



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：中国第一代全球大气再分析数据在 InSAR 大气改正中的应用研究：以南加州地区为例

作者：袁煜伟, 李志伟, 母岷政

DOI: 10.13203/j.whugis20230154

收稿日期: 2023-04-26

网络首发日期: 2024-01-18

引用格式: 袁煜伟, 李志伟, 母岷政. 中国第一代全球大气再分析数据在 InSAR 大气改正中的应用研究：以南加州地区为例[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230154>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230154

引用格式：袁煜伟，李志伟，母岷政. 中国第一代全球大气再分析数据在 InSAR 大气改正中的应用研究：以南加州地区为例[J]. 武汉大学学报（信息科学版），DOI:10.13203/J.whugis20230154

YUAN Yuwei, LI Zhiwei, MU Minzheng. Application of China's First Generation Global Atmospheric Reanalysis Data in InSAR Atmospheric Correction: A Case Study of Southern California[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, DOI:10.13203/J.whugis20230154

中国第一代全球大气再分析数据在 InSAR 大气改正中的 应用研究：以南加州地区为例

袁煜伟¹ 李志伟¹ 母岷政¹

¹ 中南大学地球科学与信息物理学院，湖南 长沙，410083

摘要：大气延迟是合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）地表形变监测的主要误差源之一。提出采用中国第一代全球大气再分析业务系统（CRA40）数据改正 InSAR 对流层延迟，并以南加州 SBAS-InSAR 地表变形监测为例，进行了详细分析与评估。首先提出了利用该产品计算对流层延迟的方法，通过顾及大气参数垂直分层及水平变化的物理特性，分别对该产品原始气象参数进行垂直向和水平向的插值，沿卫星视线方向积分计算大气延迟，通过与原始干涉图差分，得到大气改正结果；其次将结果从干涉图标准差、空间相关性和相位-高程相关系数三个方面进行误差分析；最后利用 Sentinel-1 数据进行南加州形变测量实验，将本文方法与经典 SBAS-InSAR 结果对比，使用 GPS 数据进行验证。结果表明：（1）校正后的干涉图平均标准差减小了 34.7%，65%的干涉图平均标准差减小了 20%以上；（2）干涉图空间结构函数的期望平方差显著性下降表明该产品能有效抑制长波大气；（3）相关性的拟合系数变化表明该产品能够有效降低高程影响带来的大气垂直分层分量；（4）说明利用分辨率较低的全球大气模型数据进行大气改正时考虑对流层空间变化的有效性。所得结果说明了 CRA 产品在 InSAR 大气校正上的可行性。

关键词：CRA；SBAS-InSAR；大气改正；变形监测；统计指标

中图分类号：P237

文献标识码：A

Application of China's First Generation Global Atmospheric Reanalysis Data in InSAR Atmospheric Correction: A Case Study of Southern California

YUAN Yuwei¹ LI Zhiwei¹ MU Minzheng¹

¹ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Objectives: Atmospheric delay is one of the main error sources in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) surface deformation monitoring. Using the global meteorological model to correct the tropospheric delay has been successfully applied in recent years. In this paper, an InSAR atmospheric correction method is presented, which introduces China's first Generation Global Atmospheric reanalysis data (CRA). Taking into account the physical characteristics of tropospheric meteorological parameters, the method was tested in Los Angeles, Southern California, and evaluated quantitatively. The results show the feasibility of CRA products in InSAR atmospheric correction. **Methods:** The meteorological parameters such as temperature, water vapor and air pressure are obtained by CRA, taking into account the spatial variation characteristics of atmospheric parameters, according to the vertical stratification characteristics of meteorological data, the piecewise function is used to interpolate in the vertical direction. By considering the spatial variability of the atmosphere, the interpolation is carried out in the horizontal plane. According to the results, the atmospheric delay is calculated along the satellite line of sight. The atmospheric correction result is obtained by difference with the original interferogram. Verify and analyze the results, first, the error analysis is carried out from three aspects: Interferogram standard deviation, spatial correlation and phase-elevation correlation coefficient; second, it is compared with the results of GACOS and PyAPS methods; Finally, 78

