



# 利用小基线集 InSAR 技术的延安新区地面 抬升监测与分析

蒲川豪<sup>1</sup> 许强<sup>1</sup> 赵宽耀<sup>1</sup> 蒋亚楠<sup>1</sup> 刘佳良<sup>1</sup> 寇平浪<sup>1</sup>

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:**延安新区的平山造城是黄土高原地区规模最大的造地工程之一,大规模的山体开挖导致了广泛的地面抬升现象。同时,挖方区作为新区城市化建设的主要场地,地面抬升严重影响了新区城市的持续发展。利用小基线集成孔径雷达干涉测量(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术对覆盖新区2016-05—2019-10期间的升轨 Sentinel-1A 数据进行处理,获取了新区工后长期地面形变信息,揭示了地面抬升空间分布规律及其形变演化特征,并对地面抬升成因进行了详细分析。结果表明,新区工后地面抬升显著,主要分布在对人类工程活动影响最大的挖方区,最大抬升速率达24.8 mm/a;地面抬升变形在工后初期发展较快,随时间发展有趋缓并稳定的趋势。山体快速开挖引起的卸荷回弹变形是地面抬升的主要内在因素,而地面抬升的分布及大小是由挖方工程范围、挖方厚度、建筑荷载等外在因素综合作用的结果。

**关键词:**延安新区;平山造城;SBAS-InSAR;地面抬升;形变监测

**中图分类号:** P237

**文献标志码:** A

黄土高原是中华文明重要的发源地,是黄河流域的重要组成部分,同时也是生态环境脆弱、土地资源严重短缺及地质灾害最为频繁的地区之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着“一带一路”倡议和城镇化建设步伐的加快,城市发展空间不足的问题愈加突出,严重制约了黄土高原城市化建设和经济社会发展<sup>[2-3]</sup>。因此,为了缓解黄土丘陵沟壑地区土地资源短缺的问题,平山造城、治沟造地等一系列黄土重大工程正在加快实施,如建设延安新区<sup>[3]</sup>、兰州新区<sup>[4]</sup>等。一方面,平山造城工程为城市发展提供了大量的建设用地,有效减小了城市发展空间严重不足的问题;另一方面,大规模的削山造地显著改变了原有的地形地貌、工程地质和水文地质条件,打破了长期的地质平衡环境,同时又具有高填方、深开挖、建设环境复杂等特点<sup>[5]</sup>,使得新区工后地面沉降和抬升现象广泛分布<sup>[6]</sup>。地面抬升特别是局部的差异抬升会在地表浅表部土层产生拉应力,降低土体的强度和变形特性<sup>[7]</sup>,严重时还可能造成建筑物地基隆起、基础和墙体开裂等次生灾害。此外,由于工程早期人

们对深开挖引起的地面抬升变形认识不足,使得延安新区的城市规划建设主要分布在挖方区,工后地面抬升将直接影响分布其上的建筑和道路等工程的建设与安全。因此,研究延安新区地面抬升的空间分布及其影响因素对于新区的长期稳定、规划和持续发展具有重要的现实意义。

地表形变监测可以为揭示城市地表变形的时空动态演化规律以及灾变防控提供重要的数据支撑。传统的地表形变监测如水准测量、GPS等虽然具有较高的精度<sup>[8]</sup>,但是由于新区建设条件复杂、挖填方体厚度起伏较大,基于单点的高精度地表形变监测受高成本和低空间分辨率的限制,难以全面反映区域性的形变情况。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)是一种新近发展的空间对地观测技术,具有全天时、全天候、空间分辨率高、监测范围广、监测精度高等特点<sup>[9-10]</sup>,近年来已广泛应用于城市地表形变监测<sup>[11]</sup>、地震形变监测<sup>[12]</sup>、滑坡隐患早期识别和长期监测<sup>[13]</sup>等领域,并逐渐

收稿日期: 2020-06-23

项目资助: 国家自然科学基金(41790445, 41630640); 国家创新研究群体科学基金(41521002)。

第一作者: 蒲川豪, 博士生, 主要从事地质灾害评价与预测研究。2529456063@qq.com

通讯作者: 许强, 博士, 教授。xq@cdu.edu.cn

成为重要的技术手段<sup>[14-16]</sup>。基于多个主影像的小基线集成孔径雷达干涉测量技术(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)有效克服了传统雷达差分干涉测量技术(differential InSAR, D-InSAR)由于基线过长导致的时空失相干<sup>[17]</sup>,同时减缓了数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差和大气延迟相位<sup>[18]</sup>的影响,提高了形变监测的精度和时间分辨率<sup>[19]</sup>。大量国内外相关研究结果证实了SBAS-InSAR技术在城市地表覆盖变化以及植被覆盖区的地表形变监测方面具有较好的适用性和可靠性<sup>[4, 6]</sup>。

目前,针对延安新区工后地表形变的研究主要集中于地面沉降,例如湿陷沉降机理<sup>[20]</sup>、沉降变形规律及预测<sup>[21]</sup>、区域沉降变形监测<sup>[6]</sup>等。然而,对于延安新区的挖方区,前人研究相对较少,尤其是对于挖方区的地面抬升还未有学者进行过深入、系统的研究,对于抬升现象、抬升规律以及影响因素的认识还不够深刻。此外,挖方区作为延安新区城市化发展的主要建设场地,地面抬升严重影响了新区城市的基础建设和持续发展。基于此,本文利用SBAS-InSAR技术对覆盖新区的2016-05—2019-10期间的53景升轨 Sentinel-1A数据集进行处理,获取新区工后长期地面形变信息,并侧重对地面抬升空间分布规律及其影响因素进行详细分析,以期对新区城市规划建设和

