



引文格式:高壮,何秀凤,肖儒雅,等.一种联合估计形变和大气误差的改进LiCSBAS方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(2):285-294.DOI:10.13203/j.whugis20200325

Citation: GAO Zhuang, HE Xiufeng, XIAO Ruya, et al. An Improved LiCSBAS Method for Joint Estimation of Deformation and Atmospheric Errors[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(2): 285-294. DOI: 10.13203/j. whugis20200325

一种联合估计形变和大气误差的改进 LiCSBAS方法

高 壮¹ 何秀凤¹ 肖儒雅^{1,2} 余娟娟¹

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,211100

2 英国纽卡斯尔大学工学院,英国 纽卡斯尔,NE1 7RU

摘要:多时相InSAR(interferometric synthetic aperture radar)技术以其大范围、高时空分辨率、可以获取毫米级甚至亚毫米级形变信号等特点,被广泛应用于大范围地表沉降监测。针对目前时序分析在获取研究区影像和数据预处理上耗时量大的问题,利用LiCSAR(looking inside the continents from space with synthetic aperture radar)产品,采用时序分析新方法LiCSBAS提高了解算效率。该方法采用整体干涉对质量检验和相位环闭合差,探测二维相位解缠存在的解缠误差,剔除相干性较低的干涉对和大误差像元。为了减弱大气误差的影响,利用通用型大气改正在线服务产品进行大气误差改正,并在此基础上提出了一种形变参数和大气相位联合估计方法。以成都平原地区和西部山区为例,获取2016—2020年共90景影像进行时序分析新方法实验研究。结果表明:(1)提出的联合估计算法在地形起伏明显地区可以有效地抑制大气误差的影响,同时在大气效应不明显的地区也不会错估而引入相位误差;(2)监测的大部分区域表现较为稳定,年际沉降形变速率为-11~8 mm/a;(3)LiCSAR产品适合做大区域形变调查,难以满足小范围精细监测的需求。

关键词:LiCSBAS;联合估计;大气校正;LiCSAR;形变监测

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2021-04-26

DOI:10.13203/j.whugis20200325

文章编号:1671-8860(2023)02-0285-10

An Improved LiCSBAS Method for Joint Estimation of Deformation and Atmospheric Errors

GAO Zhuang¹ HE Xiufeng¹ XIAO Ruya^{1,2} YU Juanjuan¹

1 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

2 School of Engineering, Newcastle University, Newcastle Upon Tyne, NE1 7RU, UK

Abstract: Objectives: Multi-temporal interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology is widely used in deformation monitoring over wide areas due to its characteristics of large-scale, high spatial-temporal resolution and the capability to monitor deformation signal with millimeter precision even submillimeter. For the time-consuming problem in acquiring image and data preprocessing over research area, this paper uses looking inside the continents from space with synthetic aperture radar (LiCSAR) products and takes a new time series analysis LiCSBAS method, which greatly improve the computational efficiency. Methods: The quality check and the closure error of the phase loop are used to detect the unwrapping error in the two-dimensional phase unwrapping, and the interferogram with low coherence and the large error pixels are excluded. To minimize atmospheric artifacts, utilizing the generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) products and based on this, a method for joint estimation of deformation and atmospheric phase is proposed. Taking the Chengdu Plain and western mountainous area as the study area, totally 90

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1503603);国家自然科学基金(41830110)。

第一作者:高壮,博士生,主要从事InSAR形变监测及GNSS气象学研究。zhuanggao@hhu.edu.cn

通讯作者:何秀凤,博士,教授。xfhe@hhu.edu.cn

images from 2016 to 2020 are obtained for experimental study on this new time series analysis method. **Results:** The results show that: (1) The proposed algorithm can effectively weaken the atmospheric artifacts in the area with obvious terrain undulation, within the 34 interferograms, 68% gained positive correction performance, and the standard deviation of the interferogram decreased by 95%. Comparatively, in the area where the atmospheric effect was inapparent, without introducing phase error, and the worst performance increased by 2.06%; (2) most areas are relatively stable with little change and the deformation velocity is $-11\text{--}8 \text{ mm/a}$. **Conclusions:** The proposed method is efficient and phase deviation will not be introduced even if the atmospheric delay error is not significant. In addition, this study also find that the LiCSAR products are suitable for large area deformation investigation and not optimized for more localized deformation studies.

Key words: LiCSBAS; joint estimation; atmospheric corrections; looking inside the continents from space with synthetic aperture radar (LiCSAR); deformation monitoring

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具有范围大、时空分辨率高、对垂直变形敏感等特点,被广泛应用于地表形变监测^[1]。但常规重轨差分InSAR易受大气误差、时空去相关的影响,其应用场景主要限制在地震、地质构造运动、火山等形变量级较大的监测区域,其精度只能达到厘米级^[2]。经过近20年相关理论方法和应用技术的发展,多时相InSAR(multiple temporal InSAR, MT-InSAR)分析方法逐步发展成熟,并成功地应用于水利堤坝工程监测^[3]、大型桥梁基础设施监测^[4]、铁路沿线监测和地铁沿线稳定分析^[5]、城区沉降监测^[6]、机场稳定性评估^[7]等方面,尤其是在小区域形变监测方面取得了诸多成功案例。随着合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星数据的时空分辨率不断提高,雷达遥感技术真正进入了高分辨率时代,在地表形变的精细化监测方面展现出了巨大的潜力^[8]。面对如此丰富、不断更新的数据源,尤其是对用户开放可免费获取Sentinel-1 A/B数据,其干涉宽幅模式(interferometric wide swath, IWS)的幅宽达到250 km,监测区域大量影像数据的获取、存储、预处理以及一系列的时序参数反演,需要耗费大量处理时间,给计算机的性能、磁盘空间等硬件条件带来巨大的挑战。与此同时,在利用InSAR测定地表形变尤其是微小形变时,地球大气相位延迟是形变反演的主要误差源之一,对于高分辨率卫星,大气相位延迟更是制约其监测精度的最重要因素。因此,在InSAR数据处理和干涉影像的解译过程中,必须研究和分析大气的影响,并加以处理。关于大气校正方法的研究,早期研究主要集中在基于SAR数据自身的大气校正方法(时序InSAR^[9]和层叠法^[10]等),后来随着外部水汽数据的增多和

