引文格式:秦知强,蒋亚楠,张超,等.延安新区平山造城后PS-DS-InSAR二维形变监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1719-1731.DOI:10.13203/j.whugis20250001

Citation:QIN Zhiqiang,JIANG Ya'nan,ZHANG Chao,et al.Two-Dimensional Surface Subsidence Monitoring over Mountain Excavation and City Construction Region with PS-DS-InSAR Technique in Yan'an New District[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1719-1731.DOI:10.13203/j.whugis20250001

延安新区平山造城后PS-DS-InSAR二维形变监测

秦知强[1] 蒋亚楠[1,2] 张 超[1] 杨佳凯[1] 周崇杨[1]

1 成都理工大学地球与行星科学学院,四川 成都,610059

2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川 成都,610059

摘 要:延安新区高填方岩土工程引发了大面积地面沉降,工后不均匀的地面沉降会直接影响地表设施稳定性,因此监测地面沉降和探究形变机理十分必要。基于此,利用一种联合永久散射体(persistent scatterer,PS)与分布式散射体(distributed scatterer,DS)合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)方法,处理2019-01—2022-06的两个轨道共计181景Sentinel-1A数据,得到延安新区地表沉降结果。将时序InSAR结果解算至二维方向分析其形变特征,通过变分模态分解得到形变趋势与周期项,进一步探讨沉降与降水的关系。结果表明,PS-DS-InSAR方法相较PS-InSAR方法的点覆盖率由42.48%提高至85.18%;垂直向主要形变速率为-40~10 mm/a,最大沉降速率为65.3 mm/a,位于延安新区东北部,填土厚度是沉降尺度的直接影响因素;东西向形变主要分布于原状沟谷两侧,与工前地形直接相关。此外,周期性强降雨也会对地面沉降的波动产生显著的周期影响。研究结果可以为沟壑地区高填方工后的地表形变监测、工程建设提供科学参考。

关键词:InSAR;沉降;延安新区;多维分解;变分模态分解

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-10-11

DOI:10.13203/j.whugis20250001 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1719-13

Two-Dimensional Surface Subsidence Monitoring over Mountain Excavation and City Construction Region with PS-DS-InSAR Technique in Yan'an New District

QIN Zhiqiang[1] *JIANG Ya'nan*[1,2] *ZHANG Chao*[1] *YANG Jiakai*[1] *ZHOU Chongyang*[1]

1 College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

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

Abstract: **Objectives**: The high-fill geotechnical engineering in Yan'an new district has induced large-scale ground settlement, which directly impacts the stability of surface facilities. Therefore, it is essential to monitor and investigate the mechanisms of ground settlement and deformation. **Methods**: Based on this, we employed a time-series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) method that combines measurements from persistent scatterer (PS) and distributed scatterer (DS) (PS-DS-InSAR), to process a total of 181 scenes of Sentinel-1A data from ascending orbits spanning from January 2019 to June 2022. This allowed us to obtain ground deformation data for Yan'an new district. Subsequently, we conducted a two-dimensional decomposition of the time-series results to reveal the mechanism of two-dimensional surface deformation. Additionally, we utilized variational mode decomposition technology to decompose the precipitation and settlement data of Yan'an new district into trend and periodic components, thereby investigating the relationship between the com-

基金项目:国家自然科学基金(42304042);四川省重点研发项目(2023YFS0439)。

第一作者:秦知强,硕士生,主要从事SAR/InSAR数据处理及其在地表形变监测中的应用研究。qinzhiqiang@stu.cdut.edu.cn

通信作者:蒋亚楠,教授。jiangyanan@cdut.edu.cn

ponents. **Results**: Utilizing the aforementioned improved method, the point coverage increased from 42.48% to 85.18%. The primary vertical deformation rate ranges from −40 to 10 mm/a, with the maximum settlement rate of 65.3 mm/a observed in the northeastern part of the new area. The thickness of the fill soil is a direct influencing factor on the settlement scale. Eastward deformation is distributed on the left side of the valleys, while westward deformation is located on the right side, which is highly correlated with the pre-construction terrain. **Conclusions**: This research can provide scientific references for surface deformation monitoring and engineering construction in gully regions after high fill engineering.

Key words: InSAR; subsidence; Yan'an new district; multi-dimensional decomposition; variational mode decomposition

黄土高原囊括了陕西、甘肃、山西等省区,土壤条件独特,表层具有欠固结性和易侵蚀性[1]。近年来,黄土高原建设用地资源匮乏一直制约着城市化推进[2]。为解决该问题,一些地方提出“中疏外扩、上山建城”的发展战略[3],延安新区[4]、兰州新区[5]、山西吕梁机场[6]等地将山削去后填平山谷,从而形成平坦建筑用地。但部分区域如延安新区,削山、填沟彻底改变了原始地形,导致地表出现沉降[7]和边坡失稳[8]等问题。长期不均匀的地面沉降会威胁建筑安全,因此监测延安新区地面沉降、探究沉降形变机理对后续建城规划有重要意义。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术具有不受云雾干扰、广域识别等优势[9],被广泛应用于地表沉降监测[10]、滑坡隐患识别[11]、地震形变监测[12]等。部分学者提出了永久散射体(persistent scatterer,PS)InSAR[13]和小基线集(small baseline subset,SBAS)InSAR技术[14],可以获取研究区长时间序列的形变信息[15],其中PS-InSAR主要针对城市建筑物、路面等稳定地面点。为了提高非城市区域观测点密度,文献[16]提出了第二代永久散射体技术(SqueeSAR),提高了对土壤、稀疏植被区的分布式散射体(distributed scatterer,DS)的识别。两种散射体各有特点,联合二者测量可以提高地面观测点密度。直接用PS、DS点构建三角网则计算冗余明显,而利用双尺度网络,从高相位质量到低相位质量以多层模式处理PS和DS点可以提高计算效率[17]。

当获取到传感器视线向(line of sight,LOS)形变后,将LOS向除以入射角余弦可以近似得到垂直结果[7],或利用多轨数据分解至东西、垂直方向[18-19]。就延安新区而言,一些学者利用InSAR等技术进行了地质分析与沉降监测:挖填区重构黄土具有压缩性与湿陷性[20],沉降主要分布于填方区[21],同时受多因素综合影响[22],其沉降的时序特征可分为瞬时形变、主固结、次固结三阶段[7];抬升主要分布于挖方区,受卸载作用与压实回弹影响[23-24];植被特征表现为瞬时破坏与逐步恢复[25]。而针对延安新区三大填方沉降区的整体研究仍显不足,特别是对其最晚竣工的东北部关注不足。此外,当前缺少对该区的多轨数据联合分析与形变多维分解研究,针对强降雨引发的周期性地表形变亦有待进一步探索。

本文首先利用2019-01—2022-06时间段内的两个轨道共计181景Sentinel-1A数据,并通过联合PS和DS的PS-DS-InSAR方法获取延安新区的地表形变结果;然后用冰、云和陆地高程卫星2号(cloud and land elevation satellite-2,ICESat-2)数据验证数字高程模型(digital elevation model,DEM)改正结果,进而得到新区全域的填土变化,并对联合双轨道数据的LOS向形变解算至二维方向,探讨沉降二维形变机理;最后利用变分模态分解(variational mode decomposition,VMD)将沉降分解为趋势项与周期项,进一步讨论降水与沉降的周期波动之间的关系。

1 研究区概况与地质特性

延安新区位于陕西省延安市(图1),江畔的老城区被群山包围,无法扩张发展,因而居民与规划用地紧张,于是在宝塔区老城区的北方开展历时长达6 a的“平山造城”工程[26]。岩土工程和城市建设的时空追溯如图2所示,图2中选取了Google Earth影像中具有代表性的6个时间节点,可以看到2010—2013年年末,岩土工程主要集中在延安新区中部,此处是三大山谷沟中长度最长和面积最大的区域(图2(a)),也是填土厚度最深的区域,此时平坦面积达到12.2 km^2。2013年后,岩土工程向西部蔓延到西部的老城区,其中部分地方开始城市建设,2015年年中平坦面积达到18.4 km^2;随后,岩土工程继续向西部蔓延,2017年年中完成了对第二个较大山谷沟的填土作业,2018年年末完成了第三个大沟谷填