持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

延安市位于陕西省北部,地处黄土高原中南部腹地,属典型的黄土丘陵沟壑地貌,如图1所示。延安老城区呈近似“Y”字形的空间展布特征(图2),为典型的“线”型城市,不到40 km<sup>2</sup>的狭长城区承载了近50万人口。随着城镇化进程的加快,土地资源短缺问题进一步加剧,严重制约了延安城市的持续发展。因此,延安市实施了“中疏外扩、上山建城”的发展策略,通过削山、填沟、造地、建城,计划建设一个面积为老城区两倍的延安新区<sup>[22]</sup>。

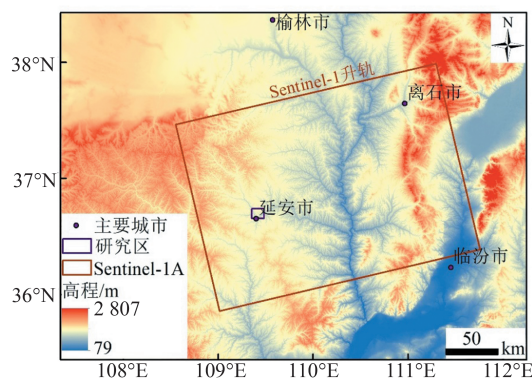
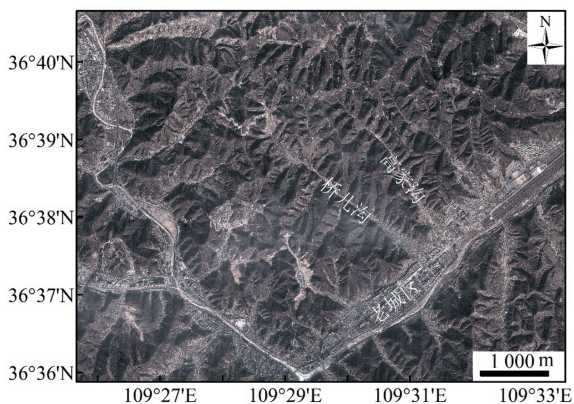
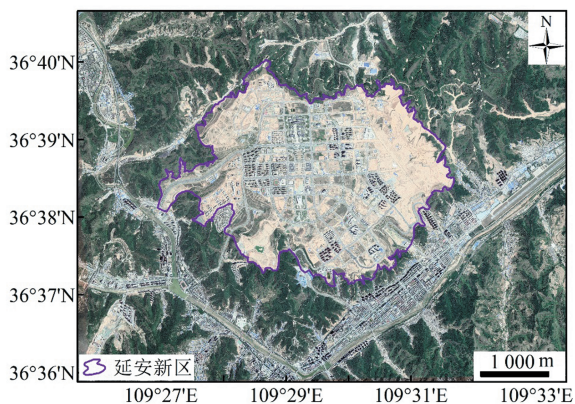


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the Study Area



(a) 2012年1月遥感影像



(b) 2018年6月遥感影像

图2 延安新区 Google Earth 影像

Fig.2 Google Earth Images of Yan'an New District

延安新区(北区)岩土工程于2012年4月开始施工建设,至2018年8月全面完工,总造地面积约22.3 km<sup>2</sup>,最大挖方厚度为118 m,最大填方厚度达112 m<sup>[23]</sup>。新区工程建设之前地形以梁、峁为主,地形较为破碎,大小冲沟发育,地势起伏较大,相对高差介于100~150 m(图2(a))。工程建设之后,新区地形相对平坦,总体呈西北高、东

南低的趋势,整体坡度为1%~3%,建筑工程主要分布在沟谷两侧的挖方区(图2(b))。新区出露地层主要为第四系黄土和侏罗系砂泥岩,与工程建设有关的地层主要为离石黄土和马兰黄土,其分布复杂且具有特殊的结构和工程特性。根据地下水赋存条件,新区原有地下水类型可分为第四系孔隙水和侏罗系基岩裂隙水两类,主要以



大气降雨为补给来源,以泉水和蒸发方式排泄<sup>[24]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区 SAR 数据

由于工程早期建设强度较大,地表覆盖变化显著,为了减缓高强度工程建设引起的失相干并获取新区平山造城工后长期地表形变监测结果,选取欧洲航天局研制的 Sentinel-1A 卫星于 2016-05-16—2019-10-16 期间采集的覆盖延安新区的 53 景 SAR 数据对其地表形变特征进行探测。其中,SAR 数据所处波段为 C 波段(5.6 cm),轨道方向为升轨,入射角为 39°,空间分辨率为 5 m×20 m,极化方式为 VV。

此外,选取 Sentinel-1A 卫星的精密轨道数据用以校正 SAR 数据的轨道误差,采用覆盖新区的 30 m 分辨率的 SRTM DEM 作为外部参考 DEM 数据,用以估计和去除地形相位,同时作为新区平山造城工程前的原始地形数据,用以量化分析地面抬升的影响因素。选取 2017 年资源三号卫星立体像对提取的 5 m 分辨率的 DEM 数据作为工后地形数据进行形变结果的分析。

### 2.2 SBAS-InSAR 技术

根据影像组合方式、散射体目标类型和参数估计策略的差异,可以将目前常用的时序 InSAR 分析方法分为永久散射体技术(persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线集技术(SBAS-InSAR)以及混合时序 InSAR 分析方法三大类<sup>[9]</sup>。SBAS-InSAR 是一种依据多主影像的时序 InSAR 分析方法,利用较短时空基线的干涉对来反演地表形变信息<sup>[25]</sup>。在植被覆盖地区和地表覆盖变化区,SBAS-InSAR 技术减少了失相干和 DEM 误差的不利影响<sup>[9]</sup>,具有较好的适用性和可靠性<sup>[4]</sup>,因此本文利用 SBAS-InSAR 技术对延安新区的地面形变进行探测。

首先,设置合适的时空基线阈值生成差分干涉图,利用轨道数据和外部 DEM 数据去除平地 and 地形效应<sup>[26]</sup>。然后,采用最小费用流(minimum cost flow, MCF)方法进行相位解缠,则第  $j$  幅干涉图中任意像素点处对应的解缠相位可以表示为:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_j &= \varphi(t_B) - \varphi(t_A) \approx \\ &\delta\varphi_j^{\text{def}} + \delta\varphi_j^{\text{topo}} + \delta\varphi_j^{\text{atm}} + \delta\varphi_j^{\text{noise}} \end{aligned}$$