数值大气模型精度的提高,大气校正方法逐渐转向利用外部数据和气象模型,如利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)^[11]、中等分辨率成像频谱仪(medium resolution imaging spectrometer instrument, MERIS)^[12]及天气预报模式(weather research and forecasting, WRF)^[13]等,并成为了InSAR大气校正的主流。其中,虽然基于GNSS数据改正精度高,但是站点分布稀疏,且有的研究区缺少监测站点。而中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)和MERIS数据受云层影响大,且搭载在特定的传感器上,时间分辨率可能无法满足其他SAR卫星的改正要求。以WRF为代表的数值大气模型虽适用性较强,但时空分辨率低,对于在时空上呈随机分布的湍流大气很难建模,且稳定性不高。上述方法虽在各自的案例研究中取得了很好的改正效果,但各方法都有着自身的局限性,目前还没有一种有效且通用的方法。本文采用英国环境研究委员会地震火山构造观测与建模中心项目COMET发布的LiCSAR(looking inside the continents from space with synthetic aperture radar)产品和英国纽卡斯尔大学发布的通用型大气改正在线服务(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)对流层延迟校正产品,基于时序分析新方法LiCSBAS,提出了一种形变参数和大气相位联合估计方法。本文分别选取成都平原和西部山区作为研究区,验证方法的有效性,并获取成都城区及周围地区地面形变的分布特征及时间演化规律,以此探究LiCSBAS分析方法及LiCSAR产品的实际应用效果。

1 研究区与数据源

1.1 研究区域概况

成都平原是中国四川盆地西部形成的一处冲积扇平原,发育在东北-西南向的向斜构造基础上,整个地势自西北向东南方向倾斜。区域内水

系发达,渠系密集,加上一年四季降雨充沛,导致地表较为松散,沉积物巨厚。平原上分布着中国很多重要城市,中心地带为成都市,其辖区面积达到 604.1 km^2 ,常住人口达到1440万人,轨道交通密集,是中国重要的交通枢纽。其地理位置如图1(a)所示。

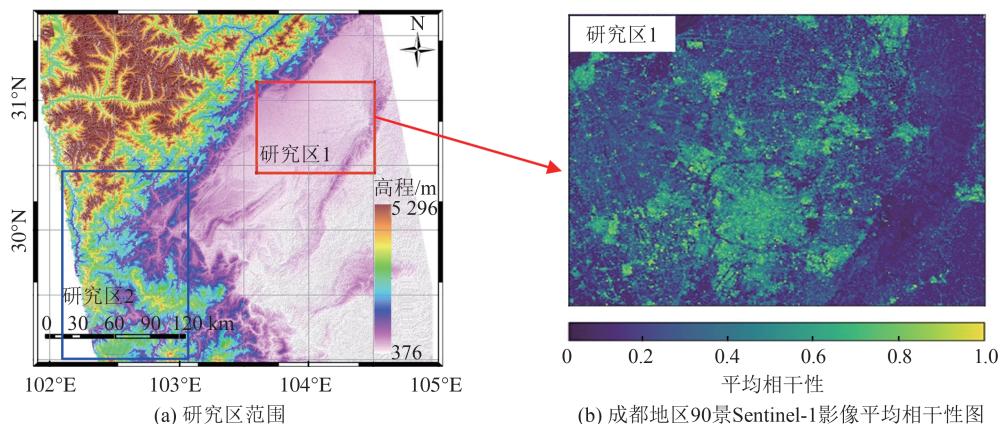


图1 研究区域位置图

Fig.1 Geographic Location of the Study Area

成都平原处于地震波影响带,会受到其他地方地震波的影响,加上近几年城镇扩张建设,大型工程建设、轨道交通、城市地下空间开发及高层建筑物对地基施加的载荷,带来了地表沉降的隐患^[14]。虽然近几年已有一些学者^[15-16]利用时间序列 InSAR 技术对成都平原区域地表沉降进行了一些研究,但时间主要集中于 2016 年之前,且监测时间跨度相对较短。因此,本文利用 2016—2020 年共 90 景 Sentinel-1 卫星影像对成都地区展开长时间序列分析,从图 1(b)可以看出,成都地区人工建筑群密集,平均相干性较高。

1.2 LiCSAR 与 GACOS 大气改正产品

Sentinel-1 影像可以从欧空局(european space agency, ESA)官网上下载,一般获取的是 L1 级数据,需要对获取的数据进行预处理生成差分干涉图或解缠差分干涉图。当需要对研究区进行长时间序列分析时,需要大量的磁盘存储空间、计算资源以及运算时间。而英国环境研究委员会地震火山构造观测与建模中心项目 COMET 和英国 LiCS 空间对地观测项目(<https://comet.nerc.ac.uk/COMET-LiCS-portal/>)提供处理好的解缠干涉图。截至 2019 年 11 月,可以免费获取发布的经过 GAMMA SAR 软件处理^[17]的约 16 万幅干涉图。当研究区位于 LiCS 监测的区域内,可以直接获取其产品,无需下载、预处理等步骤。对于干涉图中存在的大气相位,利用 GA-

COS 提供的对流层延迟产品进行改正。GACOS 以空间分辨率为 0.125° 、时间分辨率为 6 h 的欧洲中期天气预报中心数据,采用迭代对流层分解模型(iterative tropospheric decomposition, ITD)进行大气建模,提供的对流层延迟产品时间分辨率可以精确到分钟,空间分辨率达到 90 m,具有全球近实时、易使用和提供质量控制的特点^[18-19]。

2 方 法

LiCSBAS 分析方法是由 Morishita 等^[20]基于 LiCS 产品提出的一种时序分析方法。与一般时序分析方法在解缠相位误差剔除、参考点的选择、形变参数估计等步骤稍有不同。

