

DOI:10.13203/j.whugis20190372



文章编号:1671-8860(2020)11-1728-11

延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析

蒲川豪¹ 许 强¹ 蒋亚楠¹ 赵宽耀¹ 何 攀¹ 张含悦¹ 李骅锦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:陕西省延安新区的“平山造城”是目前世界上在湿陷性黄土沟壑地区规模最大的岩土工程。大规模的土地创造、工程建设及复杂的工程地质条件,引起了大量的不均匀地面沉降。首先利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术对2017-12—2018-12期间获取的升轨哨兵1号A星(Sentinel-1A)数据进行分析,获取了延安新区平山造城工程工后的地面沉降分布特征,并通过实地调查验证了InSAR技术探测结果的可靠性,然后讨论分析了影响地面沉降分布的主要因素。结果表明,延安新区工后地面沉降主要分布在填方区,最大形变速率达120.1 mm/a。填方工程中黄土的重塑及其物理力学性质的改变是填方区地面沉降的主要内在因素,挖填方工程和填方体厚度是地面沉降分布与大小的主要控制因素,人类活动和地质环境的改变也会加速地面沉降的发展。时序InSAR技术可为黄土重大工程灾害隐患的早期识别提供有效的技术手段,为进一步开展监测预警、规划建设或科学防控提供依据。

关键词:平山造城;时序InSAR;地面沉降;影响因素

中图分类号:P237

文献标志码:A

近年来,中国黄土高原地区正在实施一系列重大工程建设^[1],如平山造城、固沟保塬、治沟造地等,其工程建设速度和强度都远超地质营力,对黄土地区地质环境产生重大影响,并导致灾变(如地面沉降、水土流失等)不断发生。由于黄土高原地质环境本就脆弱且地质条件复杂,其工程建设常常受到地面沉降以及边坡滑移的影响。陕西省延安新区“平山造城”是为了解决制约延安经济社会发展的土地资源短缺问题而实施的一项重大工程,通过“削山、填沟、造地、建城”将黄土沟壑地区整理成城市建设用地,从而建设一个城市新区^[2]。在湿陷性黄土沟壑地区进行如此大规模的岩土工程,其所处水文地质和工程地质条件复杂,湿陷性黄土具有特殊的结构和工程特性,同时又具有超大土石方量、高填方、建设环境复杂多变及相互影响因素多等特点,使得延安新区的工程建设不可避免地引起大量地面沉降问题^[3]。因此,研究新区地面沉降的分布及工程建设对地面沉降的影响为该区的长期地面监测、建筑工程规划建设、地面沉降的科学防控提供数据

支持,对城市化的持续发展具有重要意义。

基于两景或多景合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像数据的合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric SAR, InSAR)因其具有全天时、全天候、覆盖范围广、形变监测精度高等特征^[4-5],已广泛应用于区域地面沉降探测、滑坡早期识别与监测等地质灾害领域^[6-8],并已逐渐发挥不可或缺的重要作用^[9-10]。小基线集干涉测量技术(small baseline subsets InSAR, SBAS-InSAR)的提出^[11-14],极大限度地避免了由于时间、空间基线过长而引起的失相干现象,同时减小了地形对差分以及大气效应的影响,大大提高了InSAR的监测精度,从而可以对区域地面沉降的空间分布、时空演变等提供一种有效的探测手段。

目前,利用InSAR技术监测城市地面变形大多针对构造活动、过量抽取地下水等自然和人为因素作用下的区域性地表变形,如汾渭盆地、长江三角洲地区等^[15-17],而对于快速的工程造地、建设城市新区所引起的地面变形的研究相对较少。延安新区平山造城建设涉及大量挖填方以及建

收稿日期:2019-10-10

项目资助:国家自然科学基金(41790445, 41630640)。

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@cdut.edu.cn

筑工程,目前对其地面沉降机理的研究主要基于现场特定点的沉降监测数据、室内实验等^[18-20],难以对新区整个区域的形变特征进行详细分析。因此,本文利用时序 InSAR 技术,基于 2017-12—2018-12 时间段内覆盖延安新区的升轨 Sentinel-1A 雷达影像数据,获取了新区的地面变形空间分布特征。现场实地调查验证了 InSAR 探测结果的可靠性,并进一步量化分析了影响新区地面沉降分布的主要因素,为以后建筑选址以及城市发展的科学决策提供依据。

1 研究区概况

陕西省延安市位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,老城区密集分布在一个“Y”字形的河谷地带,属于典型的“线”形城市,36 km²的狭长城区容纳了近 50 万人口。同时,延安作为革命圣地,红色旅游景点众多,然而为了增加城市土地资源,大量革命旧址受到挤压和蚕食,使得城景争地问题突出^[2]。为了实现城市化持续发展和保护革命圣地的历史文化遗产,延安市政府决定实施“中疏外扩、上山建城”的城市发展战略^[21],通过“削山、填沟、造地、建城”,将原始黄土沟壑地区建造成平坦的建设用地,从而建设城市新区^[22-23]。

延安新区(北区)一期项目于 2012-04-17 正式开工建设,至 2018-08 新区岩土工程全面完成(见图 1)。自工程建设以来,至 2018 年新区工程造地总面积为 22.3 km²,交通道路总长度达 80 km 以上,其中公路分布密度达 3.64 km/km²。同时,随着填方工程的逐步完工,建筑工程也于 2014 年开始快速建设,其工程建筑目前主要分布在挖方区。