方工程，此时整体工程达到最大面积 22 km²，城市建筑主要分布在中部和西部，到2022年进行了大量的城市和交通道路与枢纽的建设（图1）。岩土工程从 2012-04—2018-08 创造了 22 km²的平坦建设用地，最大挖方深度达 118 m，最大填方高度达 112 m[4]。原始高程介于950～1 200 m，沟壑区坡度在30°～60°，工程完成后城市表面平坦，主城区平均地面高程为1 100m，整体坡度1%～3%[7]。

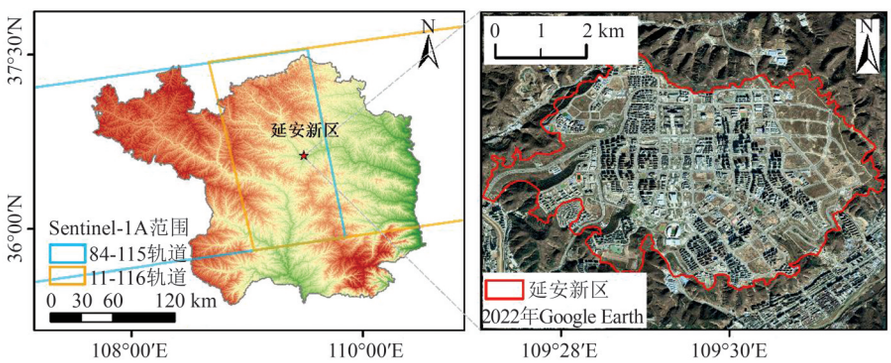


图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the Study Area

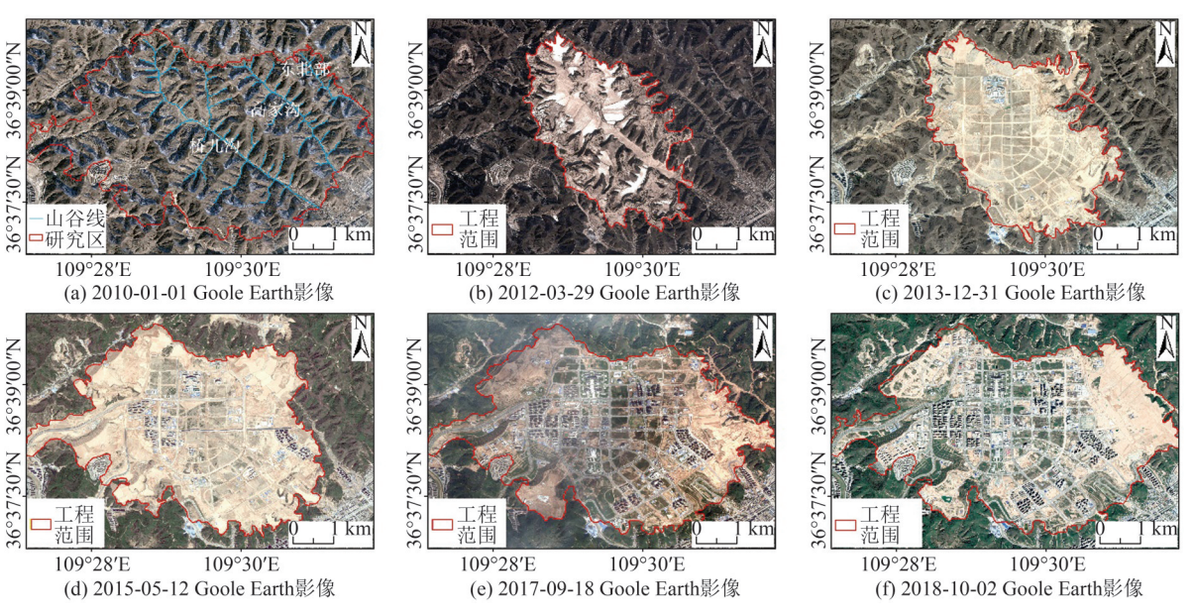


图2　延安新区2010—2018年岩土工程范围变化

Fig. 2　Changes in Geotechnical Engineering Region in Yan'an New District from 2010 to 2018

延安地表沟壑纵横，表层覆盖土壤复杂，主要有耕地、植被、冲沟洪积物等[4]。地表往下黄土地层主要为第四系新生代（包括更新世和全新世）黄土和侏罗纪砂泥岩。延安新区填挖方工程的土质类型主要为离石黄土和马兰黄土，具有分布复杂且多孔等特点[23]。填方黄土的力学特性受到含水率、干密度、填方厚度等诸多因素影响，同时自身沉降又受到压实（空气排出）、固结（流体排出）、湿陷（浸润后土壤颗粒重新排列）的三阶段影响[24]。一般情况下土壤的颗粒物不可再压缩，因此孔隙比直接影响黄土的压缩性。含水率和干密度会直接影响湿陷性尺度[20]。原状黄土颗粒间形成了胶结结构，抗压缩能力强，而填方土破坏了这种胶结结构，且短时间无法重构[27]，这导致填方黄土在自重和雨水浸润诱发湿陷等因素影响下产生沉降现象。

2　研究数据与方法

2.1　研究数据

考虑到延安新区的岩土工程于2018年结束，且受限于Sentinel-1在此区域只有升轨数据，本文选取了Sentinel-1A卫星在升轨下2019-01—2022-06间的SAR影像数据，具体参数如表1所示。

采用30 m分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务（shuttle radar topography mission，SRTM）

表1 Sentinel-1A数据信息

Table 1 Sentinel-1A Data Information

传感器	轨道	极化方式	轨道号	帧号	平均入射角/(°)	覆盖时间	影像数量/景
Sentinel-1A	升轨	VV	84	115	45.1	2019-01-03—2022-05-26	96
			11	116	34.4	2019-01-01—2022-06-02	85

DEM以及由资源三号(ZY-3)卫星多视角相机生成的立体5 m分辨率DEM影像,辅助SAR数据处理和延安新区地形变化分析。

ICESat-2搭载的激光雷达可以获取地面单点的高程信息,其精度可达分米级[28]。本文获取了2019年1月覆盖新区东北区的ICESat-2数据,利用单点光子的高程验证本文对ZY-3 DEM东北部的修正精度,以确保地形变化分析的准确性。此外,利用Google Earth光学影像对延安新区的岩土工程整个周期进行时空追溯,以及通过国家青藏高原数据中心[29]的降水数据分析沉降与降水周期的相关性。

2.2 PS-DS-InSAR方法

考虑到岩土工程和频繁施工建设引起的大面积低相干区,为了保证稳定区的高相干性,同时提高非稳定区的有效观测结果点密度,本文通过一种双层网络联合测量PS与DS点,利用振幅离差阈值法筛选PS点[24],其中振幅离差指数(amplitude dispersion index,ADI)计算如下:

$$I_{\mathrm{ADI}}=\sigma_i/\mu \tag{1}$$

式中,σ_i为振幅标准差;μ为振幅平均值。

DS点对地表的土壤、植被稀疏区更为敏感,符合新区地面特征[25],而SqueeSAR方法常用于DS点的识别[16]。通过Anderson-Darling(AD)检验识别同质像元[9],对于一个像元对,其AD的统计参数A^2为:

$$A^2=\frac{N}{2}\sum_{F_{a,b}(x)}\frac{[F_a(x)-F_b(x)]^2}{[F_{a,b}(x)\times(1-F_{a,b}(x))]} \tag{2}$$