式中, $\delta\varphi_j$  为该点处的干涉相位; $\varphi(t_A)$  和  $\varphi(t_B)$  分

别为  $t_A$ 、 $t_B$  时刻相对于初始时刻  $t_0$  的相位值; $\delta\varphi_j^{\text{def}}$ 、 $\delta\varphi_j^{\text{topo}}$ 、 $\delta\varphi_j^{\text{atm}}$ 、 $\delta\varphi_j^{\text{noise}}$  分别表示由视线向形变、地形误差、大气延迟、噪声所引起的相位差。

为了提高形变监测结果的精度和可靠性,需对这些误差项进行有效的估计和去除。通过构建高程误差和基线之间的线性关系模型,利用最小二乘法估算地形误差相位<sup>[27]</sup>;根据非线性形变、大气延迟及噪声在空间域和时间域所表现出的差异特性,通过时空滤波分离出大气延迟相位;利用多视和滤波来提高干涉图的信噪比。将上述误差相位分量去除后,通过奇异值分解法得到视线方向上的时间序列形变信息。

## 3 地面抬升结果与分析

### 3.1 地面抬升空间分布

利用 SBAS-InSAR 方法对覆盖延安新区的 Sentinel-1A 雷达数据进行分析,得到新区 2016-05—2019-10 期间雷达视线方向(line of sight, LOS)的平均形变速率,根据雷达波入射角关系,将 LOS 方向形变转换至垂直方向(图 3),形变参考点位于延安老城区中心稳定区域。图 3 中,形变速率负值表示地表位移沿着远离卫星方向(即地面沉降),正值表示地表位移朝着卫星方向(即地面抬升)。考虑到缺少高精度地表监测数据,本文主要根据各个观测点的形变速率标准差以及对比前人研究结果来评估形变监测结果的精度。延安新区和老城区形变速率标准差范围分别为 0~2.5 mm/a 和 0~1.5 mm/a,同时本文所监测的地表形变与前人监测结果<sup>[6]</sup>在空间分布及量级上基本一致,证实了形变结果的可靠性。

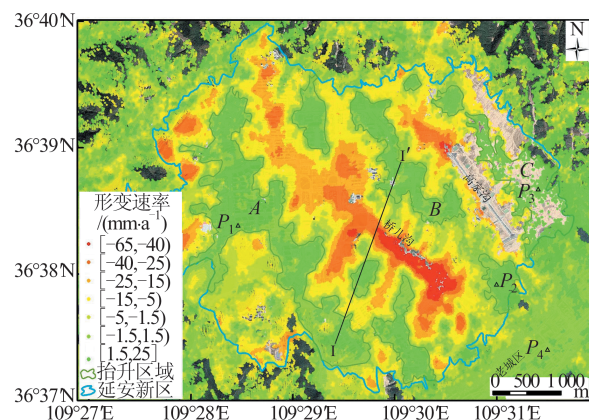


图 3 延安新区地表年平均形变速率图

Fig.3 Annual Mean Surface Deformation Velocity of Yan'an New District

由图3可以看出,延安老城区在整个监测期间内基本保持稳定状态,年平均形变速率主要在 $-1.5\sim 1.5\text{ mm/a}$ 范围内波动。延安新区地表形变显著,且与平山造城工程建设有较大关系。一方面,新区桥儿沟和高家沟沟谷填方区主要表现为不均匀的地面沉降变形,沉降速率范围分别为 $15\sim 60\text{ mm/a}$ 和 $10\sim 40\text{ mm/a}$ ,最大沉降变形位于桥儿沟下游沟谷中心,沉降速率达 $64.1\text{ mm/a}$ 。另一方面,山体挖方工程所在区域出现了广泛的地面抬升现象,地面抬升沿挖方区呈北西-南东向的带状展布,最大地面抬升变形位于高家沟东部挖方区(区域C),抬升速率达 $24.8\text{ mm/a}$ 。根据原始沟谷以及地面抬升空间展布特征,将新区地面抬升划分为A、B、C 3个重点区域,其中区域A位于桥儿沟西侧挖方区,主要的抬升速率范围为 $1.5\sim 5\text{ mm/a}$ ;区域B位于桥儿沟和高家沟中部挖方区,主要的抬升速率范围为 $2\sim 6\text{ mm/a}$ ;区域C位于高家沟的东侧挖方区,由于此区域在2018年6月之前一直处于持续的高强度工程建设(挖方工程、场地平整等),因此造成大量的失相干,主要的抬升速率范围为 $4\sim 10\text{ mm/a}$ 。

对于高填方地面沉降,已有大量学者对其进行了较为全面、系统的研究<sup>[6, 20-22]</sup>,但对于挖方区的地面抬升规律认识还不足,因此后文主要针对地面抬升形变演化特征及其影响因素进行详细分析。

### 3.2 地面抬升时序分析

为分析3个重点地面抬升区的抬升变形随时间变化的规律,分别提取3个抬升区以及延安老城稳定参考区域内典型特征点( $P_1\sim P_4$ )的时序形变信息,具体位置见图3,形变时序结果如图4所示。其中,形变时序结果均以2016-05-16为形变参考起始时间进行地表形变累计。分析图4中的时间序列形变趋势可以看出,3个重点抬升区域均表现为有起伏的持续抬升变形特征,稳定参考区处于基本稳定状态,累计形变在 $3\text{ mm}$ 范围内波动。其中,区域C的地面抬升最为严重,在2016—2019年间,累计抬升量达到 $87\text{ mm}$ ,年平均抬升速率约为 $22.1\text{ mm/a}$ 。由于区域C在2018年3月之前处于频繁的工程建设中,因此在该时间段内时序形变波动较为强烈。2018年3月之后,场地平整工程基本完工,地表形变也逐渐趋于正常的抬升变形,主要表现为施工刚结束时抬升变形发展较快,随时间发展抬升变形有趋缓并稳定的趋势。区域A和区域B的时序形变趋势

