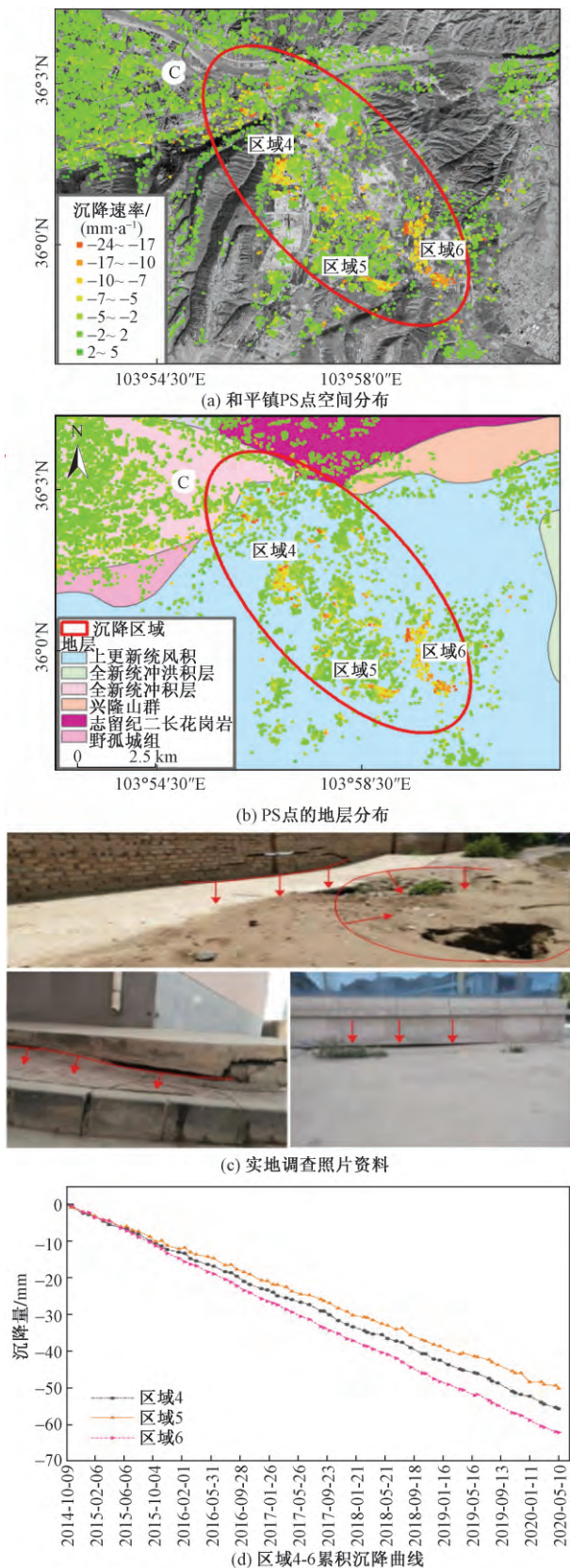


图6 C区域PS点沉降时空分布

Fig.6 Time and space distribution of PS point settlement in C area

现出逐年持续下沉的趋势。同时,区域4和区域5正在进行学校、老房区的改建和工业园区建设[图6(c)]在工程影响下其地表累计沉降量均超过了50mm。该区域的沉降现象也在一定程度上较好地反映了近年来兰州城市化扩张程度。

D区位于兰州市城关区东北侧的城中村(图7)地层结构主要以砂岩粉质岩为主,该区位于中川隐伏基底隆起带和皋兰褶皱带的结合部位,新构造运动较为强烈,以垂直变动为主,具有明显地继承性、差异性的特点^[28][图7(b)]。其中白道坪村(区域7)和上坪村(区域8)存在比较明显的地表沉降[图7(a)],且白道坪村的累计沉降量超过了60mm,上坪村的累计沉降量也达到了40mm,且呈现出持续的沉降趋势,PS点监测结果显示其下降趋势在近半年内趋于平缓[图7(d)]。调查发现,白道坪村与上坪村之间正在进行某大型地产开发[图7(c)],大面积的填(挖)方和高层建筑是地表沉降的主要诱发因素。