延安新区原始地形呈黄土高原丘陵沟壑地貌,大小冲沟发育,地形以梁、峁为主,地势起伏较大,流域分水岭海拔高度 1 100~1 260 m,沟底海拔高度为 950~1 080 m,相对高差约 100~150 m。挖填方工程完成之后,工程范围内的地形已基本平坦,地面海拔高度为 1 075~1 120 m,总体呈现西北高、东南低的趋势,其最大填方厚度超过 100 m^[24]。平山造城工程主要涉及第四系松散黄土,由于受地质环境的影响,其分布范围复杂且具有特殊的结构特征和工程特性。同时,原始沟谷水文地质结构受地质结构控制,地下水以大气降雨为主要来源,以泉水方式排泄。在湿陷性黄土沟壑区进行如此大规模的挖填方工程以及新区城市建设后,其工程地质和水文地质条件发生了显著的改变,不可避免地会引起大量的工后地面沉降现象。

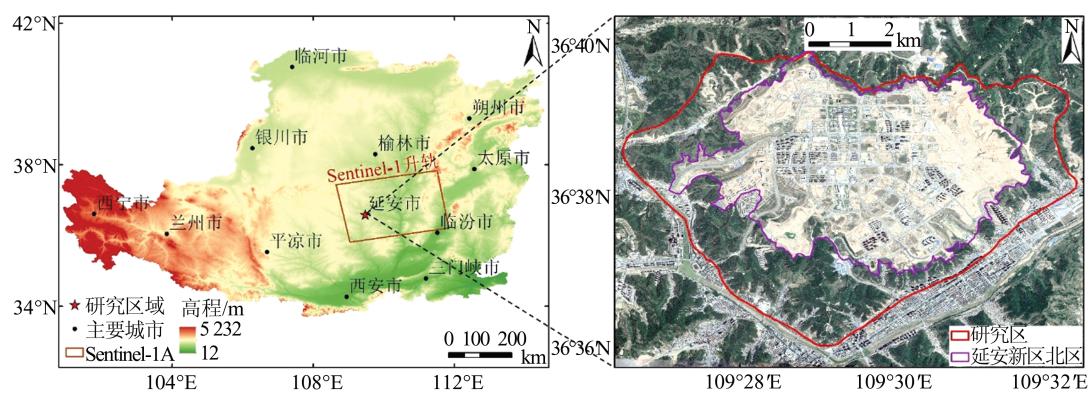


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of Study Area

2 数据与方法

2.1 研究区 SAR 数据

本文主要针对延安新区平山造城工程工后的地表形变空间分布规律及其影响因素进行分析,因此选用覆盖研究区的 Sentinel-1A 雷达影像数据对新区地面沉降特征进行探测。哨兵 1 号(Sentinel-1)卫星是欧洲航天局(European Space

Agency, ESA)哥白尼全球对地观测计划所研制的一个由两颗卫星(Sentinel-1A 和 Sentinel-1B)组成的双星系统,可以对全球环境、地表形变等进行全天时、全天候高分辨率监测。Sentinel-1A 卫星于 2014-04-03 发射升空,其重访周期为 12 d, Sentinel-1B 卫星于 2016-04-26 发射升空,重访周期最短可以达 6 d,进一步提升了其全球监测能力^[25]。

由于延安新区的工程建设强度于2012年开始后急剧增加,直到2017年逐渐趋缓^[26],至2018-08才全面完工。若选取长时间序列的数据进行处理分析,那么持续高强度的工程建设(如填方工程)容易引起显著的失相干,进而影响新区地面沉降分布探测的准确性。因此,为了减小完工之前由于频繁的工程建设扰动等引起的失相干,本文共采用32景升轨Sentinel-1A雷达影像,时间跨度范围为2017-12-01—2018-12-20,时间间隔为12 d。数据基于C波段(5.6 cm)成像,成像模式为干涉宽幅(image mode, IM)模式,空间分辨率为5 m(距离向)×20 m(方位向),幅宽为250 km,极化方式为VV极化,入射角为39°。此外,采用覆盖延安新区的30 m分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据作为参考DEM数据,用于去除后续差分干涉测量过程中地形起伏的影响,同时作为延安新区平山造城工程前的原始地形数据,用于地面沉降影响因素的量化分析。

2.2 SBAS-InSAR技术原理

SBAS-InSAR技术是以多个主影像的干涉对为基础,对高相干目标进行相位分析来获取时序形变信息。通过选择合适的时-空基线阈值组成差分干涉对,利用线性相位变化模型对选取的相干目标点进行建模和解算,并通过时-空滤波估计和去除大气延迟,在减少合成孔径雷达差分干涉测量技术(differential InSAR, D-InSAR)处理中的失相干影响以及高程、大气误差的同时获取地表的时间序列形变信息^[11-16]。SBAS-InSAR技术避免了由于时间空间基线过长而引起的失相干现象,同时还减少了地形对差分结果的不利影响^[27]。其基本技术原理如下^[15,25]:

对于覆盖同一区域并按照一定时间序列获取的(N+1)幅SAR影像,任选一幅影像为主影像进行配准,然后设置合适的时间和空间基线阈值进行干涉对组合和构网,并将组合后的各组影像对进行差分干涉,共生成M幅干涉图,且M满足以下条件:

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

假设在两个不同时刻 t_A 、 t_B ($t_B > t_A$)获取的两期SAR影像以 t_B 时刻为主影像进行差分干涉,干涉生成的第j幅干涉图中某个像素点处得到的干涉相位可以表示为:

$$\delta\varphi_j = \varphi(t_B) - \varphi(t_A) \approx \delta\varphi_j^{\text{def}} + \delta\varphi_j^{\text{topo}} +$$

$$\delta\varphi_j^{\text{atm}} + \delta\varphi_j^{\text{noise}} \quad (2)$$

式中, $\delta\varphi_j$ 为某一点处的干涉相位; $\varphi(t_A)$ 和 $\varphi(t_B)$ 分别是 t_A 、 t_B 时刻对应于 t_0 时刻的相位; $\delta\varphi_j^{\text{def}}$ 为 $t_A \sim t_B$ 时刻视线向的形变相位; $\delta\varphi_j^{\text{topo}}$ 为该像素点的地形相位; $\delta\varphi_j^{\text{atm}}$ 为大气相位; $\delta\varphi_j^{\text{noise}}$ 为噪声引起的相位信息。