相似,初期地面抬升变形速率较大,在2016-05—2016-09期间累计抬升量分别达到 $14\text{ mm}$ 和 $17\text{ mm}$ 。随时间发展,抬升速率逐渐减小,抬升变形逐渐趋于稳定,在2016-09—2019-10期间累计抬升量分别为 $20\text{ mm}$ 和 $24\text{ mm}$ 。

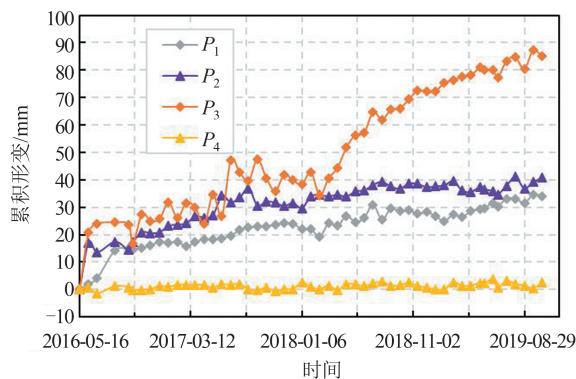


图4 典型特征点累计形变时间序列

Fig.4 Accumulative Deformation Time Series of Typical Characteristic Points

## 4 地面抬升成因分析

### 4.1 地面抬升内在机制

地面抬升成因复杂,地基开挖卸荷、地下水位回升均可能引起地面回弹变形。新区平山造城工程设置了一系列防排水措施,工后地下水位监测结果表明,新区未出现大规模的水位抬升<sup>[24]</sup>,因此新区地表形变的主要原因并非地下水上升造成。通过分析新区地面抬升与平山造城工程建设的相关性可以推断,山体开挖卸荷是新区地面抬升的主要内在因素。

沿图3选取一条横沟谷走向方向的典型剖面( $I-I'$ ),提取原始地形、工后地形信息以及工后地表形变速率,得到沿该剖线的挖填方工程示意图和形变速率展布特征,结果如图5所示。图5(a)表示平山造城岩土工程中的削山、填沟、造地示意图,通过将原始黄土丘陵山体开挖、重塑并回填至沟壑地区,压实平整形成一个相对平坦的城市建设用地。在工程施工之前,开挖面处于应力平衡状态(即上部自重应力 $p$ =下部支撑应力 $q$ ),山体开挖是一个竖向卸荷过程,上部土体的自重应力 $p$ 迅速减小至0,而下部原状黄土为弹塑性体,在长期上部土体自重荷载的作用下,积聚了部分弹性应变能<sup>[28]</sup>,开挖卸荷后,在开挖面以下一定深度范围内的应力场将重新调整,以适应新的平衡状态,从而形成一定值的回弹应力。

图5(b)表示沿 $I-I'$ 剖面提取的地表年平均形变速率。结合图5(a)和图5(b)可以看出,新区



地表形变与削山造地工程有较强的空间分布相关性,挖方区主要表现为地面抬升现象,而填方区则表现为地面沉降。同时,地表形变的强弱与挖方或填方工程的强度紧密相关,当挖方或者填方厚度较大时,对应的抬升或者沉降速率也越大,在填方区表现更为显著。填方区黄土由挖方区原状黄土重塑、压实形成,处于欠固结状态,因此结构性差,颗粒排列松散,具有较强的压缩和湿陷特性<sup>[4]</sup>,在上覆填土荷载作用下表现为以塑性变形为主的固结压缩,即地面沉降。挖方区形变速率相对较小,主要为开挖面下部原状黄土在上部山体开挖后,弹性应变能快速释放,产生的以弹性变形为主的卸荷回弹过程。黄土山体快速开挖的实质是快速的竖向卸荷过程,其打破了山体原有的应力平衡环境,并在开挖后的平坦场地中形成临空面,使得下部原状黄土体出现应力迅速释放并重新调整(上部土体自重荷载 $p$ 迅速减小至0,而下部支撑荷载 $q$ 减小至一定数值后,形成向上的卸荷回弹应力),从而导致浅表部土体产生向临空方向的卸荷回弹变形,最终表现为地面抬升现象。

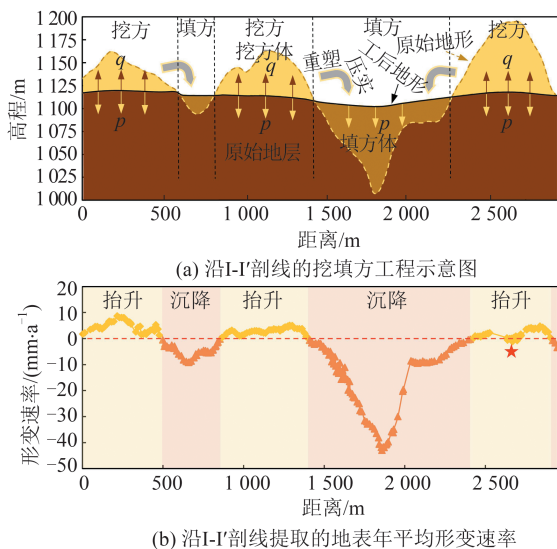


图5 地面抬升形成机制示意图

Fig.5 Schematic Diagram of Land Uplift Formation Mechanism

地基卸荷回弹往往还具有复杂的时空效应<sup>[29]</sup>,时间效应主要体现在卸荷回弹是一个时间变化的过程。随时间不断发展,卸荷回弹应力不断释放,应力逐渐松弛,地面应力重新调整并逐渐趋于平衡,回弹变形量也逐渐减小,直接表现为地面抬升速率逐渐降低(见图4)。新区挖方工程针对的是黄土丘陵山体,空间效应对土体回弹