3 结论

研究基于对地观测的PS-InSAR技术,利用68景降轨的IW模式的Sentinel-1A和Sentinel-1B影像对2014年10月—2020年4月期间的兰州市城区进行时间序列地表沉降监测,反演出了研究区地表沉降时空分布情况,绘制了地面沉降的时空分布图,并通过地层资料叠加和实地调分析。结果表明:

(1) 研究区基于PS-InSAR技术监测具有较好的可靠性。监测期间,兰州市区绝大多数PS点的年均形变速率为10~-25mm,尤其是兰州市老城区—黄河北两岸的河谷盆地,PS点年均变形速率为5~-10mm/a,表明该区域的地表相对较稳定。在城区周边,随着城市化进程的加快和城建用地拓展,部分区域出现了较为明显的地表沉降,较明显的区域位于西固区的柳泉乡及杏胡台村、七里河区的晏家坪村、城关区和平镇以及黄河北岸的白道坪村的部分区域,其累积沉降量范围为-40~-60mm,最大的年均沉降速率达-24.61mm/a,并经实地调查验证了PS-InSAR技术监测结果具有较好的可靠性。

(2) 地面沉降主要受到地层岩性控制,并与人类工程活动密切相关。通过对四个明显沉降区域调查发现,所有监测到的沉降区域以及塌陷区域均为亚砂土、黄土状粉土和黄土为主,且除去城市化建设的要素,多数沉降区域位于岩层交界处。观察到沉降速率与岩层疏松程度之间的对应关系,在土

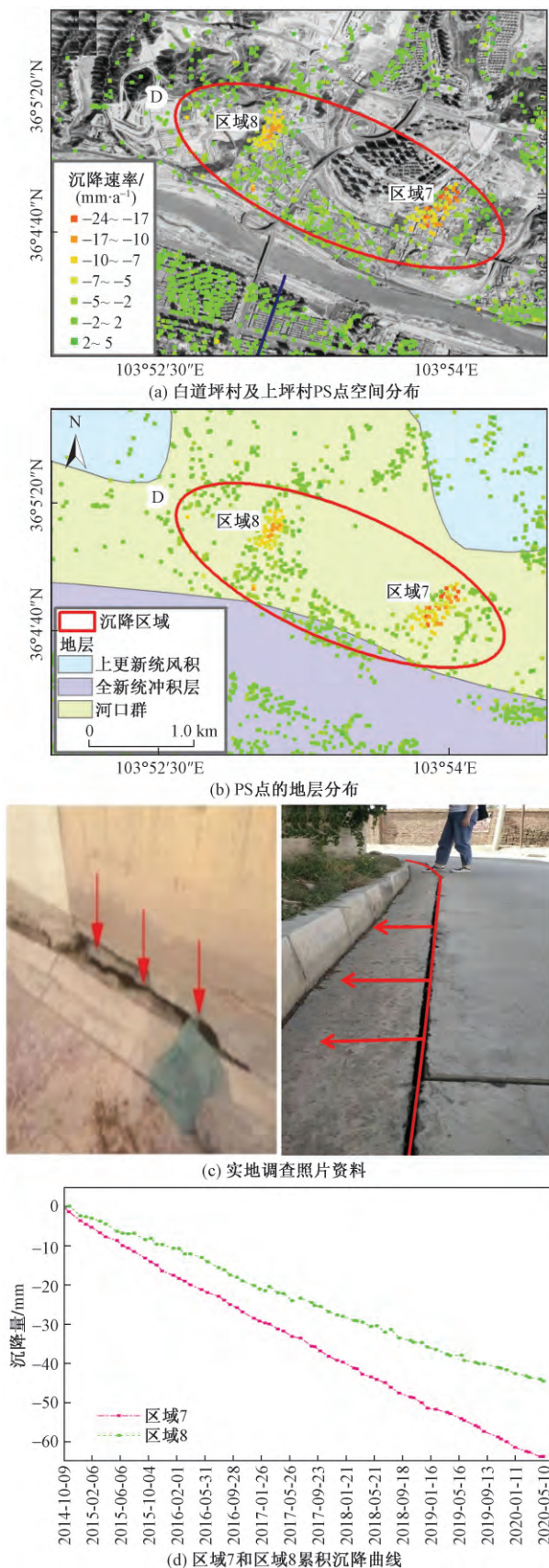


图7 D区域PS点沉降时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of PS point settlement in area D