收稿日期：2023-04-26

项目资助：国家杰出青年学者科学基金(41925016)；国家自然科学基金(42330112)。

第一作者：袁煜伟，硕士，研究方向为 InSAR 大气改正。xiaoyuan2020@csu.edu.cn

通讯作者：李志伟，博士，教授。zwli@csu.edu.cn

interferograms obtained from 40 scenes Sentinel-1 data of Southern California based on short baseline principle are used to carry out sequential deformation measurement experiments, the proposed method is compared with classical SBAS-InSAR results, and verified by GPS data. **Results:** The results show that: (1) The average standard deviation of the corrected interferogram is reduced by 34.7%, The average standard deviation of 65% interferograms has been reduced by more than 20%, especially for the interferograms which are seriously affected by the atmosphere. It is better than GACOS and PYAPS with an average improvement of 30%. (2) The significant decrease of the expected square variance of the spatial structure function of the interferogram shows that the product can effectively suppress the long-wave atmosphere. (3) The change of fitting coefficient of correlation shows that the product can effectively reduce the atmospheric vertical stratification component caused by the influence of elevation. Depending on the degree of atmospheric influence, CRA can improve the vertical stratification component of the atmosphere, ranging from 20% to 60% or more. (4) It is effective to take the spatial variation of convection into account when establishing a high-resolution InSAR tropospheric delay map using low-resolution global atmospheric model data. **Conclusions:** This paper confirms that CRA can correct and improve the overall accuracy of deformation monitoring. Through quantitative evaluation, researchers can fully understand the correction effect and performance of this product, which is helpful to promote the application and development of this product. However, due to the differences of external data, follow-up research can combine GNSS data with CRA solution to further improve the accuracy of InSAR atmospheric correction.

Key words: CRA; SBAS-InSAR; Atmospheric correction; Deformation monitoring; Statistical index

合成孔径雷达干涉测量 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术具有全天时和全天候的成像能力、广泛的空间覆盖能力、精细空间探测能力的优势^[1]。现已被广泛用于应用于地球科学领域,如监测由地震、火山、滑坡、冰川运动和地下水资源开采等引起的地表变形^[2-8]。但在实际传播过程中受到非均质性的吸收、散射、折射等作用,影响了电磁波的传播路径和传播速度,大气对流层中的温度、压强和水汽的时空变化导致了 InSAR 对流层延迟^[9-10]。

InSAR 对流层延迟改正可以大致分为两类:一类是基于大气延迟时空特性的 SAR 数据改正法^[11],另一类是基于外部数据集以校正干涉图中的对流层大气延迟方法。前者利用相应的函数模型^[12-14]以及随机模型^[15-16],或者利用其特性进行相应的时空滤波等^[17-18]。面对如地震这类突发情况需使用 D-InSAR 时无法满足,此外,大气通常表现出季节特性,例如夏季连续多景 SAR 影像受到严重大气影响时也无法使用。后者主要来自地面观测数据^[19-21]、星载成像光谱仪^[22-23]以及全球大气模型 (GAM)^[24-27]。但是地面观测数据站点的密度通常较为稀疏,空间分辨率过低,星载成像光谱仪只能提供白天数据,又容易受到云污染的影响,因而高精度高时间分辨率且全球覆盖的数值气象模型成为了首选。

在使用产品方面,中国在 2021 年发布了第一代全球大气和陆面再分析产品 (CRA) 及业务系统,填补了我国在全球大气再分析领域的空白,打破了长期以来对国外再分析产品的依赖,但是该模型在 InSAR 大气改正方面的研究尚未见报道^[28-30]。同时,由于观测空间分辨率不一致,需对气象参数进行空间上的插值处理,目前已有研究通常采用纯数学插值方法,没有顾及到气象参数在垂直方向上的分层物理特性以及水平向大气的变化。

因此针对上述不足,本文使用了 CRA 产品通过顾及大气参数垂直分层及水平变化的物理特性,分别对该产品原始气象参数进行垂直向和水平向的插值,沿卫星视线方向积分计算大气延迟,将结果从干涉图标准差、空间相关性和相位-高程相关系数三个方面进行误差分析;并以南加州地区 SBAS-InSAR 为例和 GPS 的结果进行比较。通过探讨 CRA 在 InSAR 大气改正方面的应用并评估其效果,为利用全球大气模型进行 InSAR 大气改正提供了更多选择,说明了 CRA 产品在对流层延迟改正中的有效性,对促进该产品的应用和发展具有重要的意