变形的影响主要体现在不同位置的开挖厚度不同,也即卸荷量不同,从而引起开挖面的差异回弹现象(见图5(b))。

由图5还可以看出,地面抬升范围往往小于实际的挖方区范围,主要是由于挖填过渡区内的挖方厚度相对较小,卸荷量较小,因此回弹变形量很小,甚至不发生回弹变形,只有当卸荷量达到一定值时,才会发生明显的回弹变形<sup>[30]</sup>。图5(b)中红色五角星所示位置表示此处受建筑荷载的影响,使得地面抬升现象不明显,甚至出现轻微的沉降,这主要是由于开挖面浅表部土体产生卸荷回弹变形后,形成一定厚度的松弛层,在后期建筑荷载作用下的再压缩变形量往往大于原来的回弹变形量<sup>[31]</sup>。

## 4.2 地面抬升外在因素

### 4.2.1 挖方工程的影响

延安新区的挖填方工程于2012年开始施工,至2018年岩土工程全面完工,挖方区工程造地总面积为7.83 km<sup>2</sup>,其中区域A所处位置的挖方区总面积为4.03 km<sup>2</sup>,区域B挖方区总面积为2.20 km<sup>2</sup>,区域C挖方区总面积为1.24 km<sup>2</sup>(见图6(a))。为了探究挖方工程对地面抬升分布的影响,通过将InSAR形变结果与挖方区进行空间叠加,以分析地面抬升与挖方工程的空间分布相关性,结果如图6(b)所示。由图6(b)可以看出,地面抬升区与挖方区的空间分布具有较强的对应关系,地面抬升几乎均发生在挖方区。整个延安新区地面抬升区总面积为5.95 km<sup>2</sup>,其中分布在挖方区的面积为5.02 km<sup>2</sup>,也即84.40%的地面抬升分布在挖方区。其中,区域A抬升区总面积为3.28 km<sup>2</sup>,其中分布在挖方区的面积为2.80 km<sup>2</sup>,占该抬升区面积的85.41%;区域B抬升区总面积为1.46 km<sup>2</sup>,其中分布在挖方区的面积为1.27 km<sup>2</sup>,占该抬升区面积的86.58%;区域C抬升区总面积为1.20 km<sup>2</sup>,其中分布在挖方区的面积为0.95 km<sup>2</sup>,占该抬升区面积的78.99%(见表1)。由此可见,地面抬升空间分布格局主要受挖方工程的控制,进一步印证了新区的地面抬升是由黄土深开挖后的卸荷回弹变形引起的。

此外,挖方工程的完工时间对于现今的地面抬升速率有较大影响,通过历史Google Earth影像可以大致反映出新区平山造城的建设过程,从而获取不同区域挖方工程的完工时间。通过统计3个典型抬升区域的完工时间和平均抬升速率以及最大抬升速率,结果表明,早期开挖完工的区域地面

抬升速率显著小于后期完工区域(见表1)。区域A和B挖方工程完工时间为2015-01,平均抬升速率分别为2.4 mm/a和2.9 mm/a,而相对应的区域C完工时间为2018-06,平均抬升速率为6.0 mm/a,

最大抬升速率达到24.8 mm/a,是区域A、B的两倍之多,这主要是由于回弹变形具有时间效应,是一个长期的时序过程,随着应力的逐渐释放,卸荷回弹量会显著下降,地面抬升速率也随之降低。

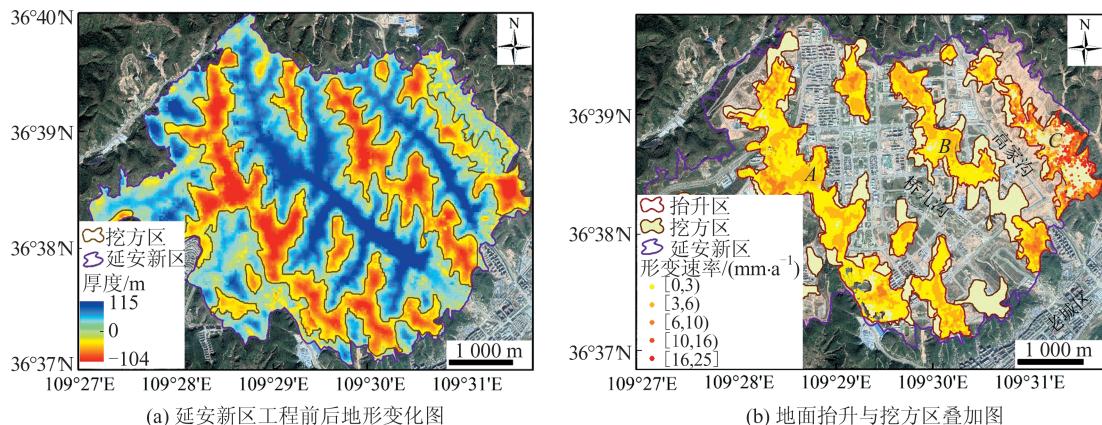


图6 地面抬升与挖方区空间分布图

Fig.6 Spatial Distribution Map of Land Uplift and Mountain-Excavated Area

表1 不同区域地面抬升统计结果

Tab.1 Statistics of Land Uplift Corresponding to Different Areas

抬升区域	完工时间	覆盖面积/km <sup>2</sup>	与挖方区重叠面积/ km <sup>2</sup>	平均抬升速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )	最大抬升速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )
A	2015-01-22	3.28	2.80	2.4	10.2
B	2015-01-22	1.46	1.27	2.9	10.4
C	2018-06-14	1.20	0.95	6.0	24.8

#### 4.2.2 挖方体厚度的影响

新区地面抬升为山体开挖卸荷回弹变形所引起,不同的开挖厚度对应不同的卸荷压力,同时对原始应力平衡环境的扰动也不一样,因此挖方厚度往往是影响地面抬升的重要因素。由图6还可以看出,新区的平山造城岩土工程中,最大挖方厚度超过100 m,新区地面抬升与挖方体厚度同样具有较强的相关性,主要表现为挖方体厚度越大,对应的地面抬升速率也越大。