2.1 GACOS 大气改正

对于大气相位的去除,没有直接采用时空滤波方法,而是利用 GACOS 对流层延迟产品进行改正。GACOS 提供的产品是天顶距延迟,需要根据每个像元的入射角将其转换至斜距向,再根据相位转换关系,转换成大气延迟相位进行改正。值得注意的是,并不是所有的 GACOS 产品对干涉图都能进行有效改正,在对部分干涉对改正时,有可能出现非但没有减弱大气影响,还引入相位误差的情况。因此,一般采用相位标准偏差(standard deviation, STD)作为评判大气改正效果的指标。本文只对改正后相位标准差降低

的干涉对使用GACOS产品进行改正,剩余的干涉对则采用本文提出的方法进行估计。

2.2 解缠相位误差剔除

LiCS产品是利用GAMMA SAR进行数据处理的,在对干涉相位进行解缠时,只在空间维度上采用统计费用流SNAPHU方法进行相位解缠^[21],没有考虑时间维度上的相位信息,加上雷达成像时阴影、叠掩等造成有些区域不满足相位连续性条件,相位会存在解缠相位误差。如果不将解缠相位误差较大的像元剔除,势必会影响形变参数解算的精度。LiCSBAS方法在进行相位误差剔除时,主要分为两步:首先,进行整体干涉对质量检验。根据平均相干性和有效像元率(每对干涉图上有效像元数/有效像元总数)作为阈值,将相干性较低和有效像元较少干涉对剔除,组成的干涉对中只有20170811—20171103干涉对没有满足要求;然后,对满足质量检验的干涉图进行环闭合相位检验^[22]。假设有3景影像($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$)可以生成3对解缠相位图($\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{23}$),则环闭合相位可以根据下式计算:

$$\Delta\varphi = \varphi_{12} + \varphi_{23} - \varphi_{13} \quad (1)$$

如果这3个干涉图没有解缠相位误差时,则式(1)应该接近0;如果其中一个或多个干涉图存在解缠误差时,环闭合相位应为 2π 的整数倍。LiCSBAS在进行解缠相位误差检查时,是逐干涉对而不是逐像元计算环闭合相位均方根误差(root mean square error, RMSE),这样可能会导致RMSE满足阈值的干涉对(本文设为1.5 rad)中仍然存在解缠误差的像元,因此再统计每个像元环闭合相位误差大于阈值的个数,以此作为掩模像元的标准。

2.3 形变参数和大气相位联合估计

由于组成的干涉对空间垂直基线较小,不精确的外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)造成残余地形相位较小,因此为了估计每

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_M \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}_{(M+N)\times 1} = \begin{pmatrix} & & & & & \\ & B & & C & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{pmatrix} \omega \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & -(t_1-t_1) & -1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & -(t_2-t_1) & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & -(t_N-t_1) & -1 \end{pmatrix}_{(M+N)\times(N+K+1)}$$

式中, B 为干涉对连接矩阵; C 为待估大气改正干涉对连接矩阵,由0和1构成; M 为干涉对数量; N

个像元的形变速率和时序形变量,对解缠相位直接采用NSBAS反演策略进行计算^[23-24]。假设有 N 景影像,获取时间分别为(t_1, t_2, \dots, t_N),形成 M 个干涉对分别为($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$),则每个像元的干涉相位可以表示为:

$$\varphi_{ij} = \sum_{k=i}^{j-1} \Delta\varphi_k \quad (2)$$

式中, φ_{ij} 为第*i*与第*j*时刻获取的影像形成的干涉相位; $\Delta\varphi_k$ 为第*k*-1至第*k*个获取影像之间的相位增量。当干涉图网有多个子集时,会造成式(2)系数矩阵秩亏,一般采用奇异值分解进行求解,但是解算出来的解有偏差,它会影响沉降的时间特性,从而影响沉降速率。为了解决这个问题,在式(2)基础上,附加一个线性或者多项式约束 $f(t)$ 作为正则化函数:

$$f(t) = v \cdot t + c \text{ 或 } f(t) = a \cdot t^2/2 + v \cdot t + c \quad (3)$$

式中, v 为沉降速率; a 为沉降加速度; c 为常量。对未进行GACOS大气改正的干涉对(如图2中红色干涉对),将其大气误差作为参数进行估计,联立式(2)和(3)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ij} = \sum_{k=i}^{j-1} \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_{\text{atm}}^{ij}, \forall (i, j) \in [1, N] \\ \Delta\varphi_{\text{atm}}^{ij} = \begin{cases} \Delta\varphi_{\text{atm}}^{ij}, (i, j) \in \Omega \\ 0, (i, j) \notin \Omega \end{cases} \\ \omega \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\varphi_i - f(\Delta t_k) = 0, \forall k \in [2, N] \\ \varphi_{t_1} = 0 \\ \Delta t_k = t_k - t_1 \end{array} \right. \quad (4)$$

式中, ω 为约束方程(3)的权参数,值足够小,取 1×10^{-4} ,当干涉图网不存在孤立子集时,相位增量 $\Delta\varphi_k$ 不会受到附加约束方程的影响; Ω 为未进行GACOS大气改正的干涉对集。以线性约束为例,则 ψ, G, X 分别为:

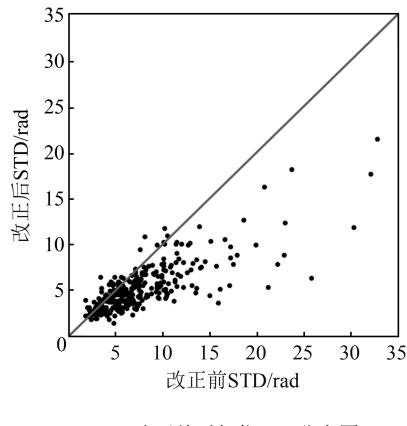
$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_{(M+N)\times 1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_{N-1} \\ \Delta\varphi_{\text{atm}}^1 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_{\text{atm}}^K \\ v \\ c \end{pmatrix}_{(N+K+1)\times 1} \quad (5)$$