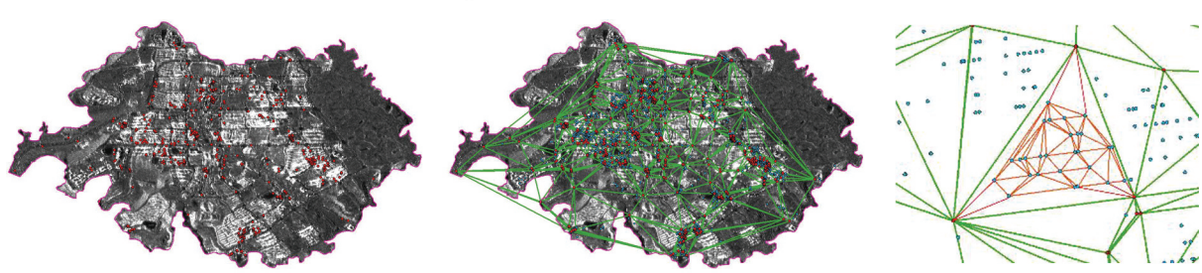
式中,N为SAR影像数量;$F_a(x)$、$F_b(x)$表示像元a、b的振幅分布函数;$F_{a,b}(x)$为组合像元的分布函数。

AD检验提取均匀像元族之后,在DS像元相干矩阵中,利用最大似然法估计最优相干相位,该过程可认为是一个非线性的参数优化过程[16],相位最优估计值$\hat{\boldsymbol{Q}}$为:

$$\hat{\boldsymbol{Q}}=\arg\max_{\boldsymbol{Q}}\left\{\boldsymbol{\Delta}^{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{L}\circ\hat{\tau}\right)\boldsymbol{\Delta}\right\} \tag{3}$$

式中,$\hat{Q}$为最优估计值;$\boldsymbol{\Delta}$为N维向量矩;L为复相干矩阵;$\boldsymbol{\Delta}^{\mathrm{H}}$为$\boldsymbol{\Delta}$的共轭转置;$\boldsymbol{Q}$为极化相干矩。

为避免使用Delaunay三角网连接PS与DS点出现的冗余问题[17],利用PS点结果作为联合PS与DS点的主网络和误差约束[24]。在识别到PS点后(图3(a)),先计算PS点的Delaunay三角网作为主网(图3(b)),然后以主网为约束,搜索局部三角网内的DS点,并在PS三角网约束下建立DS点的三角网(图3(c)),这种方法不仅减少误差传播,还能提高计算效率。



(a) 高相干PS点 (b) PS三角网与高相干DS点 (c) PS约束下的DS三角网

注:红色为PS点,蓝色为DS点。

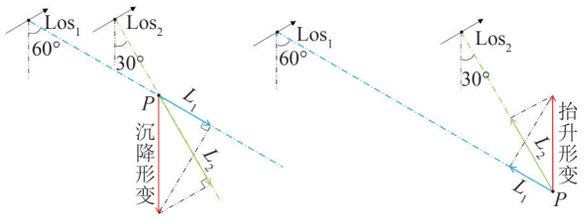
图3 高相干点联合PS与DS的网络模型示例

Fig. 3 Example of High Coherence Point Joint PS and DS Network Model

采用Delaunay最小费用流解缠方法对形变进行初步估计。该方法主要针对高相干点的解算,有效减少相干像素的影响。为进一步提高估算精度,利用小波分解去除低通噪声,从而保留空间细节。通过高通滤波去除大气效应和地理编码误差,得到最终的形变结果。

2.3 形变二维分解

如图4所示,相同升轨轨道不同入射角的LOS向观测值存在差异,对于相同的地表形变量,30°入射角LOS观测值L_1明显大于60°入射角下的观测值L_2。而形变的分解正是利用这种不同视角观测值的差异构建分量矩阵,实现多维分解。



(a) 沉降形变　　(b) 抬升形变

图4　不同入射角引起的LOS向观测值差异

Fig. 4　Differences in LOS Observations Caused by Different Incident Angles

为更真实地反映地表的垂直和水平形变，就必须利用LOS向形变数据解算出多维形变。Sentinel-1A卫星因其近极地绕地运行导致其对南北向形变的观测结果贡献很小[30]，因此本文忽略南北向形变，仅利用两轨道数据计算垂直向和东西向形变，其计算矩阵形式如下：

$$\begin{bmatrix} d_{\mathrm{LOS}_1} \\ d_{\mathrm{LOS}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1\cos\alpha_1 & \cos\theta_1 \\ -\sin\theta_2\cos\alpha_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{\mathrm{E}} \\ d_{\mathrm{U}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，d_{LOS}为LOS向形变观测值；θ为SAR入射角；α为北方向与地距方向的夹角，对于升轨，其值可由升轨方位角减去$3\pi/2$计算；d_{E}为东西向形变；d_{U}为垂直向形变；下标1和2代表了第1、第2个轨道。

2.4　VMD

VMD可以将时序信号分解为多个模态函数(intrinsic mode function，IMF)分量[31]。如果由k个IMF分量构成，则每个IMF分量通过Hilbert变换，得到其解析信号。VMD的约束变分模型可表示为：

$$\min_{\{u_k\},\{\omega_k\}}\left\{\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)u_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|_2^2\right\} \tag{5}$$

式中，$u_k(t)$为第k个固有模态函数；$\omega_k=\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_k\}$表示各分量的中心频率；$\partial_t$为时间一阶导；$\delta(t)$为Dirac delta函数；$\frac{\mathrm{j}}{\pi t}$为核函数。

为进一步优化模型，引入二次惩罚函数和增广形式的拉格朗日乘法算子，增广形式的拉格朗日函数如下：

$$\begin{aligned} L\left(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda\right)= & \\ \alpha\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)u_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|_2^2+ & \\ \left\|f(t)-\sum_k u_k(t)\right\|_2^2+ & \\ \left\langle\lambda(t),f(t)-\sum_k u_k(t)\right\rangle & \end{aligned} \tag{6}$$

式中，α为惩罚函数参数；λ为拉格朗日乘法算子；$\|\cdot\|_2^2$为二范数平方；$f(t)-\sum_k u_k(t)$为重构误差；L为拉格朗日函数；$\lambda(t)$，$f(t)-\sum_k u_k(t)$为内积项。

通过求解增广后拉格朗日函数的鞍点，得到VMD的最优解。本文将降水和时序形变数据用VMD分解得到各自的趋势项与周期项，进一步探讨两者之间的关系。

3　结果与验证

3.1　时序形变结果

利用PS-InSAR和PS-DS-InSAR分别处理84轨道数据得到的形变结果如图5所示，其中绿色(−8～8 mm/a)表示稳定，红色(＜−8 mm/a)表示沉降，蓝色(＞8 mm/a)表示抬升。相较于PS-InSAR，PS-DS-InSAR相干目标更为密集，同时对延安新区东北部结果有所补充。为了更准确地分析，表2统计了工程范围内的数据，84轨道PS-DS-InSAR的点数为369 865个，明显高于PS-InSAR的点数。此外，为了结果的可视性，将两者结果转为雷达分辨率下的栅格数据进行像元计数，以近似计算结果的覆盖率，其中两者空间覆盖率分别为42.48%、85.18%，可以看出PS-DS-InSAR空间覆盖率得到了明显提升。

进一步使用11轨道数据得到两种方法的结果如图6所示，可以看出，PS-DS-InSAR结果质量提升明显，点数由116 066提高至297 960；空间覆盖率由39.35%提高至82.91%。从图5、图6和表2可以看出，两种方法均存在11轨道数据质量略低于84轨道，其原因可能是延安新区在11轨道下更靠近雷达卫星，导致近距离引起的压缩形变效应[32]。从整体对比结果来看，传统的PS-InSAR方法主要针对PS点的识别，这些点通常分布于建筑物与稳定道路。从图5和图6中PS-InSAR结果可以看出，图中沿道路展布的分布特征十分明显。在引入DS点的识别后，可以覆盖土壤与稀疏植被区，因此点密度和覆盖率有所增加，以更好地分析全域多维形变。