层较为疏松的沉积物中,沉降速率明显更高。并且在2014—2020年间,大面积的人类活动,如大面积的房屋改建和城市化的快速发展,造成了软沉积物地区明显的地面沉降。除此之外,经对历史水文资料的调查研究表明,近些年来,由于大量水利工程的进行,地下水位有所抬升,因此地下水位的变化并没有对城市地面沉降产生较大的影响。

(3) 兰州城区的主要地质构造为湿陷性黄土,这种地层结构在干燥时质地较硬,且承载力较强,不易发生形变,但在水流侵蚀时,由于其自身土质结构荷载以及自身重力,土层会快速被破坏,产生不同程度的下沉。在地质结构主要以黄土为主的地区,城市的扩张多来源于对老旧区的改造以及对原始土地的改建,研究对黄土地区有效的城市布局规划和地表沉降研究具有重要参考价值。在兰州市,伴随着城市的加速发展,各种地下施工项目,大型基坑的开挖等对地质结构造成扰动,导致了一定的沉降。因此,将PS-InSAR技术与区域地层结构信息相结合,对于实施有效的土地利用规划和促进城市的健康和可持续发展是必要的。

尽管本次利用Sentinel-1数据和PS-InSAR技术获得兰州市区形变时间序列检测结果,由于缺乏实测数据,监测结果的验证仅采用了实地调研确定。今后研究需将InSAR与传统的监测技术相结合,进一步分析兰州地表变形的机理,提高地面监测的准确性和可靠性,为区域城市化进程和可持续的城市建设提供科技支持。

参考文献

[1] 郑凯,于松晖,张青锁. 地面沉降地质灾害的成因及防治方法分析[J]. 地矿测绘, 2019, 2(6): 154-155.
Zheng Kai, Yu Songhui, Zhang Qingsuo. Analysis of the causes and prevention methods of ground subsidence geological disasters [J]. Geology and Mineral Surveying, 2019, 2(6): 154-155.

[2] 赵元庆. 基于SBAS技术的厦门市地表沉降监测[J]. 测绘工程, 2020, 29(2): 46-51.
Zhao Yuanqing. Surface subsidence monitoring in Xiamen based on SBAS technology [J]. Surveying and Mapping Engineering, 2020, 29(2): 46-51.

[3] 杨振,徐佳. 利用Sentinel-1A数据监测南京河西地区地面沉降[J]. 测绘通报, 2020, 514(1): 64-68, 78.
Yang Zhen, Xu Jia. Monitoring land subsidence in Hexi area of Nanjing using Sentinel-1A data [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2020, 514(1): 64-68, 78.

[4] 杨斌. 基于时序InSAR技术的城市地表形变监测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
Yang Bin. Research on urban surface deformation monitoring based on time series InSAR technology [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.