式(2)可进一步表示为:

$$\delta\varphi_j^{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B) - d(t_A)], \forall j = 1, 2 \dots M \quad (3)$$

$$\delta\varphi_j^{\text{topo}} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp} \Delta h}{r \sin \theta} \quad (4)$$

$$\delta\varphi_j^{\text{atm}} = \varphi_{\text{atm}}(t_B) - \varphi_{\text{atm}}(t_A) \quad (5)$$

式中, $d(t_A)$ 、 $d(t_B)$ 分别表示 t_A 、 t_B 时刻相对于参考时间 t_0 在雷达视线方向的累积形变量; λ 表示雷达波长; r 为雷达到地面观测物的斜距; θ 表示入射角; B_{\perp} 为垂直基线; Δh 为DEM高程差。

利用奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)对每个相干像素点的形变速率进行估算,将形变速率对时域进行积分,就可以得到形变时间序列^[11]。

3 结果分析与验证

3.1 地面沉降空间分布

利用SBAS-InSAR技术对覆盖延安新区的Sentinel-1A雷达数据进行地表形变特征信息的提取,获取了延安新区的视线方向上的地表年平均形变速率(见图2)。图2中,形变速率为红色(负值)表示地物沿着雷达视线向方向远离卫星运动(即表现为地面沉降),形变速率为绿色(正值)则表示地物沿着雷达视线向方向靠近卫星运动(即表现为地面抬升)。由图2中可以看出,延安新区主要有两个较大的沉降区,分别分布在桥儿沟流域(即主城区所在流域)及高家沟流域的沟谷中心。桥儿沟流域主要的形变速率范围为-20~-45 mm/a,最大形变速率达-73 mm/a;高家沟流域的主要形变速率为-20~-80 mm/a,差异沉降特征显著,所探测到的最大形变速率达-120.1 mm/a。其中,高家沟流域下游区域探测到的形变观测点较少或没有,推测是由于频繁的工程扰动以及形变量超出InSAR探测范围表现出失相干特征;而分水岭所处的挖方区则表现为地面抬升,最大抬升变形位于高家沟东侧挖方区,形变速率达62.1 mm/a。此外,研究区西北边界处的工程边坡存在较明显的变形迹象,最大形变速率达-37.8 mm/a。

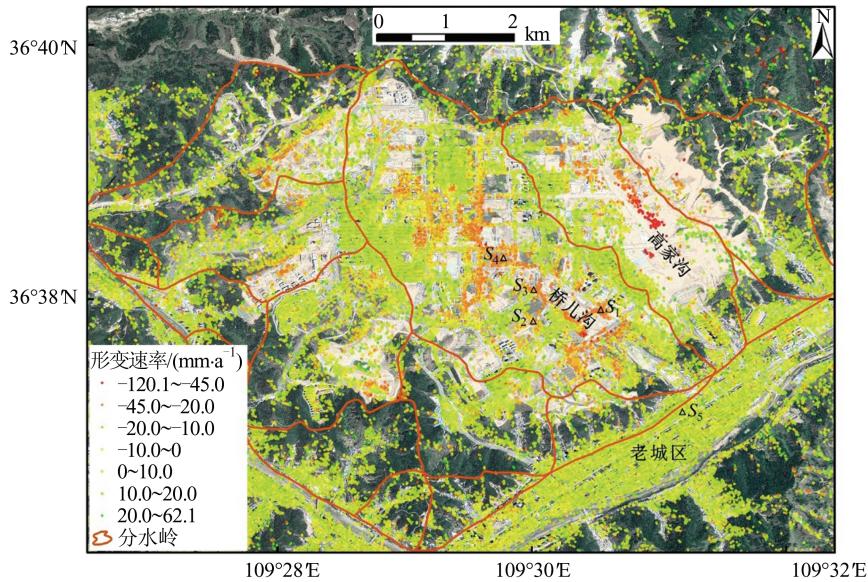


图 2 延安新区地表年平均形变速率图

Fig. 2 Mean Deformation Velocity of Yan'an New District

3.2 地面沉降实地验证

由于还未获取延安新区地面变形高精度监测数据,本文主要依据详细的野外实地调查进一步验证 InSAR 探测结果的准确性与可靠性。

图 3 为 2019-04 利用 InSAR 探测到的地表变形进行实地验证得到的现场证据,可以看出,InSAR 技术探测到的地面变形在现场均表现为实际的变形破坏特征。在桥儿沟流域,由于工程建设及交通道路网的完善,地面破坏特征相对高家沟流域更明显,如道路裂缝、墙体开裂、地表排水渠裂缝等(图 3(a)~3(d))。

图 4 绘出了对应野外验证点 S_1 ~ S_4 处及稳定参考点 S_5 处的累计形变时序结果。由图 4 可以看出,野外验证点所在区域整体上均呈有起伏的持续沉降变形特征,而稳定参考点位于延安老城区,整个时间段内的累计形变在 2 mm 范围内波动,基本处于稳定状态。在选取的 4 处典型地面沉降验证点中,点 S_1 所在区域填方体厚度最大,地表沉降最为严重,在 2017—2018 年间,累计形变量达 40 mm,年平均形变速率约 -36 mm/a 。在高家沟流域,挖填方工程完成时间还较短,地表建筑较少,主要为林地或荒地。因此,尽管地面变形速率比桥儿沟流域更高,但实际的地表变形破坏迹象却不明显,仅在防洪积水池等处有明显的变形破坏现象。