LOS向结果中方形缺失主要由于高楼施工引起的失相干所致，新区LOS向的主要形变为−30～8 mm/a。整体可以看到延安新区主要有三大线性沉降区域(图2(a))，从西至东依次位于桥儿沟(第一沉降区)、高家沟(第二沉降区)、新区东北部(第三沉降区)，西侧和西南侧主要分布数个漏斗状沉降区。在第二与第三沉降区间探

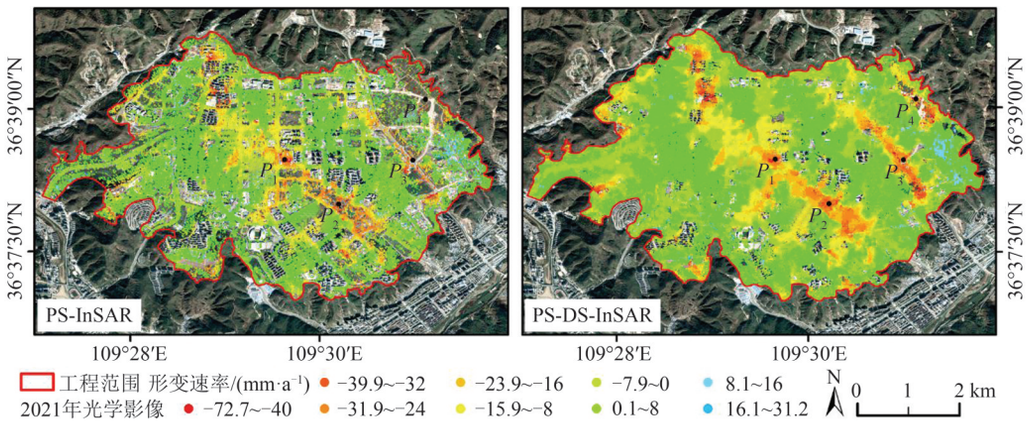


图5 84轨道PS-InSAR与PS-DS-InSAR的LOS向结果对比

Fig. 5 Comparison of PS-InSAR and PS-DS-InSAR LOS Results for Path 84

表2 PS-InSAR与PS-DS-InSAR结果统计

Table 2 Statistics of PS-InSAR and PS-DS-InSAR Results

技术方法	轨道	点数/个	像元数/个	覆盖率/%
PS-InSAR	84	143 889	59 785	42.48
	11	116 066	55 372	39.35
PS-DS-InSAR	84	369 865	119 877	85.18
	11	297 960	116 667	82.91

测到地面抬升,主要抬升在下文填土厚度所示的BB'剖线挖方厚度最大处。延安新区从西至东的形变尺度与岩土工程时间顺序契合,位于最后完成施工的东部沉降与抬升形变更为显著,形变除三大沉降区与抬升区外,整体较稳定。

3.2 一致性检验

由于缺乏延安新区地面高精度的观测数据,对照前人的研究结果,PS-InSAR结果沉降分布与沉降量级一致[22],进一步交叉验证84轨道的PS-InSAR和PS-DS-InSAR结果。通过提取研究区同名点,绘制了核密度散点图如图7(a)所示,其中离散的点可能由地形变化引起的低相干性点导致,R^2为0.937,说明两者结果一致性较高。图7(b)为选取84轨道的两种技术P_1~P_4点的累积沉降结果,时序统计吻合度较高,进一步说明结果的一致性。

3.3 形变二维分解结果

垂直向形变速率的解算结果如图8(a)所示,新区的垂直向形变与上文LOS向结果分布一致,能明显看出三大线性沉降区,且与填方区重合,明显的沉降区沿着流域展布,这一点符合沟壑填方黄土的沉降形变分布。其中完成岩土工程时间较早的桥儿沟、高家沟的平均沉降速率分别为10~35 mm/a、15~40 mm/a。东北区沉降量相对前两者更为严重,其最大沉降速率为65.3 mm/a,平均沉降速率为20~50 mm/a,这可能是东北区岩土工程时间靠后(2017~2018年),工后地形尚未完全稳定,处于主固结阶段[7],同时此处道路交错,也承担了一定的交通荷载。

东西向形变速率如图8(b)所示,其中负值为东向形变,主要分布在山谷线南侧;正值蓝色为

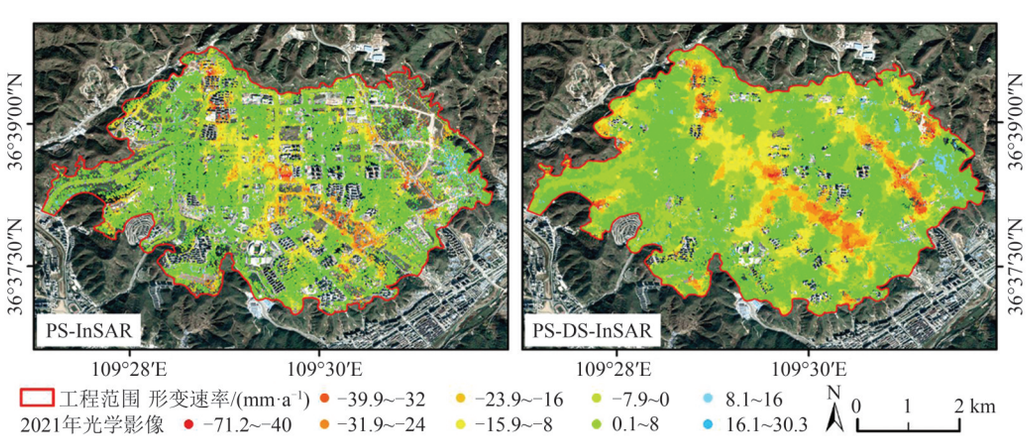
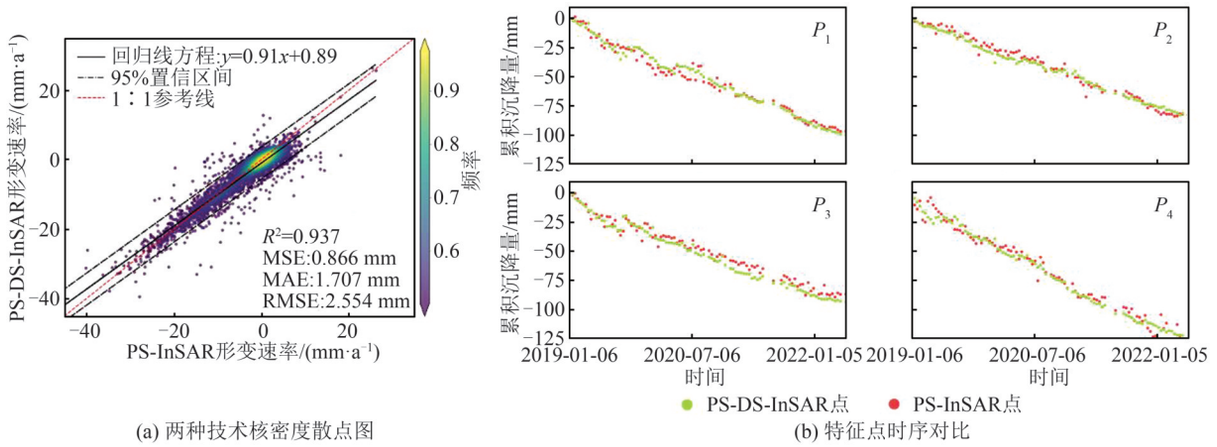