义，可为今后使用该模型在 InSAR 对流层延迟改正时提供参考。

1 基于 CRA 的 InSAR 大气改正方法

1.1 CRA 数据处理

对流层延迟正是电磁波穿过对流层时由速度变化引起的，主要由干延迟和湿延迟组成，其与沿传播路径空气折射率 N 的积分呈线性关系，而空气折射率的变化可由对流层中温度、压力和湿度的变化所表示^[31]，因此可以通过沿地面点和成像卫星之间的视线（LOS）方向的大气对流层参数计算相应的对流层延迟。

考虑到由于 CRA 输出时间和 SAR 采集成像时间存在差异，使用最接近 SAR 成像时间的两个该模型输出数据进行时间线性插值。

为使用格网化的数值气象产品积分计算延迟，需要将 CRA 输出的气象参数将等压层转换为等高度层。在垂直方向上，结合 1976 标准大气模型利用分段拟合函数进行气象参数的插值^[32]。选取的高度层由不同海拔高度进行采样确定，采样步长从 -200 m 增加到 40 km：海拔在 -200 m 到 5 km 之间的采样步长为 200 m，海拔在 5~10 km 之间为 500 m，海拔 10~20 km 为 1 km，海拔 20~40 km 为 5 km，共计 51 层。

对温度进行插值，参考使用较广泛的美国 1976 年标准大气，其表示了中等太阳活动期间，由地面到 1000 km 的理想化、静态的中纬度平均大气结构，此标准大气的 32 km 高度以下与 50 km 高度以下部分分别与国际民用航空组织标准大气 (ICAO, 1964) 及国际标准化组织的标准大气 (ISO, 1973) 相同。在 11 km 以下，大气温度随高度降低；11~20 km 为等温大气；20~47 km 温度逐渐上升；47~51 km 处有极大值 270.65 K，随后又逐渐下降。由此本文构建了温度随高度变化的分段插值方法：

$$T_{m(t)} = \begin{cases} T_{m(i)} + \gamma_1 \times (\delta h_{(t)} - \delta h_{(i)}) & h < 11 \\ a_i + b_i(\delta h_{(t)} - \delta h_{(i)}) + c_i(\delta h_{(t)} - \delta h_{(i)})^2 + d_i(\delta h_{(t)} - \delta h_{(i)})^3 & 11 \leq h \leq 20 \\ T_{m(i)} + \gamma_2 \times (\delta h_{(t)} - \delta h_{(i)}) & h > 20 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $T_{m(i)}$ 为格网点高度处的 T_m 温度； $T_{m(t)}$ 为目标高度的 T_m ； γ_1 和 γ_2 分别为分段递减率； $\delta h_{(i)}$ 为格网高度； $\delta h_{(t)}$ 为目标高度， a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 代表 4 个拟合系数。

对气压进行插值，由于大气处于流体静力平衡时气压随高度变化的规律可由大气静力学方程表示，且其对于连续介质而言，在麦克斯韦速度分布律能成立的几百千米以内大气层中皆适用，因此构建了气压随高度变化的分段插值方法：

$$p_2 = \begin{cases} p_1 \times [1 - \frac{\gamma(z_2 - z_1)}{T_1}]^{\frac{g}{R_d \gamma}} & z < 11 \\ p_1 e^{-\frac{g}{R_d T}(z_2 - z_1)} & 11 \leq z \leq 20 \end{cases} \quad (2)$$

式中， z_1 和 z_2 分别表示两点高程； R_d 为常数项； T_v 为层间虚温； g 为重力加速度； γ 为气温直减率。

由于水汽在对流层内不同高度的下降速率有所不同，约有 90% 的水汽集中在 500 hPa（中纬度地区约 5 km）以下，其中 50% 的水汽集中在 850 hPa（约 1.5 km）以下。有学者论证过对流层顶以下使用三次多项式，在对流层顶拟合水汽天顶延迟时优于指数函数模型^[33]，因而使用三次多项式及高斯函数构建水汽插值模型：

$$e = \begin{cases} p_1 + p_2H + p_3H^2 + p_4H^3, & H \leq 5 \\ m_1 + m_2H + m_3H^2 + m_4H^3, & 5 < H \leq 11 \\ n_1 \exp\left(-\left(\frac{H-n_2}{n_3}\right)^2\right), & H > 11 \end{cases} \quad (3)$$