为影像数量; K 为未经大气改正的干涉对数量,在文中 K 在两个研究区取值分别为50和34。

3 结果与分析

3.1 算法验证

研究区内获取了 90 景 Sentinel-1 影像,共生成 300 对干涉对,其时空基线分布如图 2 所示,其中蓝色线表示 GACOS 大气改正效果显著的干涉对,红色线表示为不显著的干涉对。图 3 为对 300 对解缠相位图进行 GACOS 大气改正前后标准相位差的统计结果。从图 3(a)可以发现,经过 GACOS 大气改正后,绝大部分干涉图相位标准差降低,最大降低约 65%,结合图 3(b)发现,GACOS 对某些干涉图改正时(图 2 中的红色干涉对),效果并不显著,改正后的相位 STD 反而提高,最差的由改正前 1.8 rad 增加至 3.9 rad,出现这种负影



(a) 改正前后相位 STD 分布图

图 3 对 300 对干涉图进行 GACOS 大气改正效果

Fig.3 Results of GACOS Atmospheric Correction for 300 Interferograms

从表 1 可以看出,对联合估计得到的大气相位改正后有 37 对干涉对相位标准差降低,最大降低约 40.5%,虽然剩余的 13 对干涉对改正后相位标准差提高,但是最差的仅提高了 2.06%,改正前后相位标准差变化在 1% 内的干涉对约占 84.21%。可见本文提出的联合估计算法可以有效地抑制大气误差的影响,但同时在大气效应不明显的情况下不会错估,从而引入相位误差。而大多数干涉对估计的大气相位较小是由于研究区地形平坦,垂直分层效应不明显,湍流大气占据主导地位,可以在后续步骤中利用时空滤波方法进一步削弱。

为进一步评价算法,又选取影像覆盖范围内地形起伏较大的区域(图 1 蓝色矩形区域)进行实验。该区域高程最低 436 m,最高 5 644 m,垂直分层大气效应明显,可以更好地检验本文算法的有效性。对所有干涉对进行 GACOS 大气改正,共有 34 对干涉对改正后相位标准差增加,最大的由改正前相位 STD 为 3.2 rad 增加到改正后的

响的干涉对有 50 对,占 16.7%。对这 50 对干涉对采用本文提出的方法进行估计,将估计的大气相位从解缠干涉相位图中扣除,并统计改正前后相位标准差,结果见表 1 和图 4(a)。

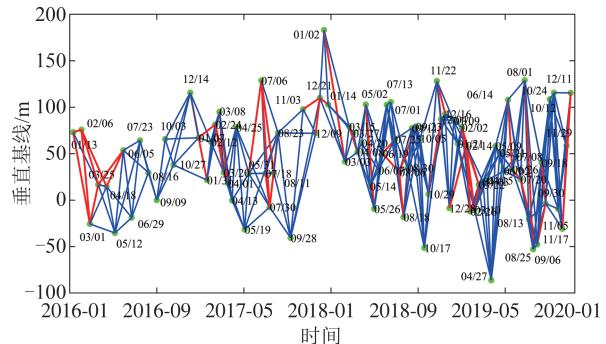
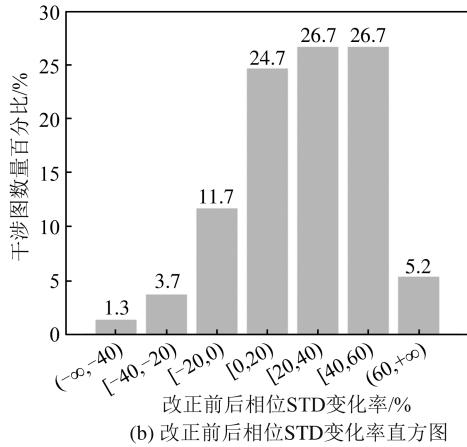


图 2 干涉对时空基线图

Fig.2 Spatial and Temporal Baselines of Interferograms



(b) 改正前后相位 STD 变化率直方图

图 3 对 300 对干涉图进行 GACOS 大气改正效果

Fig.3 Results of GACOS Atmospheric Correction for 300 Interferograms

9.2 rad。对这 34 对干涉对利用本文提出的算法进行估计,其改正前后的相位 STD 如图 4(b)所示。可以发现,在地形起伏明显地区,本文方法可以有效地抑制大气误差的影响,相位改善的干涉对占 68%,最高干涉对标准差降低了 95%。

采用 Bootstrap 方法^[25]分别计算改进前后沉降速率标准差的分布情况,结果如图 5 所示。在地形平坦的区域,见图 5(a),约 87.8% 的像元沉降速率标准差降低;在地形起伏明显区域,见图 5(b),效果更明显,最大改善了 1.4 mm/a,约 85.7% 的像元沉降速率标准差降低。显示了本文算法无论在垂直分层大气效应是否明显的情况下,均能取得很好的结果。