图6 11轨道PS-InSAR与PS-DS-InSAR LOS向结果对比

Fig. 6 Comparison of PS-InSAR and PS-DS-InSAR LOS Results for Path 11

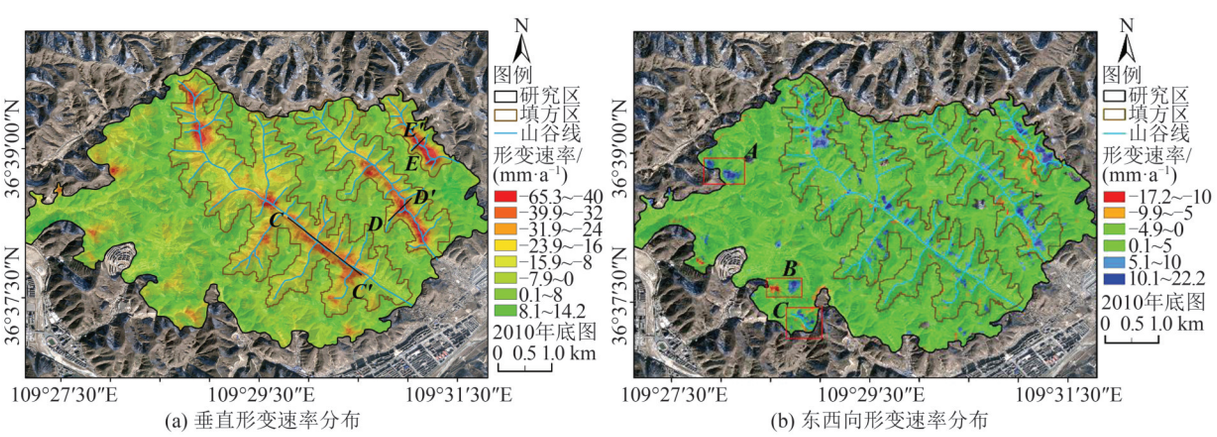


(a) 两种技术核密度散点图　　(b) 特征点时序对比

图 7　两种 InSAR 方法验证

Fig. 7　Verification of Two InSAR Methods

西向形变，主要分布在山谷线北侧。在延安新区西部，图 8(b)中 A 区域的西向形变是因为此处位于边坡，存在西向蠕动，形变特征与滑坡蠕移类似；B 区域处于沉降漏斗区，由后文填土厚度分布可以看出此处为填方区，存在漏斗沉降引起的东西分布；C 区域处位于沟谷状填方区，东西形变分布与主要研究区（三大沉降区）一致。桥儿沟区域除了中部与北部的严重沉降区外，其余表现较为稳定；高家沟区域的东西形变主要分布在南部，且西向形变大于东西形变，这可能是由于东西蠕移力矩在对冲下西向形变占据主导地位。东北部的东西向形变结果更为明显，因为其处于最后完成施工区，且没有上覆建筑物等，形变更符合沿山谷左右分布特征。



(a) 垂直形变速率分布　　(b) 东西向形变速率分布

图 8　垂直向和东西向形变速率分布

Fig. 8　Distribution of Vertical Reformation and East-West Deformation Velocity Rate

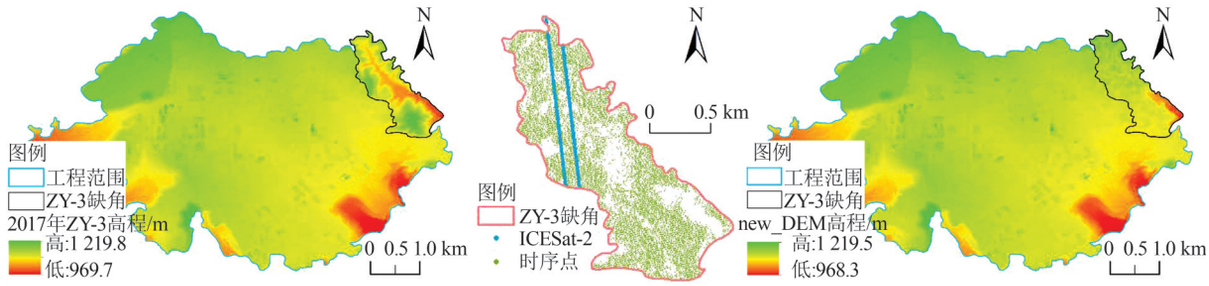
4　讨　论

4.1　DEM 校正与地形变化分析

如前文所提，新区的岩土工程于 2018 年 8 月全部完成，本文 ZY-3 号辅助获取的 DEM 数据为 2017 年，为整体开展三大填方沉降区的研究，需要对最晚竣工的东北部区域进行局部的 DEM 修正。

4.1.1　ZY-3 DEM 局部修正

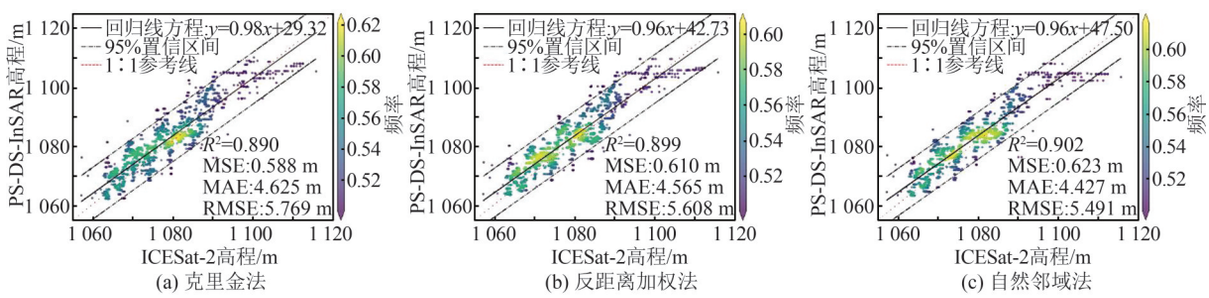
考虑到 PS-DS-InSAR 可获取单点经纬度坐标、大地水准高和椭球高等，利用克里金、自然邻域、反距离加权 3 种方法对 DEM 数据插值得到延安新区东北区的高程数据。图 9(a)、9(c)分别是 DEM 校正前后结果，图 9(b)为缺角的东北部和 ICESat-2 数据分布。图 10 为 3 种插值方法结果与 ICESat-2 的交叉验证结果。可以看出，3 种方法与 ICESat-2 数据一致性较高，可证明结果的准确性。考虑到点密度不高区所引起的插值不正确情况，如自然邻域法会在高程突变且缺乏连续点的地方出现构建错误的三角形，反距离加权法容易出现过平滑，因此，本文选取克里金法结果进行后续地形变化分析（图 10(a)）。



(a) 2017年ZY-3 DEM (b) 延安新区东北部ICESat-2数据分布 (c) 局部修正后的DEM

图9 ZY-3 DEM改正

Fig. 9 ZY-3 DEM Correction



(a) 克里金法 (b) 反距离加权法 (c) 自然邻域法

图10 3种DEM插值方法与ICESat-2验证结果

Fig. 10 Validation Results of Three DEM Interpolation Methods and ICESat-2

4.1.2 地形变化分析

回填黄土为重构土壤,颗粒须重新排列达到稳定结构,重排过程需要很长时间,短时间黄土性质存在不稳定性。黄土本身压缩与湿陷的度量会随着厚度的增加而放大,所以填土厚度和填土分布直接影响了地面沉降的大小和分布[22]。根据§4.1.1结果,将其与2000年SRTM DEM数据作差,结果如图11所示,其中正值代表填土厚度,负值代表挖方厚度。可以看到,上文三大沉降区对应着图11中的三大填方区,全域填挖分布与工前山脊、山谷分布一致,最大填土厚度达110 m,平均填土厚度为40~60 m。图12为图11中AA'、BB'剖线统计,横剖AA'表现为挖填区连续切换,最大填土厚度达90 m,纵剖BB'平均填土厚度为45~75 m,最大挖方处达112 m。挖填工程后新区地形平坦,整体坡度为1%~3%。