InSAR 探测结果与现场调查结果基本一致,验证了 InSAR 结果的可靠性与准确性,进一步验证了时序 InSAR 技术用于平山造城工程后地面沉降监测的适用性,其可以为黄土地区重大工

程灾害隐患的早期识别提供有效的技术手段。由于桥儿沟流域为城市主要建设区,植被覆盖较少,地面相干性较好,获取到了较为密集的形变观测点且地面沉降现象明显,因此下文主要基于桥儿沟流域的地表形变结果对地面沉降的影响因素进行分析。

4 地面沉降影响因素分析

4.1 平山造城工程的影响

主城区所在流域(桥儿沟流域)工程造地已于 2012 年开工建设,至 2014 年填方范围超过 5.21 km^2 ,占整个流域的 32.2%,同时大部分工程建筑也分布在此流域范围内(见图 5)。

以桥儿沟流域为例分析平山造城工程建设对地面沉降分布的影响。在桥儿沟流域,受 SAR 影像数据的分辨率以及持续的工程建设的影响,分布在填方体上的观测点密度为 1191 个/km^2 ,分布在填方区外的观测点密度为 1482 个/km^2 。同时,在此流域中形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点中,64.22% 的点都分布在填方体上,其最大沉降速率达 73 mm/a 。其中,分布在填方体上形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点密度达 616 个/km^2 ,而分布在填方体以外形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点密度只有 163 个/km^2 ,表明桥儿沟流域的地面沉降集中分布在填方区域,挖填方工程形成的黄土高填方是地面沉降分布的主要影响因素。此外,研究区形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点有 15.86% 分布在建筑区,其中又有 54.82% 的观测

点所在的建筑位于填方体上,建筑对地面沉降的影响主要通过其上部荷载作用于土体使其进一步压缩变形从而加速地面沉降过程^[28]。相对于挖填方工程,建筑工程对地面沉降的影响明显较小,

主要是因为建筑工程大多都分布在填方区以外的挖方区。因此,不难看出,延安新区地面沉降的分布主要受平山造城工程后高填方体的分布控制。

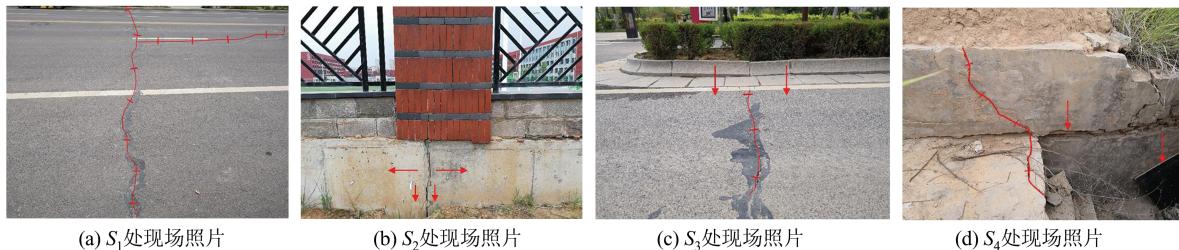


图3 延安新区地面变形特征

Fig. 3 Land Deformation Characteristics of Yan'an New District

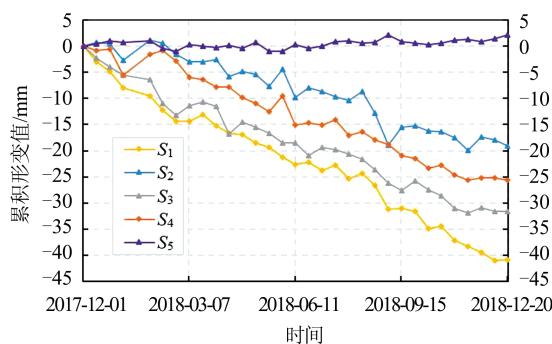


图4 $S_1 \sim S_5$ 点形变时间序列

Fig. 4 Time Series of Displacements at $S_1 \sim S_5$ Points

4.2 填方土体工程性质的影响

原状黄土由于结构特殊,如土颗粒间的接触点在长时间物理化学作用下形成的胶结等,使得其相对于重塑黄土往往具有更好的物理力学性质。尽管重塑压实黄土不具备原状黄土特殊的大孔隙结构,不具有产生湿陷变形的基本条件,但是大量的实验研究发现压实黄土仍然具有一定湿陷性^[29]。甚至还有研究表明,在相同含水率和干密度条件下,填土过程中土层的反复压实作用并不能完全消除黄土的湿陷特征,压实黄土的湿陷性和压缩性还要高于原状黄土^[30-31]。