式中, z_1 和 z_2 分别表示两点高程; R_d 为常数项; T_r 为层间虚温; g 为重力加速度; γ 为气温直减率。

气象参数垂直插值后, 为计算沿 LOS 向的积分, 将每层格网点位置的气象参数水平插值至 LOS 向的位置, 相较于传统的线性插值而言, 考虑对流层参数的空间变异性, 通过利用 Xu 等^[13] 的简单局部平均 (SK1m) 算法来插值不同高度层的对流层参数 (温度、气压和水汽分压):

$$Z_{SK1m}^*(\varphi, L, h_k) = \sum_{i=1}^n u_i^{SK} [z(\varphi_i, L_i, h_k) - m_{SK}^*(\varphi_i, L_i, h_k)] + m_{SK}^*(\varphi, L, h_k) \quad (4)$$

式中, $Z_{SK1m}^*(\varphi, L, h_k)$ 为待预测的参数值; φ 、 L 、 h_k 分别为第 k 层的纬度、经度和海拔; u_i^{SK} 表示权值矩阵; $z(\varphi_i, L_i, h_k)$ 表示数值气象模型输出的参数值; $m_{SK}^*(\varphi_i, L_i, h_k)$ 为第 i 个样本位置的对流层参数局部平均值; $m_{SK}^*(\varphi, L, h_k)$ 为待预测位置的局部平均值。

u_i^{SK} 权重的确定通过理论预测的方差最小, 以及权重之和等于 1 两个条件进行约束。

每个高度的局部均值根据更直接与海拔相关的回归函数^[34] 进行建模。通过使用海拔相关的回归函数以表示对流层参数空间梯度上的局部变化^[35] :

$$Z_{(h)}^* = m_{SK}^*(\varphi, L, h_k) = Ce^{-\alpha h} + h\alpha Ce^{-\alpha h} + Z_{min} \quad (5)$$

式中, C 、 α 和 Z_{min} 分别为第 k 层可以通过回归分析进行估计输出的待估参数。通过上述垂直向插值以及水平向插值后, 即可得出所有 51 个高度层的 LOS 向气象参数, 进一步根据积分公式可以计算 LOS 向大气对流层延迟。

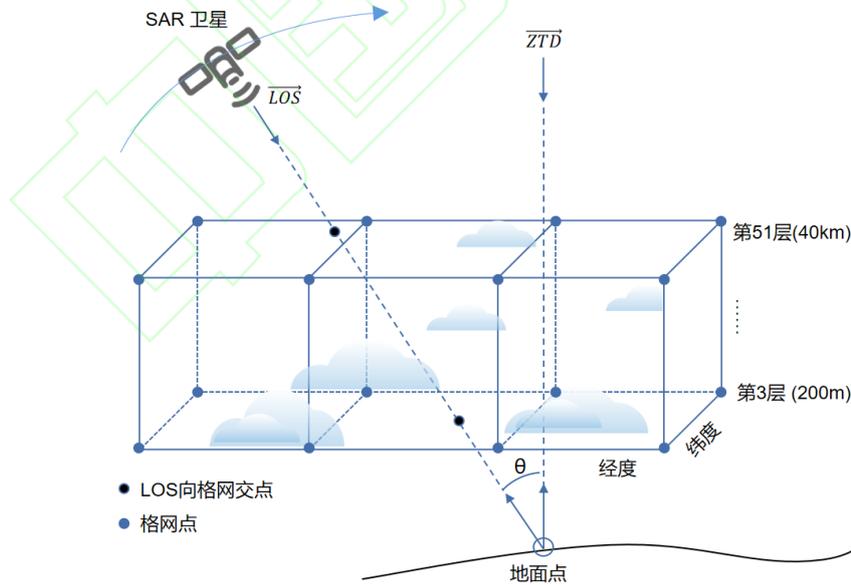


图 1 CRA 输出的高度水平网格点和沿地面点和成像卫星之间的 LOS 方向示意图

Fig.1 schematic diagram of CRA output of the high horizontal grid points and the direction of LOS between the ground points and the imaging satellite