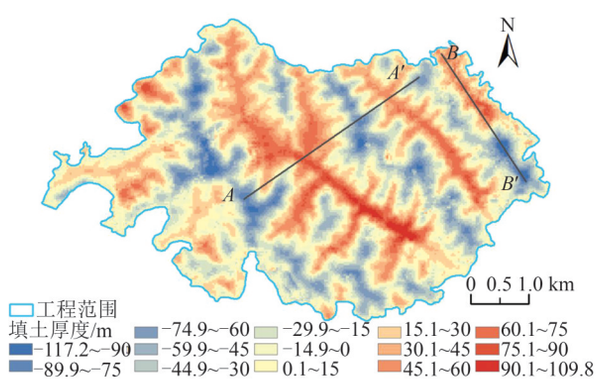


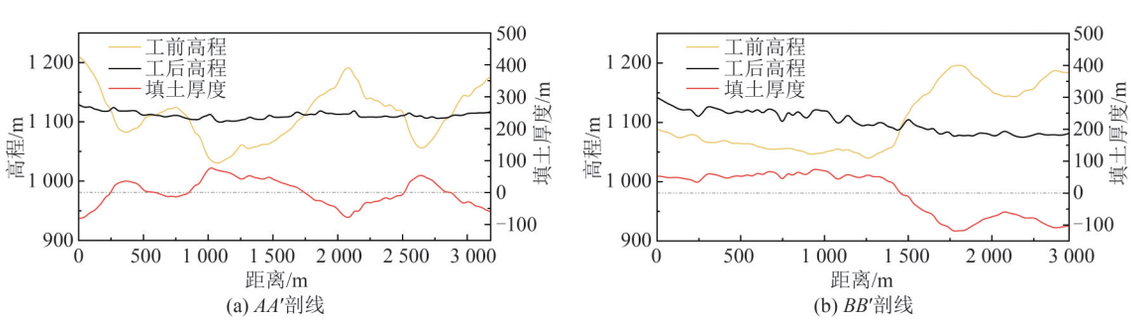
图11 延安新区地形变化结果

Fig. 11 Results of Terrain Changes in Yan'an New District

4.2 形变二维分解

4.2.1 垂直向形变分析

结合填土厚度对三大线性沉降区的代表区

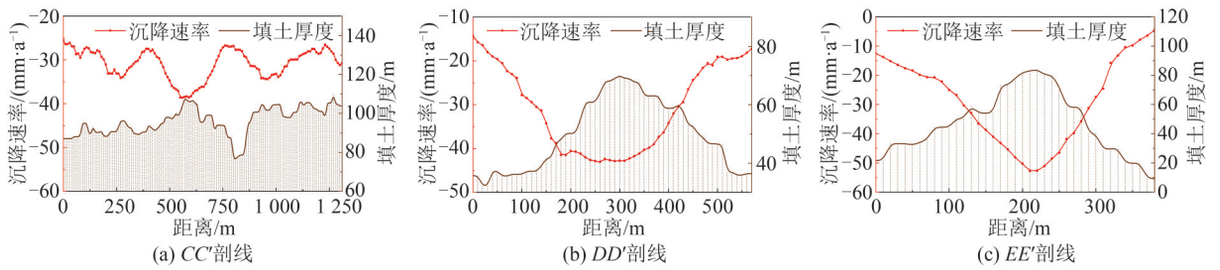


(a) AA'剖线 (b) BB'剖线

图12 填土厚度剖面结果

Fig. 12 Thickness Profile Results of Fill Soil

域绘制横纵剖线(图 8(a)),其中 CC' 剖线(图 13(a))位于桥儿沟,沉降速率与填土厚度在值上成正相关,最大填土厚度达 109 m,对应着最大沉降速率 40 mm/a。图 13(b)、13(c)分别为高家沟与东北部的横向剖线 DD'、EE',这两处呈现出U形速率分布了填土的厚度,并且当填土厚度达到 30 m 以上时,沉降与厚度的关系更加明显。



(a) CC'剖线　(b) DD'剖线　(c) EE'剖线

图 13　垂直形变特征区域剖线

Fig. 13　Sectional Line of Vertical Deformation Feature Region

为了从面上验证二者的关系,且考虑到建筑物分布与固结时间,将高家沟(第二沉降区)整个区域的沉降形变速率与填土厚度进行统计,可得到基于面状的厚度与形变速率的关系如图 14 所示。可以看出,随着填土厚度的增加,沉降速率也会增加,根据填土厚度统计与沉降速率回归线说明这两种趋势具有很好的一致性。因此,填土厚度是沉降尺度的直接影响因素,厚度与压缩变形量成正比,强夯压实过程未能完全消除黄土的湿陷变形,而湿陷的尺度又会随着厚度的增加而增加[33]。

4.2.2　东西向形变分析

在东西向形变速率结果中,除了西侧数个量级较大处外,三大沉降区中东北部(第三沉降区)的形变尺度与特征最为明显。因此,将新区东北部绘制剖线,如图 15(a)所示,其中 FF' 剖线最大东、西向形变速率分别为 14.1 mm/a 和 14.7 mm/a,西向形变速率略大且更靠近山谷中心,由对应工前地形可以看出,右侧山谷要更陡峭,从而引起西向的挤压蠕移力矩更大;GG' 剖线最大东、西向形变分别为 14.3 mm/a、14.5 mm/a,从工前地形看出此处地形大致成对称分布,所以 GG' 剖线的东西速率除右侧末端陡峭处外,整体分布近似对称。

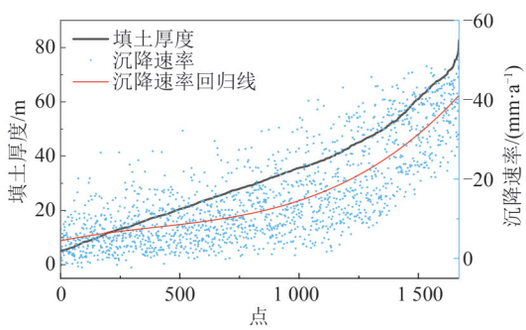
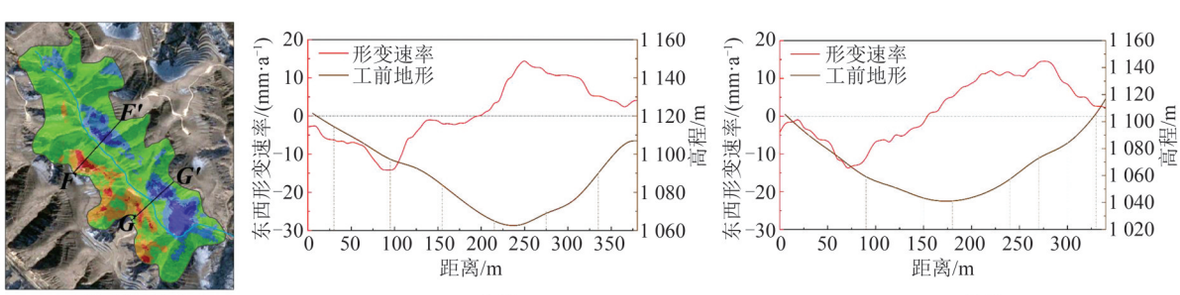


图 14　第二沉降区填土厚度与沉降速率统计

Fig. 14　Statistics on Soil Fill Thickness and Settlement Rate in the Second Depression Area



(a) 第三沉降区　(b) FF'剖线　(c) GG'剖线

图 15　第三沉降区与对应剖线

Fig. 15　The Third Depression Area and Its Corresponding Profile Lines

文献[18]采用有限差分法模拟了河谷地区填土的压实过程,揭示了沟谷填方二维变形特征。为了解释这种形变特征,图 16 绘制了二维形变机理图(未按实际比例),两种沟谷形态下,原状斜坡所承担的支持力和摩擦力存在差异,填土在自重以及其他如降雨、建筑荷载等因素影响下沿着坡面向谷底压实。这种沿坡面形变的位移矢量可以分解为垂直方向的大尺度沉降和水平方向的小尺度蠕移。在靠近沉降中心位置,水平位移力矩在对冲下相互抵消,形成只有垂直位移