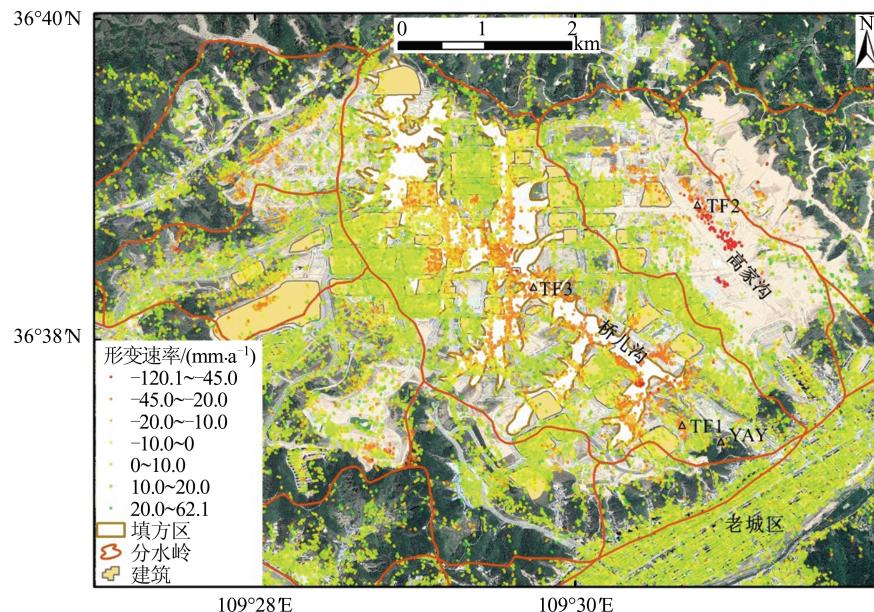


图5 桥儿沟流域地面沉降与填方区空间分布关系

Fig. 5 Spatial Distribution Map of Land Subsidence and Filling Area in Qiaoer Gully Catchment

对延安新区原状黄土以及填方黄土取样进行室内实验,取土位置见图5。图5中, YAY、TF 分别表示延安新区原状黄土和填方黄土。延安新区不同位置的土样具有不同的基本物理性质

(见表1),这表明填方工程中黄土的重塑使得其物理性质发生了改变,同时填方工程并不能保证填土达到均一的物理性质,因此不同位置处的填土力学性质存在差异,从而影响不同位置处填土

的差异变形。根据文献[32]中对延安新区不同深度范围的填土进行的相关物理性质指标实验(见图 6),延安新区的填方土体的含水率、干密度、压实度等均随深度同样呈不均匀变化,使得

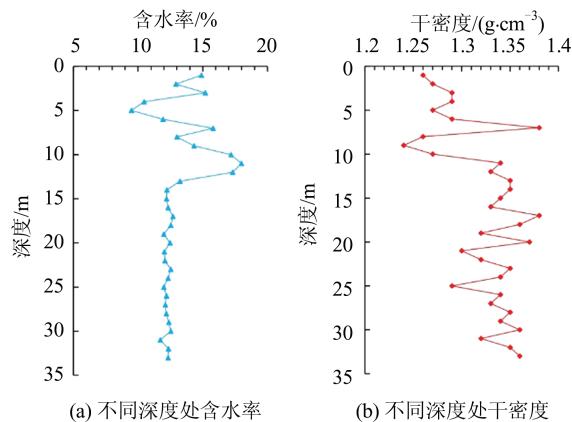
填方土体的物理力学性能(压缩性、湿陷性等)在深度方向上各异,从而造成填土在不同深度范围的差异压缩变形,最终导致大量的不均匀地面沉降。

表 1 不同位置处黄土基本物理性质

Tab.1 Main Physical Properties of Loess at Different Locations

取样点	天然密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 ω /%	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	空隙比 e	塑限 ω_p /%	液限 ω_L /%	塑性指数 I_p /%
YAY	1.78	9.88	1.62	2.70	0.67	15.88	31.8	15.92
TF1	1.80	16.66	1.54	2.58	0.67	19.44	29.33	9.89
TF2	1.81	12.65	1.61	2.65	0.64	17.52	30.15	12.63
TF3	2.05	18.02	1.74	2.64	0.52	19.40	33.66	14.26

注:YAY、TF 分别表示延安新区原状黄土和填方黄土

图 6 不同深度处填土基本物理性质^[32]Fig. 6 Main Physical Properties of Loess Fill at Different Depths^[32]

4.3 填方体厚度的影响

平山造城工程建设所涉及的填方工程中,最大填方厚度超过 100 m,填方体的分布及其厚度明显影响着地面沉降的分布和大小。已有学者对延安新区高填方的地面沉降进行了分层监测,结果表明延安新区地面沉降主要为填方体自身的沉降^[18]。为分析填方体厚度与地面沉降的关系,提取桥儿沟流域每个地面沉降观测点及其所在位置的填方体厚度进行分析(图 7)。由图 7(b)可以明显看出,随着填方体厚度的增加,沉降观测点的数量以及沉降速率明显增加,填方体的厚度是决定地面沉降速率大小的主要控制因素。地面沉降主要分布在填方体厚度大于 30 m 的区域,其沉降观测点占所有形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点的 94.7%。然而,只有当填方体厚度大于 70 m 时,才会出现地面形变速率 $<-50 \text{ mm/a}$ 的区域,最大形变速率达 -73 mm/a 。相反,填方厚度相对较小,尤其是小于 10 m 时,地面沉降现

象不明显或者沉降变形速率很低。§4.2 提到,填土不同深度处的物理力学性质各异,因此填土在不同深度处的自重压缩变形以及对下伏原状黄土的压力随填土厚度变化而变化,填方体厚度越大,填土的自重压缩变形量越大,同时其作用于下伏原状黄土的压力也越大。因此,填土及原状黄土的共同压缩变形下造成的地面沉降越大。