3.2 成都城区及周边区域沉降分析

获取的成都市中心城区及周边区域形变速率分别如图 6 和图 7 所示。

从图 6(a)可以发现,整个成都平原地区在 2016 年以后地表形变较为平稳,最大下沉速率约为 11 mm/a,抬升速率约为 8 mm/a,而成都市城

表1 干涉对改正前后相位STD/rad

Tab.1 Phase STD of Interferograms Before and After Correction/rad

干涉对	改正前STD	改正后STD	干涉对	改正前STD	改正后STD
20160113—20160206	1.64	1.34	20180619—20180725	5.70	5.68
20160113—20160301	1.67	1.70	20180619—20180806	6.38	6.41
20160206—20160301	1.83	1.64	20180806—20180818	6.56	6.47
20160206—20160325	2.51	1.49	20180806—20180923	5.72	5.72
20160206—20160418	3.13	2.18	20180818—20180830	6.47	6.36
20160301—20160325	2.44	2.48	20181029—20181204	2.66	2.65
20160325—20160605	2.65	2.61	20181122—20181204	1.79	1.78
20160418—20160605	2.74	2.72	20181122—20181216	1.20	1.21
20161214—20170107	2.72	2.73	20181228—20190214	2.50	2.48
20170107—20170131	1.66	1.66	20190202—20190214	2.66	2.67
20170107—20170224	2.41	2.42	20190202—20190310	1.48	1.47
20170224—20170320	1.50	1.51	20190202—20190322	3.66	3.67
20170224—20170401	1.63	1.61	20190214—20190226	3.22	3.21
20170308—20170401	1.77	1.76	20190214—20190310	3.59	3.59
20170531—20170706	12.39	12.39	20190214—20190322	3.77	3.75
20170706—20170730	12.28	12.23	20190226—20190415	2.43	2.44
20170706—20170811	11.16	11.13	20190310—20190322	4.13	4.12
20170718—20170730	4.44	4.42	20190614—20190626	3.97	3.99
20170730—20170823	4.22	4.20	20190626—20190720	4.46	4.46
20171103—20171221	4.64	4.60	20190720—20190906	5.66	5.64
20171209—20171221	2.28	2.28	20190801—20190825	5.58	5.55
20171221—20180114	3.22	3.22	20190906—20190930	3.35	3.35
20180102—20180303	1.65	1.64	20190918—20190930	2.49	2.51
20180315—20180408	1.44	1.43	20191117—20191211	2.77	2.72
20180502—20180526	4.02	4.01	20191129—20191211	1.84	1.88

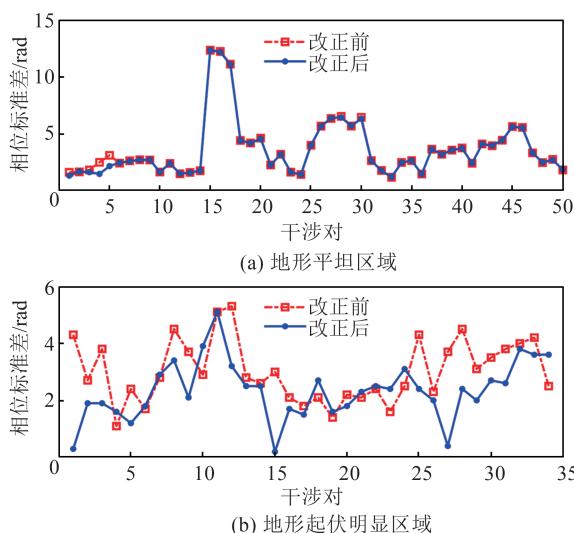


图4 改进前后相位标准差

Fig.4 Phase Standard Deviation Before and After Improvement

区(C区域)整体形变速率为0~5 mm/a,大部分监测区域稳定。成都平原地区轨道交通网密集,交通网络越密集的地区,其地表形变往往表现略微抬升,结合图6(b),可以发现这些地区往往也是城镇密集、经济发展较快的地区。在城市区域均

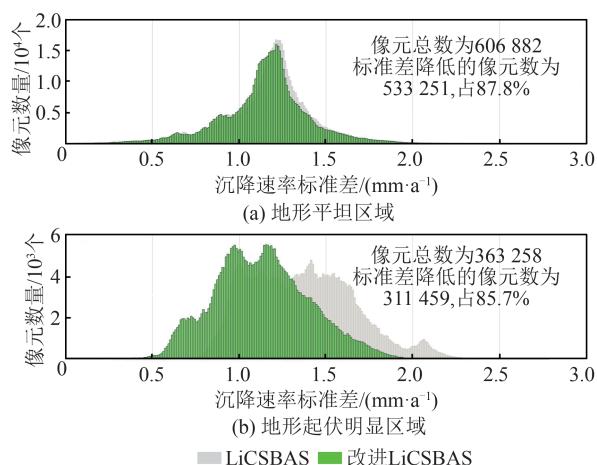


图5 改进前后LiCSBAS沉降速率标准差分布图

Fig.5 Distribution Maps of Standard Deviation of Settlement Rate Before and After Improved LiCSBAS

出现这种微小抬升的现象,除了残余的大气误差影响以外,还有以下两种原因。首先,是城市建筑物密集且在空间分布上具有相关性,使用的外部DEM数据与城市真实高程相差较大,而LiCSBAS简单地将其作为随机噪声无法予以消除,会存在残余地形相位的影响;其次,有城市地表温