1.2 InSAR 大气改正及效果评估

计算大气对流层延迟后, 通过双线性插值获取相对 SAR 数据相对分辨率的相位延迟, 通

过在 SAR 坐标系中进行地理编码, 最终获取对应干涉图的对流层大气延迟图。对于在时间 t_1 和 t_2 ($t_2 > t_1$) 处的 SAR 图像构成干涉对, 图中像素 (x, y) 处的大气校正相位可以表示为:

$$\Delta\Phi_{\text{CRA},t_1,t_2}(x, y) = \Phi_{\text{CRA},t_2}(x, y) - \Phi_{\text{CRA},t_1}(x, y) \quad (6)$$

基于 CRA 大气校正的干涉图是通过原始的干涉图与相应的大气校正图之间差分获取的。基于 CRA 的 SBAS-InSAR 的基本原理是将由上述改正的单个干涉图作为观测值, 并使用 SBAS 技术流程进行处理^[36]。

估计 InSAR 大气对流层延迟的准确性来源于多个方面, 如实验区域的对流层特性、实验的时空尺度以及使用外部数据的时空分辨率和准确性。基于大气的物理特性, 用于评估对流层校正质量的统计方法通常使用以下三个度量值^[37-40], 在此同样使用该三个指标评估分析使用 CRA 改正大气的效果。

1) 评估校正总体性能的相位标准差; 干涉相位的标准差通过反映干涉图的噪声水平被广泛用于评估 InSAR 大气校正的质量, 假设没有地表移动情况下, 大气延迟应该是主导信号, 标准偏差的降低表明校正后噪声水平降低^[40]。

2) 评估长波大气影响减小的空间结构函数; 标准偏差多用于评估干涉图的噪声水平, 但不能反映信号的空间结构。长波大气信号与距离有关, 是 InSAR 观测中最常见的误差源之一。为了分析空间相关性, 利用空间结构函数 (Spatial Structure Function, SSF) 进行分析, 其为协方差平稳的随机函数 $\Delta f(x)$ 的期望平方差^[11], 它将数据的变化表示为数据点之间距离的函数, 可以明确区分不同尺度上校正的效果, 并且不受间隙或不规则间隔数据点的限制。此空间结构函数也称为变异函数, 定义如下:

$$S(r) = E[(\Delta f(x) - \Delta f(x+r))^2] \quad (7)$$

其中, x 为参考点位置; r 表示相隔距离, 地统计学中最常用的 SSF 是半变异函数, 如下所示:

$$\gamma(r) = \frac{1}{2}S(r) = \sigma^2 - C(r) \quad (8)$$

半变异函数通常在一段距离 (称为变程) 后接近最大值, 这意味着距离大于变程的值之间没有相关性。在这个距离上的半方差值称为基台值。基台值的平方根与图像的总均方根相当。如果数据包含大规模空间信号 (如来自轨道误差或大规模大气影响的信号), 即数据中存在显著的趋势, 半变异函数将在与干涉图相当的尺度或更大的尺度上继续增大, 并且基台值有可能不存在。

3) 测量大气延迟分层分量减小的相位-高程相关系数。大气效应的分层分量是由位于不同高度的目标之间的垂直折射率差异造成的。高程达到 500 m 的高度差时, 相位差就可能达到 10 mm 以上。Jolivet 等^[25]2014 年估计了干涉相位和高程之间的相关系数, 作为湍流和垂直分层延迟之间比率的替代。使用相关系数可以描述干涉图中的相位高程的关联性, 若相关系数的绝对值越小, 表明干涉图中与地形相关的信号比例越低。如果相关性的绝对值在大气校正后减小, 则表示大气垂直分层分量的影响得到改正减弱。