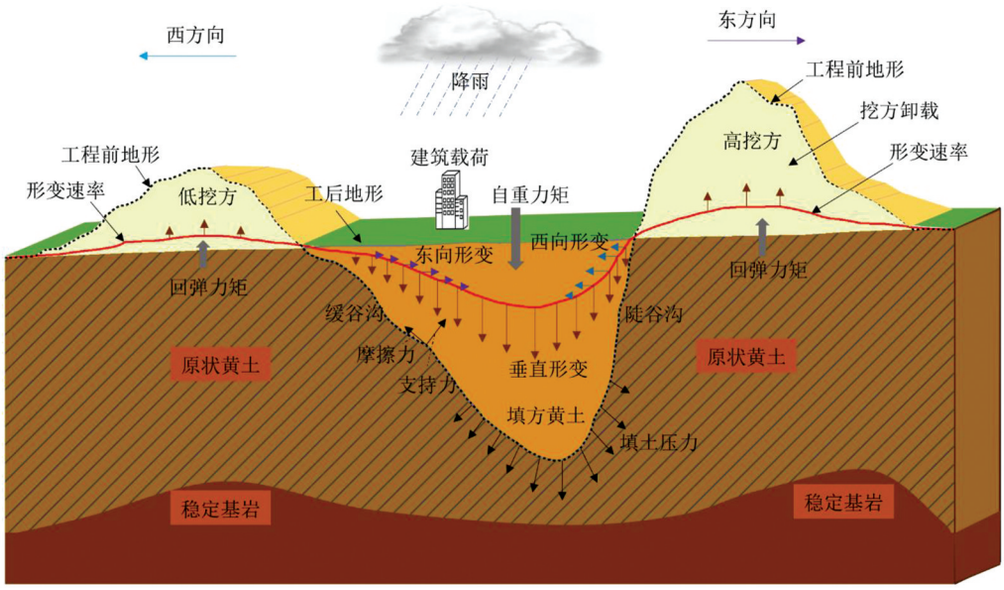


图16 不同形态沟谷的垂直、水平形变机理

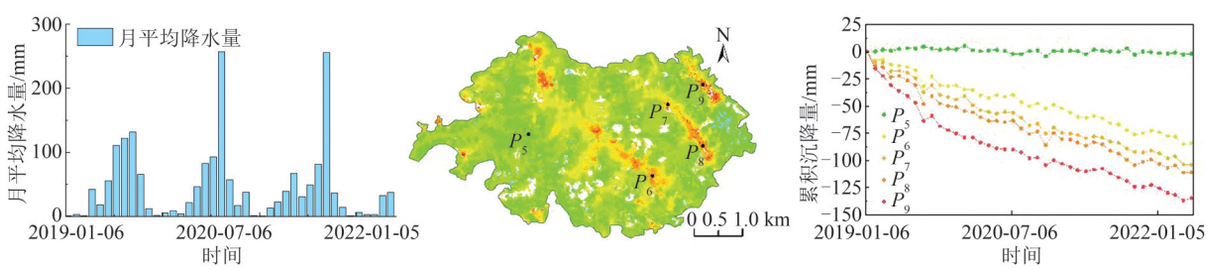
Fig. 16 Vertical and Horizontal Deformation Mechanisms of Different Shaped Valleys

的趋势,于是在边缘出现了如图15的东西向形变速率由小到大再由大到小的趋势。

4.2.3 形变与降水周期性分析

延安新区的地理位置属于大陆性季风气候,全年降水主要集中在6月—9月,新区研究时间段降水量逐月统计如图17(a)所示。考虑到桥儿沟施工完成较早,其下排水设施完善,此处的降水对沉降的影响可能不明显,因此选取特征点如图17(b)所示。

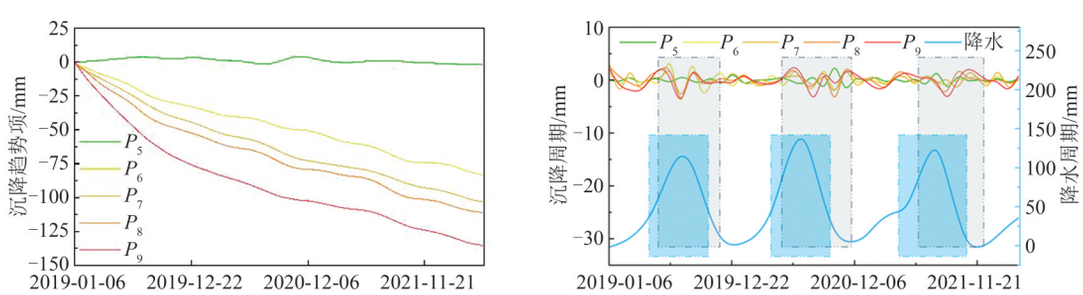
利用VMD对时序沉降和降水数据做进一步处理,探究两者在周期波动中的关系。首先将沉降点时序观测数据采样到与降水一致的获取时间,如图17(c)所示,利用VMD分解得到时序沉降的趋势项和周期项如图18所示。



(a) 降水统计 (b) 特征选点 (c) 特征点数据统计

图17 降水与点位数据

Fig. 17 Precipitation and Points Data



(a) VMD分解得到时序沉降趋势项 (b) VMD分解得到沉降与降水周期波动关系

图18 VMD分解结果及沉降与降水的周期波动关系

Fig. 18 VMD Decomposition Results and the Periodic Relationship Between Subsidence and Precipitation

图18(a)中,P_5为较稳定区域,形变结果表现比较稳定;P_6~P_8为较早完成填土工程区域,沉降趋势具有线性特征;P_9位于东北区,由于工程竣工时间较短,地基仍处于固结初期阶段,沉降表

现出由加速向平稳过渡的趋势，这一点符合文献[7]所提到的主固结与次固结阶段性变化。图 18(b)为沉降量与降水周期，降水在 3 年中呈现出 3 大主波峰，如图中蓝色框所示；同时也探测到时序沉降量也存在 3 个主要的波动区，如图中灰色框所示。可以看出，延安新区地面沉降受到每年 6 月—9 月集中降水的影响，并且这种影响具有时间上的滞后性，表现为 1～3 个月不等。其中位于东北区形变加速阶段的 P_9 点表现更为明显。在城建和地下排水设施完善的沉降区（P_5、P_6），这种降水引起的波动较弱。

图 17(a)中 2020 年、2021 年的最大降雨 255 mm、257 mm 明显大于 2019 年的 131 mm，理论上沉降的波动也会在 2020 年、2021 年更为剧烈，但是图 18(b)中 P_9 点沉降量的 3 个主要波动区间分别为 －6.2～3.3 mm、－5.6～3.2 mm、－4.7～2.6 mm。沉降波动区间存在减小的趋势，这是由于土体在固结过程中颗粒逐渐重排趋于稳定，使沉降速度与幅度逐步减缓，最终达到稳定固结状态。随着岩土体逐步固结趋稳，其对降雨的响应也将逐渐减弱。同时可以看出，宏观上强降雨会显著增加黄土自重，从而加速沉降过程；在微观层面，雨水削弱颗粒间的胶结力与黏聚性，降低了颗粒间的摩擦，促使土体在自重作用下重新排列，进而引发湿陷性沉降[34]。因此，周期性强降雨会对地面沉降产生显著的周期波动影响。

5　结　语

延安新区削山造城创造了大范围平坦区域，是中国最大的岩土工程之一，工程后引发的地表沉降问题受到了广泛关注。本文利用双轨道 Sentinel-1A 数据得到了延安新区岩土工程后 2019-01—2022-06 时间段的地表时序形变结果，并结合多种数据对形变范围和特征进一步分析，得出如下结论：