[5] 何初露. 厦门岛地表沉降监测SBAS-InSAR技术研究[J]. 测

- 绘与空间地理信息, 2020, 43(1): 214-217.
He Chulu. Research on SBAS-InSAR technology for surface subsidence monitoring of Xiamen Island [J]. Surveying and Spatial Geographic Information, 2020, 43(1): 214-217.
- [6] 戴可人. 融合新一代卫星 SAR 数据的地形与形变信息提取模型与方法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Dai Keren. Terrain and deformation information extraction model and method based on fusion of new generation satellite SAR data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [7] 王国强, 陈仁琛. 基于 InSAR 技术的流域库岸地质灾害监测研究 [J]. 中国农村水利水电, 2020, 458(12): 212-216.
Wang Guoqiang, Chen Renchen. Research on geological disaster monitoring of river basin banks based on InSAR technology [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 458(12): 212-216.
- [8] Rogers A E E. Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry [J]. Science, 1969, 165(3895): 797-799.
- [9] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [10] 李承航, 张文春. 基于 InSAR 技术的监测应用及研究进展 [J]. 北方建筑, 2020, 5(4): 19-23.
Li Chenghang, Zhang Wenchun. Monitoring application and research progress based on InSAR technology [J]. Northern Architecture, 2020, 5(4): 19-23.
- [11] 周 吕. 雷达干涉测量地表沉降和建筑物变形监测及分析 [J]. 测绘学报, 2019, 48(5): 669.
Zhou Lü. Radar interferometric measurement of surface settlement and building deformation monitoring and analysis [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2019, 48(5): 669.
- [12] 兰恒星, 孟云闪, 仇义星. 复杂因素影响下的福州市地面沉降时空演化分析 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1350-1361.
Lan Hengxing, Meng Yunshan, Qiu Yixing. Analysis of the temporal and spatial evolution of land subsidence in Fuzhou City under the influence of complex factors [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1350-1361.
- [13] Fiaschi S, Holohan E P, Sheehy M, et al. PS-InSAR analysis of sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: a case study in the republic of Ireland [J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 348.
- [14] Zaenudin A, Darmawan I G B, Armijon M, et al. Land subsidence analysis in Bandar Lampung City based on InSAR [J]. Journal of Physics Conference Series, 2018, 1080(1): 012043.
- [15] 武 燕. 基于 DS-InSAR 方法的黄土区域高速铁路沿线沉降监测 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Wu Yan. Settlement monitoring along the high-speed railway in the loess region based on the DS-InSAR method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [16] Ferretti A, Prati C. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [17] 任 超, 施显健, 周 吕, 等. 基于哨兵-1A 时间序列合成孔径雷达的地铁沿线地面沉降监测与分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 507(2): 386-391.
Ren Chao, Shi Xianjian, Zhou Lü, et al. Monitoring and analysis of land subsidence along subway line based on Sentinel-1A time series synthetic aperture radar [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 507(2): 386-391.
- [18] 卢旺达, 韩春明, 岳昔娟, 等. 基于 Sentinel-1A 数据的天津地区 PS-InSAR 地面沉降监测与分析 [J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 416-423.
Lu Wangda, Han Chunming, Yue Xijuan, et al. PS-InSAR land subsidence monitoring and analysis in Tianjin area based on Sentinel-1A data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 416-423.
- [19] 刘延兵, 丁仁平. 兰州主要城市地质环境问题探析 [J]. 城市地质, 2018, 13(4): 8-13.
Liu Yanbing, Ding Saping. Analysis on the geological environmental problems of major cities in Lanzhou [J]. Urban Geology, 2018, 13(4): 8-13.
- [20] 应忠旺. 兰州白塔山地区地质灾害调查及边坡稳定性分析 [J]. 铁道建筑, 2016(4): 107-110.
Ying Zhongwang. Geological disaster survey and slope stability analysis in Baitashan Area, Lanzhou [J]. Railway Construction, 2016(4): 107-110.
- [21] 周 涛. 国土空间规划体系下地质灾害评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
Zhou Tao. Evaluation of geological hazards under the territorial and spatial planning system [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [22] 曾剑楠, 张 亮, 郭 彪, 等. 兰州西固地区工程地质适宜性评价 [J]. 世界有色金属, 2017(6): 128, 130.
Zeng Jiannan, Zhang Liang, Guo Biao, et al. Evaluation of engineering geology suitability in Xigu Area, Lanzhou [J]. World Nonferrous Metals, 2017(6): 128, 130.
- [23] Ferretti A, Prati C. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [24] Ferretti A, Prati C, Rocca F L. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [25] 黄佳璇. 基于 PS-InSAR 蠕动型滑坡动态监测及区域稳定性分析 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
Huang Jiakuan. Dynamic monitoring and regional stability analysis of creeping landslide based on PS-InSAR [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [26] 赵 强. 基于 InSAR 时序分析的吉林省地表形变监测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Zhao Qiang. Research on land deformation monitoring in Jilin Province based on InSAR time series analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [27] 朱 玉. 基于 PS-InSAR 的贵州省大方县、纳雍县滑坡易发性评价 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
Zhu Yu. Evaluation of landslide susceptibility based on PS-InSAR in Dafang County and Nayong County of Guizhou Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [28] 徐 静. 甘肃省兰州市白道坪项目工程地质适宜性评价 [J]. 西部资源, 2017(5): 118-119.
Xu Jing. Engineering geological suitability evaluation of Bidaoping project in Lanzhou City, Gansu Province [J]. Western Resources, 2017(5): 118-119.