2 南加州地区的 InSAR 大气延迟改正实验结果与讨论

2.1 实验区域及数据

本文选取美国南加州地区作为数据实验区域, 该地区靠近北太平洋, 位于地中海型气候带, 具有典型的大气效应, 同时该区域覆盖有大量的 GPS 观测站点, 利于后期结果的验证。SAR 数据来源欧空局在 2014 年发射的搭载了 C 波段的 SAR 卫星传感器的 Sentinel-1A 星座, 其对地观测重访周期为 12 d。本文从 ASF (Alaska Satellite Facility) 收集了覆盖南加州研究区的 T71 降轨的干涉宽幅模式 (Interferometric Wide swath, IW) 的单视复数影像

(Single Look Complex, SLC) 40 景。图像的时间跨度为 2017-06-08—2018-09-19。同时，收集了 SAR 成像时刻对应的精密轨道数据 (Precise Orbit Ephemerides, POD)。DEM 数据是由美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提供的 30 m 分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)。

此外，从国家气象信息中心 (<https://data.cma.cn>) 下载了对应时刻的中国全球大气再分析产品，通过上述方法计算大气延迟图像。选取 2018-01-22 为主影像，按照短基线原则，选取 78 个干涉对，通过 GAMMA 软件，利用 SRTM 30 m 分辨率的数据作为外部 DEM，进行 SBAS-InSAR 数据处理。

本文 GPS 数据下载自南加州综合 GPS 网络 (SCIGN, <http://www.SCIGN.org>)。SCIGN 已建立了 250 多个 GPS 连续观测站，以监测南加州的实时三维地表变形。本实验选择了研究区域内分布均匀的 38 个 GPS 连续观测站，GPS 站点在实验区域的分布如图 2 所示。为方便比较，将 GPS 测量的三维变形投影至 InSAR 数据 LOS 方向。