为进一步量化分析挖方厚度对地面抬升的影响,以区域A和区域B为例,将挖方体厚度划分为5个厚度区段,分别为<10 m、[10,30) m、[30,50) m、[50,70) m、≥70 m,对每个区段内的地面抬升观测点进行统计分析,分别计算不同区域不同厚度区段的覆盖面积占比、形变速率以及平均抬升速率,结果如图7所示。由图7(a)和图7(b)可以看出,地面抬升主要分布在挖方体厚度为10~70 m的区域,其抬升观测点占整个区域抬升观测点的80%以上。随着挖方体厚度的增加,地面抬升观测点的数量先增加后减小,这与不同厚度区段的覆盖面积占比有较好的一致性。此

外,随着挖方厚度的增加,抬升速率大于3 mm/a的观测点所占比逐渐增大,表明挖方厚度是控制地面抬升速率大小的主要因素。

由图7(c)和图7(d)可以看出,在区域A中,随着挖方厚度的增加,平均抬升速率也随之增大,但抬升速率的增加幅度逐渐减小。在区域B,平均抬升速率先随着挖方体厚度增加而增大,但在挖方体厚度大于70 m的区域,平均抬升速率反而降低,推断是由于建筑荷载作用抑制了地面抬升变形(详见§4.2.3)。综上分析可知,挖方厚度显著影响了新区的地面抬升变形,在深开挖条件下,山体挖方厚度越大,即卸荷压力越大,初始应力状态的改变也就越大,释放的应变能越高,从而引起的土体卸荷回弹变形响应越剧烈。

#### 4.2.3 建筑荷载的影响

随着平山造城工程的逐步完工,新区的城市化建设也在快速推进,截至2019年,新区城市建筑群总覆盖面积达到4.04 km<sup>2</sup>,主要分布在区域A和区域B。挖方区作为延安新区城市化发展的主要建设场地,密集分布的城市建筑会对地面抬



升产生显著的影响。如前所述,当挖方厚度大于 70 m 时,区域 B 的平均抬升速率反而降低(见图 7(d)),这主要是由于大于 70 m 厚度的挖方区是

新区城市高层建筑规划建设的主要区域<sup>[23]</sup>,建筑荷载平衡了部分回弹应力,降低了地表浅层土体的回弹变形,从而抑制了地面抬升的发展。

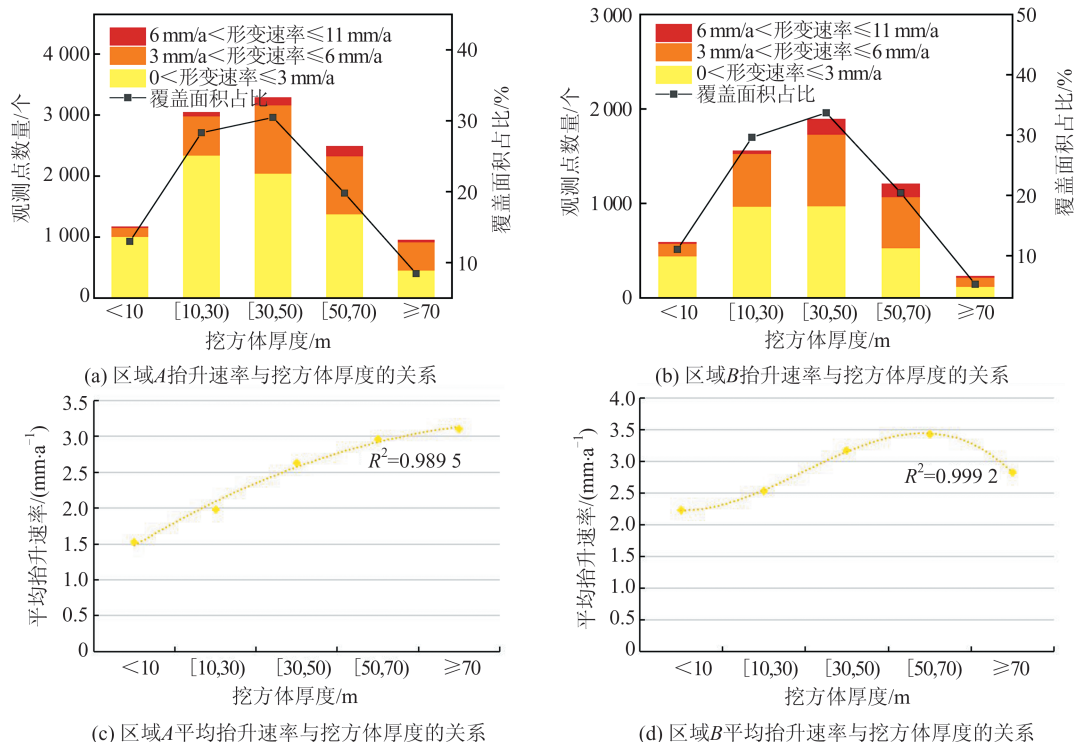


图7 地面抬升与挖方体厚度的关系

Fig. 7 Relationship Between Land Uplift and Thickness of Excavation

为了更加直观地揭示地面抬升与新区建筑群的空间分布关系,对地面抬升与建筑分布进行叠加分析,结果如图8所示。由图8可以看出,抬升区建筑群密集分布,建筑群所在区域的地面抬升速率相对较小,而建筑群以外区域的地面抬升现象更为显著,抬升速率较高,且最大抬升速率均分布在非建筑区。为进一步分析建筑荷载对地面抬升的影响,沿剖面Ⅱ-Ⅱ'(剖面位置见图8(a))提取区域A的地表形变速率,结果如图8(b)所示。分析图8(b)可知,剖面Ⅱ-Ⅱ'沿线的地表形变空间展布呈明显的差异抬升变形,建筑群对地面抬升的展布特征影响明显,主要表现为地面抬升速率在建筑群所在区域显著降低,最大地面抬升速率均分布在非建筑覆盖区。