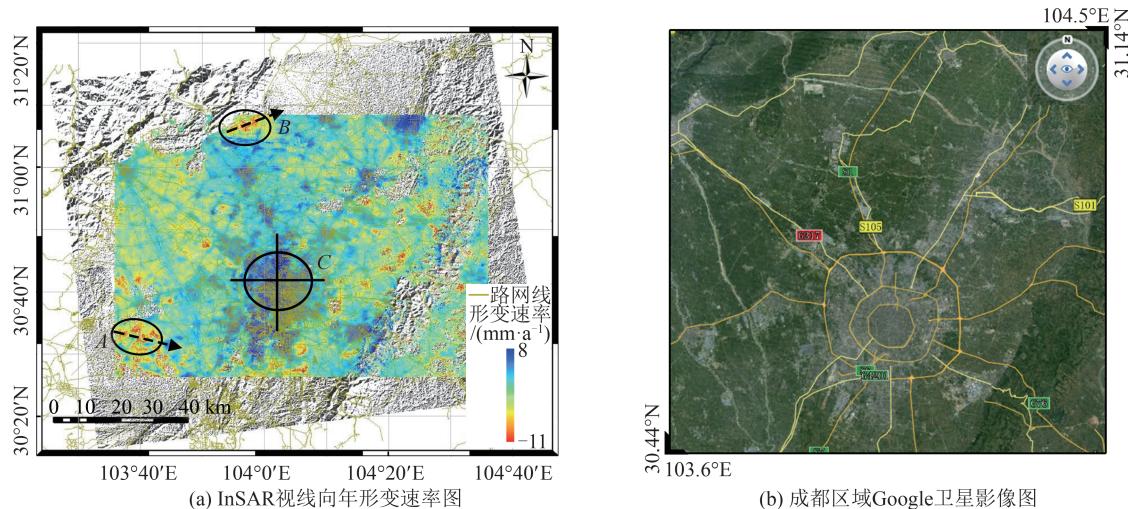


图6 研究区2016—2020年地表形变速率场

Fig.6 Surface Deformation Velocity Field of Study Area from 2016 to 2020

度因素的影响。从整个研究区的地表位移时间序列上看(图7),由于成都平原所处的地块稳定,研究区中95%以上的地区累计沉降量都很小,而且年际变化不大,这与已有的研究结果相吻合^[14-15]。相较而言,有两个时期地表发生轻微变化。第1个时期在2018-05—2018-09,研究区中部地区发生轻微沉降,随后逐渐变得平稳;第2个时期在2019-03—2019-09,成都市城区附近地表发生轻微的抬升,这可能是城区建筑物发生的季节性温度形变引起的,同时该地区高层建筑物分布密集,高层建筑在风力载荷的作用下会在雷达视线方向上发生摆动,也是造成出现此现象的原因。同时图6上也出现几个面积较大的区域沉降地区,如A、B地区。已有的研究资料表明,成都平原地区并非前陆坳陷区,不具备区域沉降的构造条件,其基底正断裂不发育或不活动,不存在区域性沉降的诱因。而且周围地区近几年并没有发生震级较大的地震,较早发生的汶川地震虽然在短期内导致上方的成都平原地表有逐渐抬升的趋势,但在本文的监测时间跨度内影响很微小。因此,导致这两个地区沉降主要是人为原因。对A、B地区,本文按图6(a)剖线方向,依次选取几个点进行形变时序分析,如图8所示。

A地区在监测周期内最大沉降约20 mm,主要在成都市大邑县蔡场镇-韩场镇-董场镇一带,该区域耕地面积大,是中国著名的“食用菌之乡”,产业用水量大,且双流国际机场几年前刚进行了大规模扩建。相较A地区,B地区沉降幅度更为明显,最大达到了30 mm。B地区主要集中在成都市双流区的新兴镇-通济镇-磁峰镇一带,该地区地理位置优越,尤其在2014—2017年,该

地区全面推进征地拆迁补偿工作和土地平整工作,加上大型工程和产业项目建设,是造成该地区发生地表沉降的主要因素。对于成都市城区形变情况,本文主要沿着南北(S-N)、西东(W-E)两个方向做剖线,其沿线形变速率情况主要如图9所示。

从图9(b)、9(c)可以发现,两个剖线上形变速率最大为4~5 mm/a,整体变化不大,主要表现为地表略微抬升,靠近城区内部形变速率逐渐增大。为了更直观地反映监测周期内各个时间的地表变化情况,同图8一样,在W-E和S-N剖线方向上依次选取像元分析时序位移,见图10。

虽然在整个时间跨度上,成都城区在W-E和S-N方向上形变速率为4~5 mm/a,但是从图10可以看出,在2016年8月以后,地表表现很稳定,累计沉降量很小,这与已有的研究结果相吻合^[16]。同时从图10还可以发现,形变序列受到周期性形变的影响,如2016年、2017年、2018年和2019年的8月份左右序列都表现出略微的下沉,这也表明LiCSBAS时序分析方法具有捕捉周期或季节性形变信号的能力。

4 结语

本文主要基于LiCSAR产品进行长时间序列分析,简化了一般的时序分析流程中的预处理过程,避免了大量磁盘空间消耗,大大提升了数据处理效率。在时序分析中,本文介绍了时序分析新方法LiCSBAS,并在此基础上提出了一种可以联合估计形变参数和大气相位的方法。分别在成都平原地区和地形起伏较大的区域验证