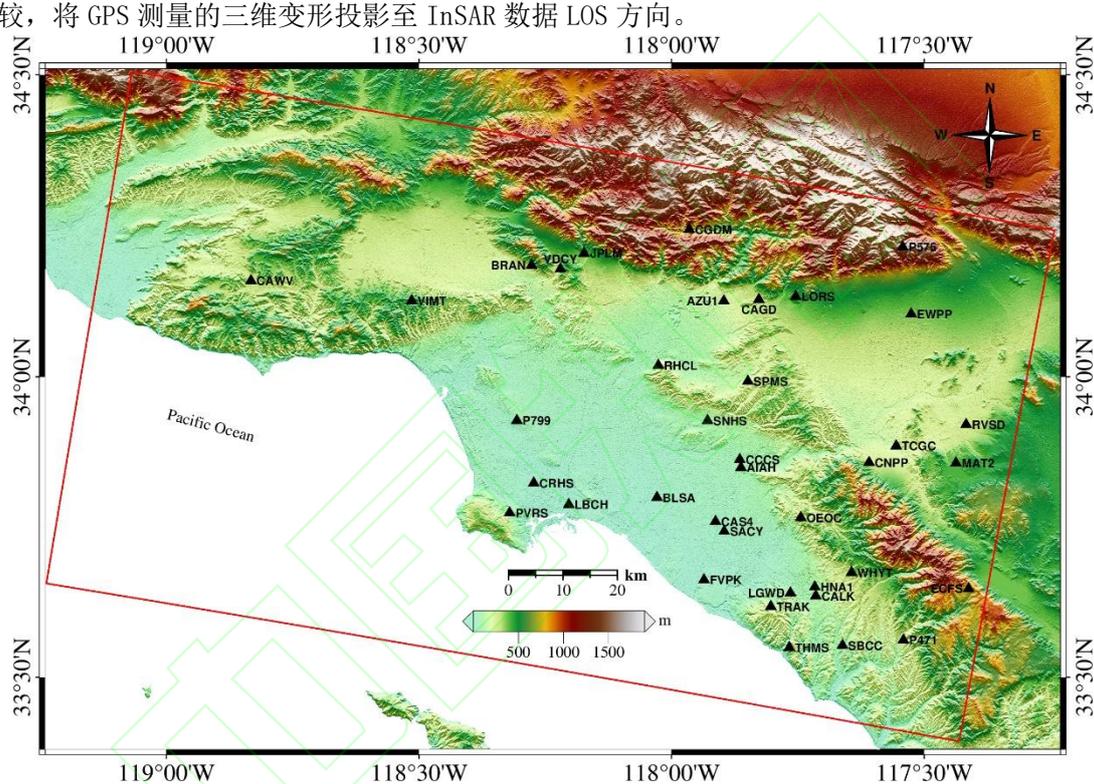


图 2 实验区域及南加州 GPS 站点分布地图

Fig.2 Experimental area and GPS site distribution map of Southern California

2.2 大气改正误差统计分析

2.2.1 干涉图相位标准差分析

图 3 显示了 CRA 校正前后全部 78 幅干涉图的标准偏差以及标准偏差的减少量。通过统计图可以观察到其存在明显的季节性特征，干涉图较高标准偏差对应时刻分别为 2017 年 7 月底至 9 月底，2018 年 7 月初至 2018 年 8 月底，其次在 2017 年 12 月左右的冬季也出现了波动。原因可能由地理气候环境导致，洛杉矶位于地中海型气候带，临近大洋的地中海气候区域，由于沿岸有寒流经过，受到海陆风的影响，夏季凉爽少日照而多雾；冬季时，西风从海洋上带来潮湿气流，锋面气旋活动频繁，气候多雨。在夏季和冬季获取的 SAR 影像大气影响更为严重。经过统计，差分干涉图的标准偏差和经 CRA 校正后的标准偏差平均值分别为 3.31 rad 和 2.15 rad。

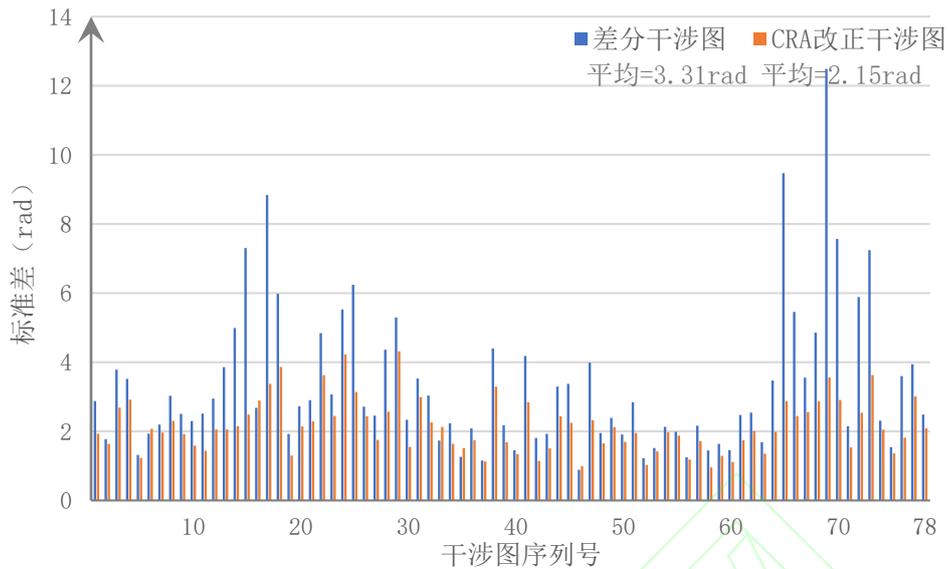


图 3 78 幅干涉图标准差统计

Fig. 3 Statistics of standard deviation of 78 interferograms

图 4 为改正前后的标准偏差减少量直方图，CRA 校正后 94%的干涉图标准偏差均得到有效减少，使用 CRA 校正后的干涉图平均标准差减小了 34.7%，表明 CRA 能够抑制干涉图中的大气影响。同时参考标准偏差变化与干涉图的标准偏差之比作为评价因子，如图 5 所示，结果表明，CRA 校正使干涉图标准偏差减少 20%~40%居多，占比 43.59%，其次是 0%~20%和大于 40%，分别占比 28.21%和 21.80%。65.4%的干涉图标准偏差减小了 20%以上。