分别提取抬升区内建筑覆盖区以及非建筑覆盖区地面抬升观测点的抬升速率并进行统计分析,结果如表2所示。从表2中可以看出,建筑区的平均抬升速率以及最大抬升速率均小于非建筑区。区域A建筑区的平均抬升速率为2.3 mm/a,而非建筑区的平均抬升速率为2.4 mm/a,同时建筑区与非建筑区的最大抬升速率分别为9.4 mm/a和10.2 mm/a。相比区域A,区域B差

异抬升现象更加显著,其建筑区的平均抬升速率为2.6 mm/a,而非建筑区的平均抬升速率为2.9 mm/a,同时建筑区与非建筑区最大抬升速率分别为6.9 mm/a和10.4 mm/a。

在建筑荷载作用下,浅表层土体原有的应力状态再次发生改变,浅层土体内部产生向下的附加应力,从而抵消了部分回弹应力,降低了回弹变形量,最终抑制了地面抬升的发展。

## 5 结 语

黄土高原生态地质环境脆弱,大规模的平山造城打破了原有的长期地质平衡,极易引发一系列地质灾害。本文利用SBAS-InSAR技术对2016-05—2019-10期间获取的53景升轨Sentinel-1A数据集进行处理,获取了延安新区工后长期地面形变信息,重点对地面抬升空间分布规律及其影响因素进行了详细分析。得到如下结论:

1)延安新区工后地面抬升现象显著,主要分布在与城市建设发展紧密相关的挖方区,最大抬升速率达24.8 mm/a;地面抬升变形在工后初期发展较快,随时间发展有趋缓并稳定的趋势。

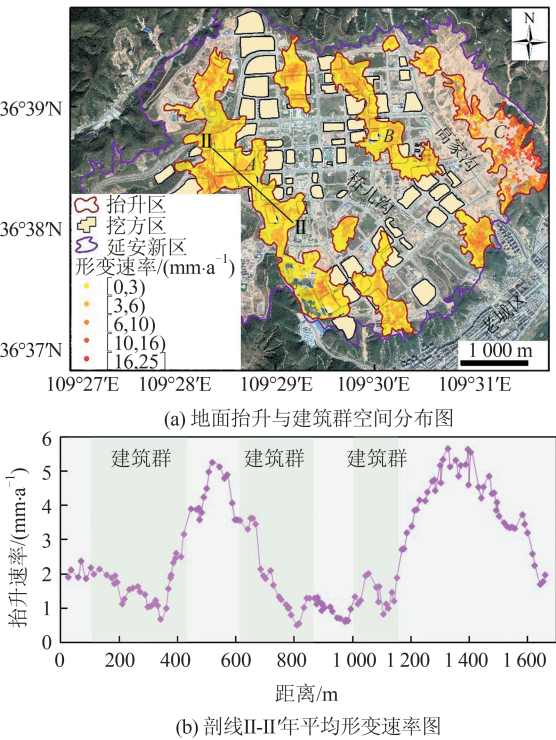


图8 地面抬升与建筑荷载的关系

Fig. 8 Relationship Between Land Uplift and Building Load

表2 不同建筑区域地面抬升统计结果

Tab.2 Statistics of Land Uplift Corresponding to Different Building Areas

区域	面积/km <sup>2</sup>	平均抬升速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )	最大抬升速率/ (mm·a <sup>-1</sup> )
区域A建筑覆盖区	0.96	2.3	9.4
区域A非建筑覆盖区	2.33	2.4	10.2
区域B建筑覆盖区	0.40	2.6	6.9
区域B非建筑覆盖区	1.07	2.9	10.4

2)开挖面下部原状黄土在上部山体开挖后,弹性应变能快速释放,产生的卸荷回弹变形是地面抬升的主要内在机制。山体快速深开挖打破了原有的应力平衡状态,造成下部原始地层的应力环境改变和重新调整,以适应新的平衡环境,从而导致浅表部土体产生向临空方向的回弹变形。

3)新区地面抬升的空间分布格局及量级是挖方工程的分布及其厚度、建筑荷载等外在因素综合作用的结果。挖方工程范围主要控制了地面抬升的空间分布,而挖方厚度决定了抬升变形的大小,此外,建筑荷载作用还会抑制抬升变形的发展。

参 考 文 献

[1] Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The Critical Issues and Creative Concepts in Mitigation Research of Loess Geological Hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 684-691 (彭建兵,林鸿州,王启耀,等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691)

[2] Li P Y, Qian H, Wu J H. Accelerate Research on Land Creation[J]. *Nature*, 2014, 510(7 503): 29-31

[3] Juang C, 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

[4] 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): 270-292

[5] 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)

[6] 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): 1 673-1 692

[7] Chen kun, Yan Shuwang, Sun Liqiang, et al. Analysis of Deformation of Deep Foundation Pit Under Excavation Unloading Condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016(4): 1 075-1 082 (陈昆,闫澍旺,孙立强,等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016(4): 1 075-1 082)

[8] Ma P F, Wang W X, Zhang B W, et al. Remotely Sensing Large- and Small-Scale Ground Subsidence: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111 282-111 299