4.4 交通道路的影响

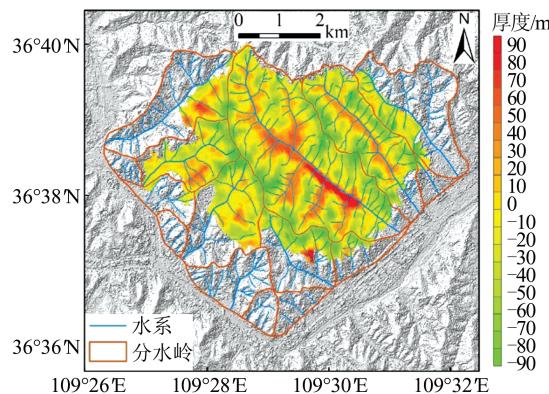
由图 8(a)可以看出,主要地面沉降区与交通道路的空间分布也具有较强的相关性,主要沉降区沿填方区内的道路展布,而且位于道路周边范围内的地面沉降速率更高。为进一步量化分析交通道路与地面沉降的空间分布关系,对道路网进行缓冲区分析,分别提取离道路不同距离处的地面沉降观测点变形速率并进行统计分析,结果见图 8(b)。从图 8(b)中可以看出,距离道路越近,地面沉降观测点分布越多,沉降速率也相应越大。地面沉降主要分布在距离道路 100 m 范围内,其沉降观测点占所有形变速率 $<-10 \text{ mm/a}$ 的观测点的 83.9%。由于延安新区公路网分布相对密集,因此距离公路 200 m 内都可以探测到形变速率在 $-10 \sim -73 \text{ mm/a}$ 范围的观测点。密集的公路网所带来的长期循环交通荷载及其产生的振动荷载会加速其下部及周边填土的固结,从而影响延安新区的地面沉降^[31]。

4.5 水文地质结构的影响

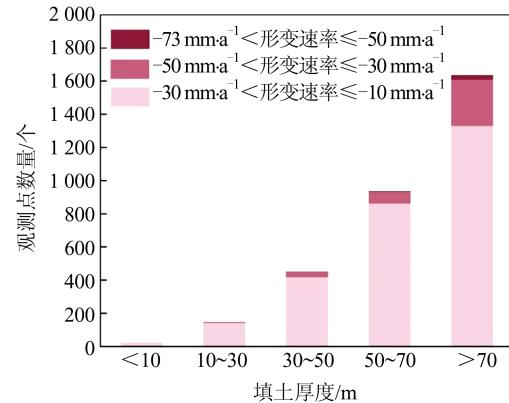
挖填方工程不仅会改变原始地形地貌,同时也改变了原来的地表水径流及地下水渗流系统,破坏原有地下水的渗流平衡。工程前后典型水文地质剖面如图 9 所示,其中 GC 表示钻孔所在位置^[33]。在平山造城工程之前,沟谷两侧原状黄土层基本呈疏干状态,为透水不含水黄土层。在

工程建设后,原始水文地质条件被改变,经过压实的回填黄土与沟谷两侧的原状黄土结为一体,改变了原始地表水径流途径和阻塞原始地下水的排泄通道。而且原状黄土和经过压实的填土渗透系数均表现出明显的离散型,由于填土在重塑压实过程中结构性被破坏,因此压实填土的渗透

透性低于原状黄土1~2个数量级^[24]。尽管填方工程中布设有排水盲沟等排水措施,但是填方土体本身排水条件不良,使得排水盲沟排水量仍然小于工程建设之前的径流总量^[24],填方体内部滞留大量水分,使填方区地下水位不断上升^[33],引起填方土体的进一步沉降。



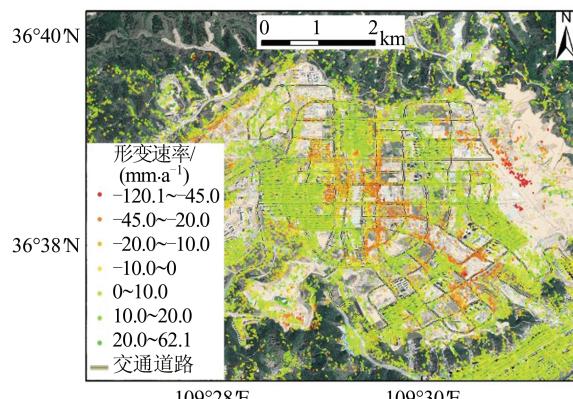
(a) 延安新区2000-2017年地形变化图^[26]



(b) 地面沉降与填方体的厚度关系

图7 地面沉降与填土厚度的关系

Fig. 7 Relationship Between Land Subsidence and Fill Thickness



(a) 地面沉降与交通道路空间分布图

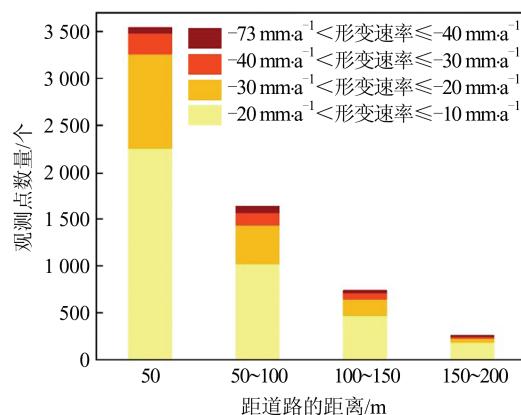


图8 地面沉降与交通道路的关系图

Fig. 8 Relationship Between Land Subsidence and Road Networks

4.6 降雨的影响

黄土具有特殊的水敏性,在水的作用下极易产生湿陷变形。在延安新区,除了地下水上升,重塑压实黄土在地表水(如降雨)入渗作用下的增湿变形特性也会对新区的地面沉降产生重要影响。为了探究地表水对填土地面沉降的影响,通过延安气象站点获取了延安的雨量数据,并将野外验证点的累计形变时序结果与雨量数据进行叠加分析,如图10所示。由图10可以看出,新区地面沉降与降雨量具有较好的相关性,形变时间序列随降雨量变化而波动,主要表现为形变量随降雨量增加呈明显加速的过程。同时还可以