1）利用 PS-DS-InSAR 方法相比传统的 PS-InSAR 方法在点数量由 59 785 个提高到 119 877 个，覆盖率由 42.48% 提高至 85.18%，可以在保证观测精度下获取更多形变结果。延安新区工后形变呈现三大主要线性沉降区与数个漏斗沉降区，LOS 向主要形变速率为 －30～8 mm/a。

2）利用双轨道数据解算垂直和东西向形变，其中垂直形变分布与 LOS 向一致，平均形变速率为 －40～10 mm/a，最大沉降速率为 65.3 mm/a，位于延安新区东北部。形变量级与填土厚度分布一致，说明填土厚度是沉降形变最直接的影响因素。东西向形变主要分布于原状沟谷两侧，与工前地形有直接关系，说明黄土自身压实的同时又沿着原状坡面向着沟谷中心发生位移形变。

3）利用 VMD 将时序形变量和降水数据分解得到两者的趋势项和周期项。延安新区每年 6 月—9 月的集中降水降低岩土颗粒粘性，促使颗粒重新排列对沉降有一定的影响，并且这种影响存在 1～3 个月的滞后，其中岩土工程最后竣工的东北部受降雨影响更为明显。

参　考　文　献

[1] 徐张建，林在贯，张茂省．中国黄土与黄土滑坡[J]．岩石力学与工程学报，2007，26(7)：1297-1312.
XU Zhangjian，LIN Zaiguan，ZHANG Maosheng. Loess in China and Loess Landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*，2007，26(7)：1297-1312.

[2] 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.

[3] LI P Y，QIAN H，WU J H. Environment：Accelerate Research on Land Creation[J]. *Nature*，2014，510(7503)：29-31.

[4] 张茂省，谭新平，董英，等．黄土高原平山造地工程环境效应浅析：以延安新区为例[J]．地质论评，2019，65(6)：1409-1421.
ZHANG Maosheng，TAN Xinping，DONG Ying，et al. Initial Analysis on Environmental Effect of Cutting Hills to Backfill Ditch Project on Loess Plateau—Take Yan'an New District as an Example[J]. *Geological Review*，2019，65(6)：1409-1421.

[5] 陈海军．兰州新区湿陷性黄土地基处理[J]．西安科技大学学报，2014，34(2)：204-209.
CHEN Haijun. Loess Foundation Treatment for Lanzhou New District[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*，2014，34(2)：204-209.

[6] 朱才辉，李宁，刘明振，等．吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]．岩土工程学报，2013，35(2)：293-301.
ZHU Caihui，LI Ning，LIU Mingzhen，et al. Spatiotemporal Laws of Post-Construction Settlement of Loess-Filled Foundation of Lüliang Airport[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*，2013，35(2)：293-301.

[7] 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.
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.

[8] 王衍汇, 倪万魁, 石博溢, 等. 延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 52-56.
WANG Yanhui, NI Wankui, SHI Boyi, et al. Stability Analysis of High-Filled Loess Slope in Yan'an New District[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12(5): 52-56.

[9] 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.
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.

[10] 杨梦诗, 廖明生, 常玲, 等. 城市场景时序InSAR形变解译: 问题分析与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1643-1660.
YANG Mengshi, LIAO Mingsheng, CHANG Ling, et al. Interpretation of Multi-Epoch InSAR Deformation for Urban Scenes: A Problem Analysis and Literature Review[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1643-1660.

[11] 刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1753-1762.
LIU Bin, ZHANG Li, GE Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1753-1762.

[12] 李永生, 李强, 焦其松, 等. 陆地探测一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application of Lutan-1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[13] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212.

[14] 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.

[15] 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.
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.

[16] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470.

[17] ZHANG Z J, Tang Y X, ZHANG H, et al. Subsidence Monitoring in Coal Area Using Time-Series InSAR Combining Persistent Scatterers and Distributed Scatterers[C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014.

[18] LI G R, ZHAO C Y, LI B, et al. Stepwise Estimation of Height Change Time Series and Two-Dimensional Surface Deformation over Mountain Excavation and City Construction Region with TS-InSAR Technique[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103982.

[19] 闫开云, 李江, 许强, 等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征——以垮梁子滑坡为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/J.whugis20230118.
YAN Kaiyun, LI Jiang, XU Qiang, et al. Accurate Interpretation of Four-Dimensional Characteristics of Red-Bed Rock Landslide by Comprehensive Remote Sensing — Taking Kualiangzi Landslide as an Example[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/J.whugis20230118.

[20] 刘博榕. 延安新区高填方沉降监测与预测研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
LIU Borong. Study on Monitoring and Prediction of High Fill Settlement in Yan'an New District[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.

[21] 张雪琪, 朱武, 李文梁, 等. 时序InSAR技术用于延安新区高填方地面沉降监测[C]//第十一届全国工程地质大会, 武汉, 2020.
ZHANG Xueqi, ZHU Wu, LI Wenliang, et al.

Monitoring the Ground Subsidence over Yan'an Hingh-Filled Region by Using Time Series InSAR Technique[C]// The 11th National Conference on Engineering Geology, Wuhan, China, 2020.

[22] 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.
PU Chuanhao, XU Qiang, JIANG Ya'nan, 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.

[23] 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.
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.

[24] ZHOU C D, LAN H X, BÜRGMANN R, et al. Application of an Improved Multi-Temporal InSAR Method and Forward Geophysical Model to Document Subsidence and Rebound of the Chinese Loess Plateau Following Land Reclamation in the Yan'an New District[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113102.

[25] PU C H, XU Q, WANG X C, et al. Vegetation Response to Large-Scale Mountain Excavation and City Construction Projects on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 174256.

[26] 孔洋，阮怀宁，黄雪峰. 黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法[J]. 岩土工程学报，2018，40(S1)：218-223.
KONG Yang, RUAN Huaining, HUANG Xuefeng. Method for Calculating Foundation Settlement of Compacted Backfill in Hilly and Gully Regions of Loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(S1): 218-223.

[27] HU X, XUE L, YU Y T, et al. Remote Sensing Characterization of Mountain Excavation and City Construction in Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): e2021GL095230.

[28] 孟鸽，赵旦，许聪，等. 联合ICESat-2和GEDI星载激光雷达数据的森林地上生物量估算[J]. 遥感学报，2024，28(6)：1632-1647.
MENG Ge, ZHAO Dan, XU Cong, et al. Forest Aboveground Biomass Estimation Combining ICESat-2 and GEDI Spaceborne LiDAR Data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(6): 1632-1647.

[29] PENG Shouzhang. 1 km Monthly Precipitation Dataset for China (1901—2023)[EB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2, 2024.
彭守璋. 中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2023年)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心，https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2, 2024.

[30] MA P F, JIANG X C. Mapping Vertical and Horizonal Deformation of the Newly Reclaimed Third Runway at Hong Kong International Airport with PAZ, COSMO-SkyMed, and Sentinel-1 SAR Images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 132: 104030.

[31] 唐贵基，王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报，2015，49(5)：73-81.
TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter Optimized Variational Mode Decomposition Method with Application to Incipient Fault Diagnosis of Rolling Bearing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 73-81.

[32] 刘国祥. InSAR基本原理[J]. 四川测绘，2004，27(4)：187-190.
LIU Guoxiang. Basic Principles of Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Surveying and Mapping of Sichuan*, 2004, 27(4): 187-190.

[33] WU S B, YANG Z F, DING X L, et al. Two Decades of Settlement of Hong Kong International Airport Measured with Multi-Temporal InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111976.

[34] 刘彪，王彦兵，李小娟，等. 基于InSAR的北京平原区地面沉降与地下水位演化关联特征迭代奇异谱分析[J]. 地理与地理信息科学，2024，40(4)：21-27.
LIU Biao, WANG Yanbing, LI Xiaojuan, et al. Iterative Singular Spectral Analysis of the Correlation Between Land Subsidence and Groundwater Level Evolution in Beijing Plain Based on InSAR[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(4): 21-27.