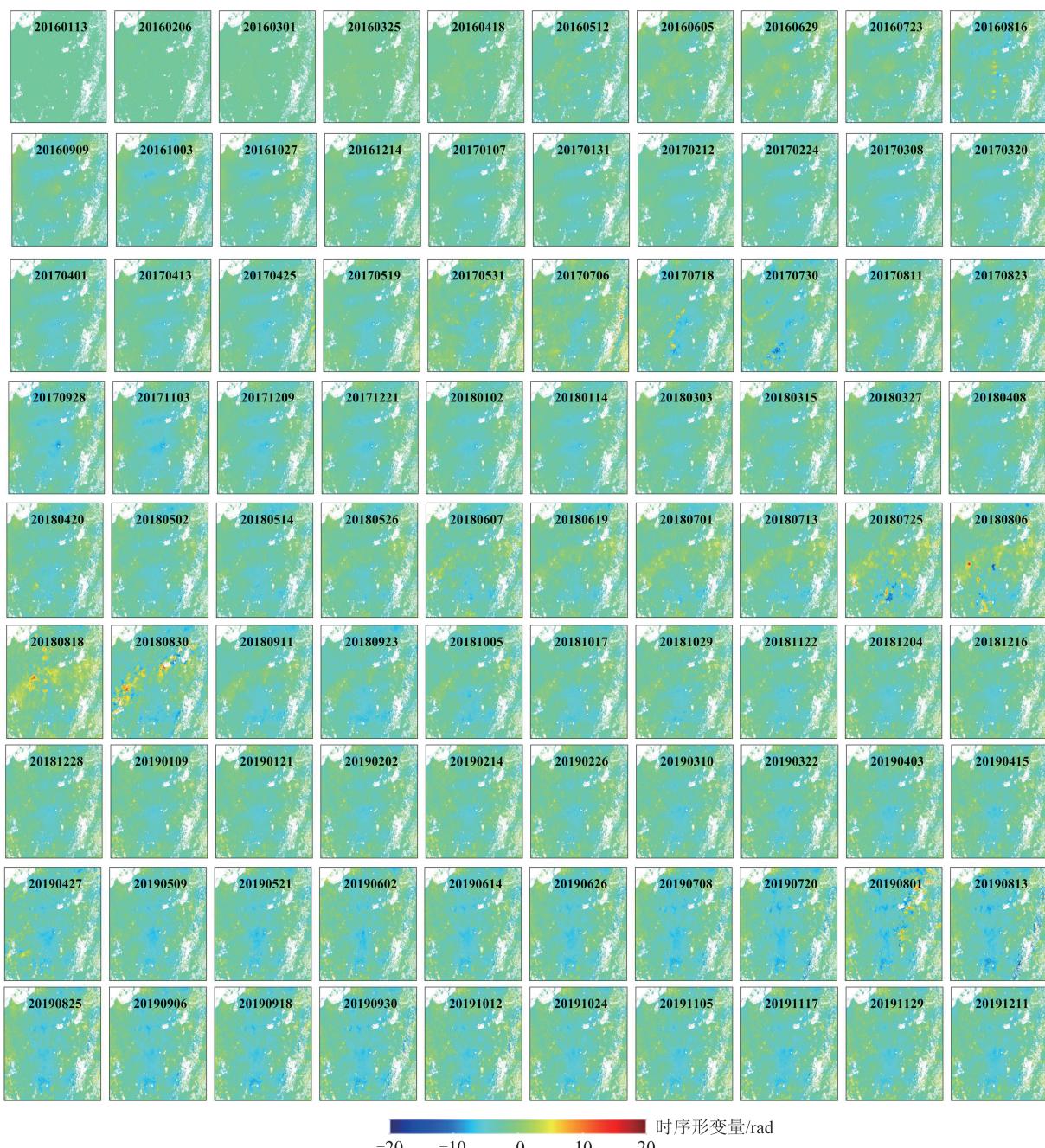


图7 研究区视线方向时序形变序列

Fig.7 Time Series of Deformation of Study Area in the Line of Sight Direction

方法的有效性，并获取成都城区及周围区域地面形变的分布特征及时间演化规律。主要结论如下：(1)本文提出的方法在地形起伏明显地区可以有效地抑制大气误差的影响，相位改善的干涉对占68%，最高干涉对标准差降低了95%，约85.7%的像元沉降速率标准差降低；在地形平坦地区，相位改善的干涉对占62%，干涉对最高标准差降低了40.5%，约87.8%的像元沉降速率标准差降低。虽部分干涉对改正后相位标准差提高，但是效果最差的干涉对才提高了2.06%，在1%内的干涉对约占84.21%，显示了该算法在大气效应明显的情况下可以有效地估计大气误差，

在大气效应不明显的情况下不会错估而明显地引入相位误差；(2)2016—2020年，成都城区及其周围监测区域表现较为稳定，累积形变量很小，变化在1 cm之内，成都城区因城市化建设的原因，地表表现为轻微抬升，形变速率最大为4~5 mm/a；(3)LiCSAR产品适合于大区域地表形变情况的调查，但是其在生成过程中进行降采样（如多视）处理，很难满足精细监测的需求；(4)LiCSBAS分析方法易于实施，在长时间序列分析中，具有探测周期或季节性形变的能力，可以满足大量获得Sentinel-1影像的数据处理，丰富了多时相InSAR的解算方法。

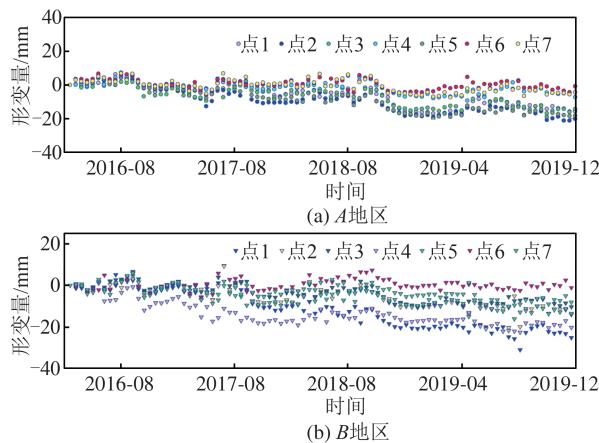


图8 A、B地区时序形变分析

Fig.8 Time Series Deformation Analysis of A and B Areas

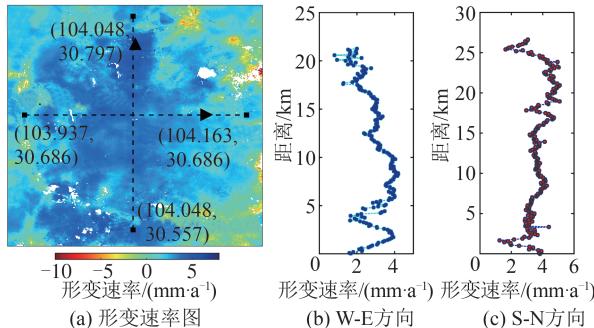


图9 成都市城区2016—2020年形变速率场

Fig.9 Deformation Rate Field of Chengdu City from 2016 to 2020

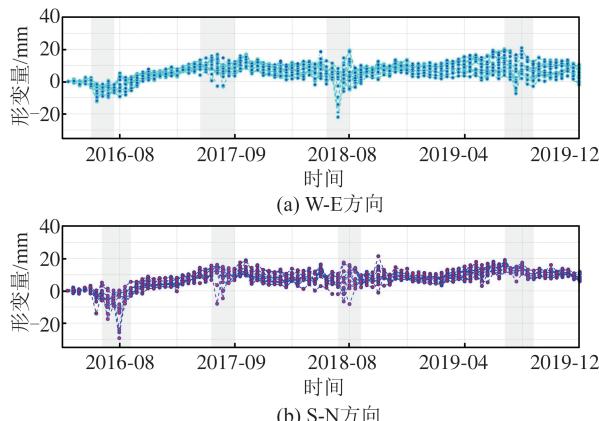


图10 城区W-E和S-N方向上各点时序形变情况

Fig.10 Time Series Deformation of Each Point in W-E and S-N Directions of Urban Area