发现降雨对地面沉降的影响是暂时的,地表形变随着降雨的停止也会逐渐趋于原始正常的固结沉降过程。在突发性强降雨过程中,地表形变量会急剧加大,表明重塑压实黄土在降雨入渗后仍会产生进一步的湿化变形,从而加速填方体的沉降变形。

5 结语

黄土高原地质环境本就脆弱,一系列重大工程建设(如平山造城工程)的快速实施导致地面沉降等灾害的不断发生。本文利用SBAS-InSAR技术对覆盖延安新区的32景升轨Sentinel-

1A雷达影像进行地表形变特征信息的提取,探测到延安新区平山造城工程工后(2017—2018年)

地面沉降分布特征,并分析了影响地面沉降分布的主要因素。

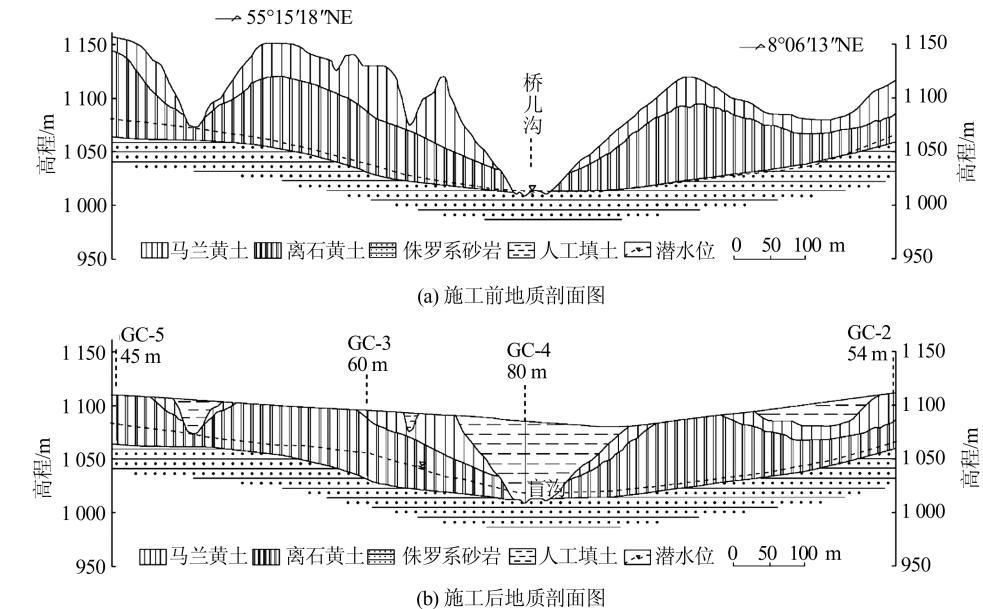


图9 工程前后典型水文地质剖面图^[33]

Fig. 9 Hydrogeological Structure of Study Area^[33]

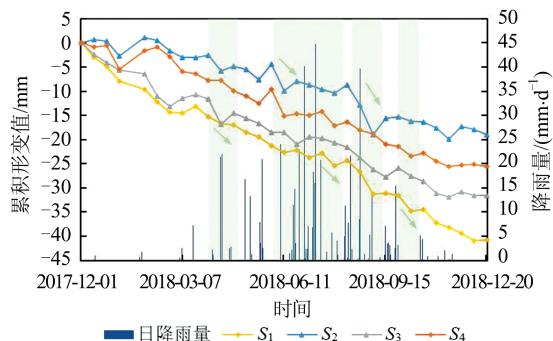


图10 地面沉降与降雨的关系
Fig. 10 Relationship Between Land Subsidence and Rainfall

1)延安新区平山造城工程工后形成了大量的不均匀地面沉降,主要分布在填方体上,最大形变速率达120.1 mm/a,实地调查验证了时序InSAR技术探测结果的可靠性与准确性。

2)填方工程中黄土的重塑及其物理力学性质的改变是填方区地面沉降的主要内在因素,平山造城工程建设中的挖填方工程决定了地面沉降的分布,而填方体厚度是地面沉降分布与大小的主要控制因素。除此之外,人类活动和地质环境条件的改变也会加速地面沉降的发展。

3)为了实现在黄土重大工程规划选址和可行性研究阶段的潜在灾害隐患早期识别与主动风险防范,时序InSAR分析可为黄土高填方地面沉降、边坡滑移等灾害隐患的早期识别提供有效

的技术手段,为进一步开展监测预警、规划建设或科学防控提供依据。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] Cui Yajun. Study on the Benefit of Resources and Environment in Yan'an New Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015(崔亚军. 延安新区建设的资源环境效益研究[D]. 西安: 长安大学, 2015)
- [3] Li P Y, Qian H, Wu J H. Accelerate Research on Land Creation[J]. *Nature*, 2014, 510(7 503): 29-31
- [4] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time Series InSAR Technology and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2014(廖明生, 王腾. 时间序列InSAR技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014)
- [5] 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)
- [6] Xu Junqiang, Ma Tao, Lu Yikai, et al. Land Subsidence Monitoring in North Henan Plain Based on SBAS-InSAR Technology [J]. *Journal of Jilin University*