[9] 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): 2 039-2 049 (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): 2 039-2 049)
- [10] Zhu Bangyan, Yao Fengyu, Sun Jingwen, et al. Attribution Analysis on Land Subsidence Feature in Hexi Area of Nanjing by InSAR and Geological Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 442-450 (朱邦彦, 姚冯宇, 孙静雯, 等. 利用 InSAR 与地质数据综合分析南京河西地面沉降的演化特征和成因[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 442-450)
- [11] Liu Qi, Yue Guosen, Ding Xiaobing, et al. Temporal and Spatial Characteristics Analysis of Deformation Along Foshan Subway Using Time Series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1 099-1 106 (刘琦, 岳国森, 丁孝兵, 等. 佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 1 099-1 106)
- [12] Xu Caijun, Lin Dunlin, Wen Yangmao. Extract and Analysis Surface Deformation Caused by Wenchuan Mw7.9 Earthquake from InSAR Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1 138-1 142 (许才军, 林敦灵, 温扬茂. 利用 InSAR 数据的汶川地震形变场提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1 138-1 142)
- [13] Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1 342-1 354 (陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(9): 1 342-1 354)
- [14] 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)
- [15] Ge Daqing, Dai Keren, Guo Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949-956 (葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 949-956)
- [16] 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): 1 651-1 659 (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): 1 651-1 659)
- [17] Li Da, Deng Kazhong, Gao Xiaoxiong, et al. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1 531-1 537 (李达, 邓喀中, 高晓雄, 等. 基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1 531-1 537)
- [18] Yang Chengsheng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. Small Baseline Subset InSAR Technology Used in Datong Basin Ground Subsidence, Fissure and Fault Zone Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 945-950 (杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 945-950)
- [19] Li Shanshan, Li Zhiwei, Hu Jun, et al. Investigation of the Seasonal Oscillation of the Permafrost over Qinghai-Tibet Plateau with SBAS-InSAR Algorithm [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1 476-1 486 (李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1 476-1 486)
- [20] Li X A, Li L C, Song Y X, et al. Characterization of the Mechanisms Underlying Loess Collapsibility for Land-Creation Project in Shaanxi Province, China—A Study from a Micro Perspective [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 77-88
- [21] Ge Miaomiao, Li Ning, Zhang Wei, et al. Settlement Behavior and Inverse Prediction of Post-Construction Settlement of High Filled Loess Embankment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 745-753 (葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745-753)
- [22] Liu Yingying. Experimental Study and Numerical Simulation on the Collapsibility of High Embankment Loess in Yan'an New District [D]. Xi'an:

- Northwest University, 2018 (刘颖莹. 延安新区高填方黄土湿陷变形试验及其数值模拟研究[D]. 西安: 西北大学, 2018)
- [23] 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(6): 1 409-1 421 (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(6): 1 409-1 421)
- [24] Duan Xu, Dong Qi, Men Yuming, et al. Change of Groundwater and Water Content of Loess High Fill in Gully Regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(9): 1 753-1 758 (段旭, 董琪, 门玉明, 等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1 753-1 758)
- [25] Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 717-1 733 (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): 1 717-1 733)
- [26] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the Pre-failure Two-Dimension Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1 778-1 786, 1 796 (戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1 778-1 786, 1 796)
- [27] Shi Xuguo, Zhang Lu, Xu Qiang, et al. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1 027-1 034 (史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 1 027-1 034)
- [28] Huang Da, Tan Qing, Huang Runqiu. Mechanism of Strain Energy Conversion Process for Marble Damage and Fracture Under High Stress and Rapid Unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2 483-2 493 (黄达, 谭清, 黄润秋. 高应力强卸荷条件下大理岩损伤破裂的应变能转化过程机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2 483-2 493)
- [29] Zhang Weimin, Gu Xingwen, Wang Fang, et al. Swelling Tests on Soils and Simulation Method for Unloading-Swelling Process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 979-987 (章为民, 顾行文, 王芳, 等. 土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 979-987)
- [30] Li Jianmin, Teng Yanjing. Regularity and Calculation Method of Rebound Deformation and Recompression Deformation of Soil Based on Bearing Test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 113-121 (李建民, 滕延京. 基于载荷试验的土体回弹再压缩变形规律及计算方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 113-121)
- [31] Li Jianmin, Teng Yanjing. Model Test on Rebound Deformation in Foundation Pit Excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S2): 81-84 (李建民, 滕延京. 基坑开挖回弹再压缩变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 81-84)

## Land Uplift Monitoring and Analysis in Yan'an New District Based on SBAS-InSAR Technology

PU Chuanhao<sup>1</sup> XU Qiang<sup>1</sup> ZHAO Kuanyao<sup>1</sup> JIANG Ya'nan<sup>1</sup> LIU Jialiang<sup>1</sup>  
KOU Pinglang<sup>1</sup>

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

**Abstract: Objectives:** The mountain excavation and city construction in Yan'an New District is one of the largest land-creation projects in the Loess Plateau. Large-scale mountain excavation has induced extensive land uplift in the region. At the same time, the excavation area is the main site for the urbanization of the new district, and the land uplift has seriously affected the sustainable development of urbanization in the



new district. **Methods:** In this study, the small baseline subset synthetic aperture radar interferometry (SBAS-InSAR) technology was utilized to process the ascending Sentinel-1A data stacks covering the new district from May 2016 to October 2019 to retrieve long-term ground deformation information after construction. The spatial pattern of ground uplift and its time deformation evolution characteristics was revealed, and the causes of land uplift were further quantitatively analyzed in detail. **Results:** The results show that significant land uplift of the new district after construction is mainly distributed in the excavation area that has the greatest impact on human engineering activities, with a maximum uplift rate of 24.8 mm/a. The ground lifting deformation develops rapidly in the early post-construction period, and it tends to slow down and stabilize over time. **Conclusions:** The unloading rebound deformation caused by the rapid mountain excavation is the main internal factor causing land uplifting, and the distribution and magnitude of the land uplifting are the result of the combined effects of external factors such as excavation engineering, excavation thickness, and building load.

**Key words:** Yan'an New District; mountain excavation and city construction; SBAS-InSAR; land uplift; deformation monitoring

**First author:** PU Chuanhao, PhD candidate, specializes in geological disaster evaluation and prediction. E-mail: 2529456063@qq.com

**Corresponding author:** XU Qiang, PhD, professor. E-mail: xq@cdut.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41790445, 41630640); the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41521002).

**引文格式:** 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. DOI:10.13203/j.whugis20200262 (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. DOI:10.13203/j.whugis20200262)