本文提出的方法只适合存在少量未进行大气改正干涉图的情况,当数量较多时,会造成待估参数增多,致使解算方程病态化,造成解的不稳定。同时LiCSBAS分析方法在时序参数反演时,并没有考虑残余地形的影响,而是将其作为随机噪声予以消除。在城区尤其是建筑物密集的场景下,由于残余地形误差较大且在空间分布上具有相关性,残余地形相位会影响最终反演的精度,这些问题有待进一步研究。

致谢:感谢英国环境研究委员会地震火山构造观测与建模中心、英国LiCS空间对地观测网站提供的2016—2020年的LiCSAR数据;感谢英国纽卡斯尔大学提供的对流层延迟校正产品GACOS。

参 考 文 献

- [1] Hanssen R F. Satellite Radar Interferometry for Deformation Monitoring: A Priori Assessment of Feasibility and Accuracy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 6(3/4): 253–260.
- [2] Xu Xiaolan, Li Fei. Application of InSAR and DInSAR to Zhongba Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(7): 727–729. (许小兰, 李斐. InSAR及其差分技术在仲巴地震中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(7): 727–729.)
- [3] Xiao Ruya, He Xiufeng. Deformation Monitoring of Reservoirs and Dams Using Time-Series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1334–1341. (肖儒雅, 何秀凤. 时序InSAR水库大坝形变监测应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1334–1341.)
- [4] Huang Q H, Crosetto M, Monserrat O, et al. Displacement Monitoring and Modelling of a High-Speed Railway Bridge Using C-Band Sentinel-1 Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128: 204–211.
- [5] Qin Xiaoqiong, Yang Mengshi, Wang Hanmei, et al. Application of High-Resolution PS-InSAR in Deformation Characteristics Probe of Urban Rail Transit [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(6): 713–721. (秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 等. 高分辨率PS-InSAR在轨道交通形变特征探测中的应用[J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 713–721.)
- [6] Zhou Zhiwei, Yan Ziping, Liu Su, et al. Persistent Scatterers and Small Baseline SAR Interferometry for City Subsidence Mapping: A Case Study in Panjin, China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 928–931. (周志伟, 鄢子平, 刘苏, 等. 永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(8): 928–931.)
- [7] Jiang Y N, Liao M S, Wang H M, et al. Deformation Monitoring and Analysis of the Geological Environment of Pudong International Airport with Persistent Scatterer SAR Interferometry [J]. *Remote Sensing*,

- 2016, 8(12): 1021.
- [8] Liao Mingsheng, Wang Ru, Yang Mengshi, et al. Techniques and Applications of Spaceborne Time-Series InSAR in Urban Dynamic Monitoring [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 409–424. (廖明生, 王茹, 杨梦诗, 等. 城市目标动态监测中的时序InSAR分析方法及应用[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 409–424.)
- [9] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B4): 7547–7563.
- [10] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [11] Song Xiaogang, Li Deren, Liao Mingsheng, et al. A Method to Correct Tropospheric Delay in SAR Interferometry from GPS Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 233–236. (宋小刚, 李德仁, 廖明生, 等. 基于GPS观测量的InSAR干涉图中对流层改正方法及其论证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(3): 233–236.)
- [12] Xu Wenbin, Li Zhiwei, Ding Xiaoli, et al. Correcting Atmospheric Effects in ASAR Interferogram with MERIS Integrated Water Vapor Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5): 1073–1074. (许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用MERIS水汽数据改正ASAR干涉图中的大气影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1073–1074.)
- [13] Mateus P, Nico G, Tome R, et al. Approaches to Mitigate Atmospheric Artefacts in SAR Interferograms: GPS vs. WRF Model [C]//Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 2009.
- [14] Xue Lian, Wu Sen, Tang Qiao, et al. The Deformation Monitoring of Chengdu City Based on PS-InSAR [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2019, 39(3): 512–517. (薛廉, 吴森, 唐侨, 等. PS-InSAR技术在成都市地面形变中的监测应用[J]. 四川地质学报, 2019, 39(3): 512–517.)
- [15] Sun Xiaopeng, Lu Xiaoya, Wen Xuehu, et al. Monitoring of Ground Subsidence in Chengdu Plain Using SBAS-InSAR [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(3): 123–129. (孙晓鹏, 鲁小丫, 文学虎, 等. 基于SBAS-InSAR的成都平原地面沉降监测[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 123–129.)
- [16] Pan Chao, Jiang Liming, Sun Qishi, et al. Monitoring and Analyzing Chengdu Ground Subsidence Based on InSAR Technology by Using Sentinel-1 Radar Image [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 198–203. (潘超, 江利明, 孙奇石, 等. 基于Sentinel-1雷达影像的成都市地面沉降InSAR监测分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(2): 198–203.)
- [17] Wegmüller U, Werner C, Strozzi T, et al. Sentinel-1 IWS Mode Support in the GAMMA Software [C]//The 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Singapore, 2015.
- [18] Yu C, Penna N T, Li Z H. Generation of Real-Time Mode High-Resolution Water Vapor Fields from GPS Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(3): 2008–2025.
- [19] Yu C, Li Z, Penna N, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(10): 9202–9222.
- [20] Morishita Y, Lazecky M, Wright T, et al. LiCS-BAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 424.
- [21] Chen C W, Zebker H A. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1709–1719.
- [22] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Li Zhenhong, et al. Detection and Correction of Phase Unwrapping Errors in InSAR Time Series Analysis with Discrete Coherent Points [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1199–1203. (李永生, 张景发, 李振洪, 等. 时序InSAR离散相干点相位解缠误差检查与校正方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(10): 1199–1203.)
- [23] López-Quiroz P, Doin M P, Tupin F, et al. Time Series Analysis of Mexico City Subsidence Constrained by Radar Interferometry [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(1), DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.02.006.
- [24] Jolivet R, Lasserre C, Doin M, et al. Shallow Creep on the Haiyuan Fault (Gansu, China) Revealed by SAR Interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B6): B06401.
- [25] Efron B, Tibshirani R. Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy [J]. *Statistical Science*, 1986, 1(1): 54–75.