- (*Earth Science Edition*), 2019, 49 (4): 1 182-1 191
(许军强, 马涛, 卢意恺, 等. 基于SBAS-InSAR技术的豫北平原地面沉降监测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49 (4): 1 182-1 191)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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): 2 375-2 383
- [12] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1 377-1 386
- [13] Lanari R, Casu F, Manzo M, et al. An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(4): 637-661
- [14] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2 243-2 253
- [15] 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)
- [16] Dong Shaochun, Chong Yahui, Hu Huan, et al. Ground Subsidence Monitoring During 2015—2018 in Changzhou Based on Time Series InSAR Method [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2019, 55(3): 370-380(董少春, 种亚辉, 胡欢, 等. 基于时序InSAR的常州市2015—2018年地面沉降监测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 370-380)
- [17] Peng M M, Zhao C Y, Zhang Q, et al. Research on Spatiotemporal Land Deformation (2012—2018) over Xi'an, China, with Multi-sensor SAR Datasets [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 664
- [18] 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)
- [19] Du Weifei, Zheng Jianguo, Liu Zhenghong, et al. Settlement Behavior of High Loess-Filled Foundation and Impact from Exhaust Conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 325-331(杜伟飞, 郑建国, 刘争宏, 等. 黄土高填方地基沉降规律及排气条件影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 325-331)
- [20] Zheng Jianguo, Cao Jie, Zhang Jiwen, et al. Analysis of Influencing Factors of High Loess-Filled Foundations Based on Centrifugal Model Tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 560-571(郑建国, 曹杰, 张继文, 等. 基于离心模型实验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 560-571)
- [21] Kong Yang, Ruan Huaining, Huang Xuefeng. Deformation Characteristics of Compacted Malan Loess in

- [21] Yan'an Region Under High Consolidation Pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1 731-1 736(孔洋, 阮怀宁, 黄雪峰. 延安地区压实马兰黄土高压固结变形特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1 731-1 736)
- [22] Huo Chenchen. Study on the Stability of High-filled Loess Slope Under the Rise of Groundwater Level [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016(霍晨琛. 地下水位上升对黄土高填方边坡稳定性的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2016)
- [23] 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实验及其数值模拟研究[D]. 西安: 西北大学, 2018)
- [24] Zhang Jiwen, Yu Yongtang, Li Pan, et al. Groundwater Monitoring and Analysis of High Fill Foundation in Loess Hilly-Gully Region [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 48(4): 477-483(张继文, 于永堂, 李攀, 等. 黄土削崩填沟高填方地下水监测与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(4): 477-483)
- [25] 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(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)
- [26] Pu Chuanhao, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Study on Land Subsidence and Vegetation Restoration Characteristics in Yan'an Mountain Excavation and City Construction Project Area Based on Remote Sensing Analysis [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)
- [27] Zhang Jing, Feng Dongxiang, Qi Wei, et al. Monitoring Land Subsidence in Panjin Region with SBAS-InSAR Method [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(4): 999-1 007(张静, 冯东向, 禹巍, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的盘锦地区地面沉降监测[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 999-1 007)
- [28] 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
- [29] Chen Kaisheng. Study on Strength and Deformation of Compacted Loess and Its Microstructure for Highway Engineering [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006(陈开圣. 公路工程压实黄土的强度与变形及其微观结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2006)
- [30] Wu Shisheng, Wu Jianmin, Dai Jingliang. Study on Wetting-Collapse of Compacted Loess [J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 1997, 17(3): 1-3(伍石生, 武建民, 戴经梁. 压实黄土湿陷变形问题的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(3): 1-3)
- [31] 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
- [32] Zhang Peiran. Study on the Moistening and Drying Deformation Characteristics, Model and Structural Analysis of the Unsaturated Loess Filling with Gully Fill [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018(张沛然. 沟谷填方非饱和黄土填料增减湿变形特性、模型及结构性分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018)
- [33] 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)

Analysis of Land Subsidence Distribution and Influencing Factors in Yan'an New District Based on Time Series InSAR

PU Chuanhao¹ XU Qiang¹ JIANG Ya'nan¹ ZHAO Kuanyao¹ HE Pan¹
ZHANG Hanyue¹ LI Huajin¹

1 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 the largest geotechnical project in the collapsible loess gully region. Large-scale land creation, engineering construction and complex engineering geological conditions has caused a large number of uneven land subsidence, which is posing an increasing threat to the stability of urban infrastructure and public safety.

Methods: The ascending Sentinel-1A data stacks obtained during December 2017 to December 2018 were analyzed using the time series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique, and the distribution characteristics of the post-construction land subsidence of the mountain excavation and city construction in Yan'an New District were obtained. The reliability of the detection results of InSAR technology was demonstrated by field investigation. Finally, based on the deformation monitoring results, the main influencing factors of land subsidence distribution were analyzed. **Results:** (1) The results show that significant uneven land subsidence formed after the mountain excavation and city construction in Yan'an New District is mainly distributed in the filling area, and the maximum deformation rate reaches up to 120.1 mm/a. Field investigation validates the reliability and accuracy of the deformation results. (2) The remodeling of original loess and the change of its physical properties during the filling process is the main intrinsic factors of land subsidence in the filling area. Large-scale land creation determines the distribution of land subsidence, and the thickness of the filling are the main controlling factor of the distribution and size of land subsidence. In addition, human activities and changes in the geo-environment will also accelerate the development of land subsidence. **Conclusions:** In order to achieve the early detection of potential geo-hazards and active risk prevention in the site selection and feasibility study stage of mega engineering projects in the Loess Plateau, the time-series InSAR technology can provide an effective technical that allows for the early detection of potential geo-hazards such as land subsidence and landslides, and provide a scientific basis for further monitoring and warning, planning and construction, geologic disaster prevention.

Key words: mountain excavation and city construction; time series InSAR; land subsidence; influence factors

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).

引文格式: 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. DOI: 10.13203/j.whugis20190372(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.DOI:10.13203/j.whugis20190372)