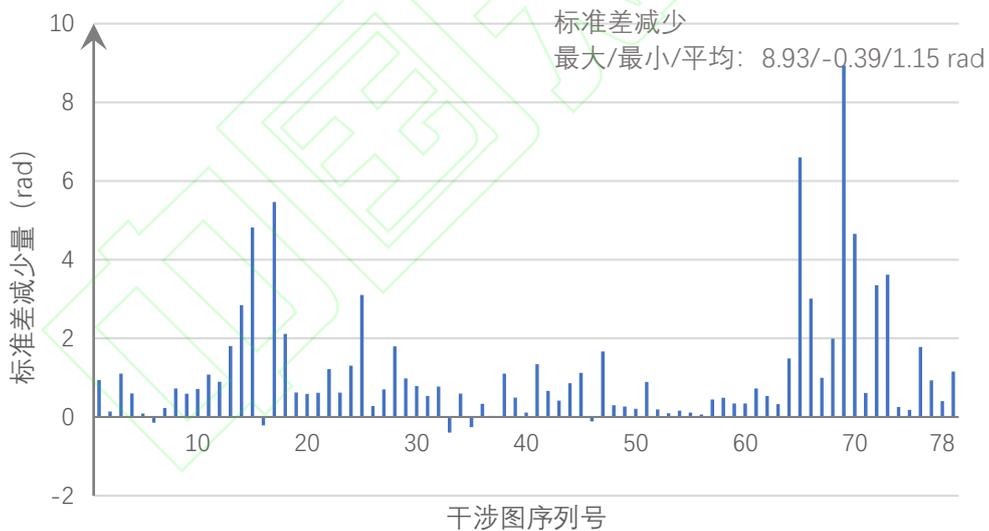


图 4 CRA 改正后的标准偏差减少量直方图

Fig. 4 Reduced histogram of standard deviation after CRA correction

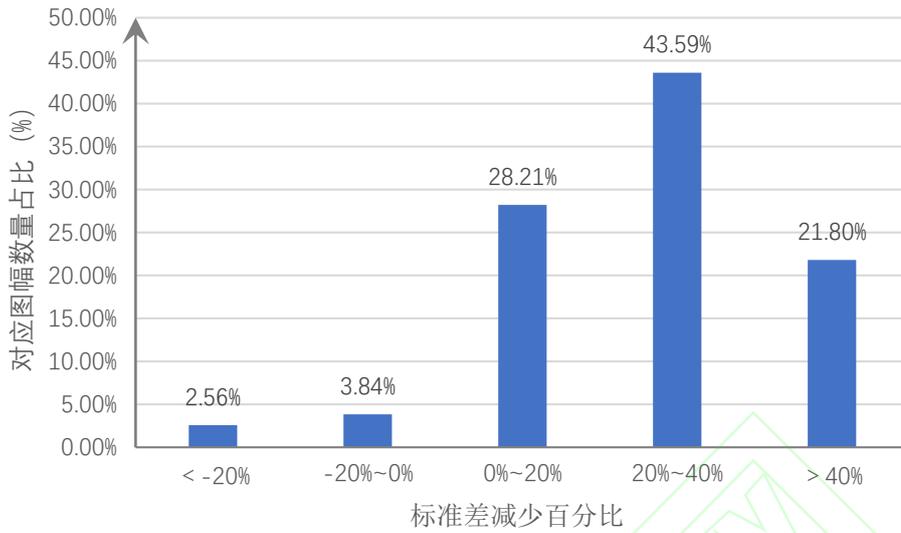


图 5 标准偏差减少占比数量直方图

Fig. 5 Standard deviation reduced proportion histogram

2.2.2 干涉图空间相关性分析

在此选取了相隔 12 天的 3 幅受沿海夏季影响，存在着典型的大气效应的干涉对进行评估，分别是 2017-07-14—2017-06-26、2017-07-26—2017-08-07、2017-08-31—2017-09-12。

图 6-8 是三幅差分干涉图和校正干涉图的空间结构函数的结果显示。可以明显看出，随着距离的提升，期望平方差在不断提升，但是对比差分干涉图和 CRA 改进后的干涉图，当距离在 40 km 之后，二者的期望平方差随着距离的增加不断提升，达到峰值后趋于平稳或是下降。原始干涉图的期望平方差峰值普遍在 120 rad^2 左右，而经过 CRA 改进后的干涉图期望平方差的峰值在 20 rad^2 左右，并且达到峰值的距离也由 70 km 左右缩短在 50 km 左右。

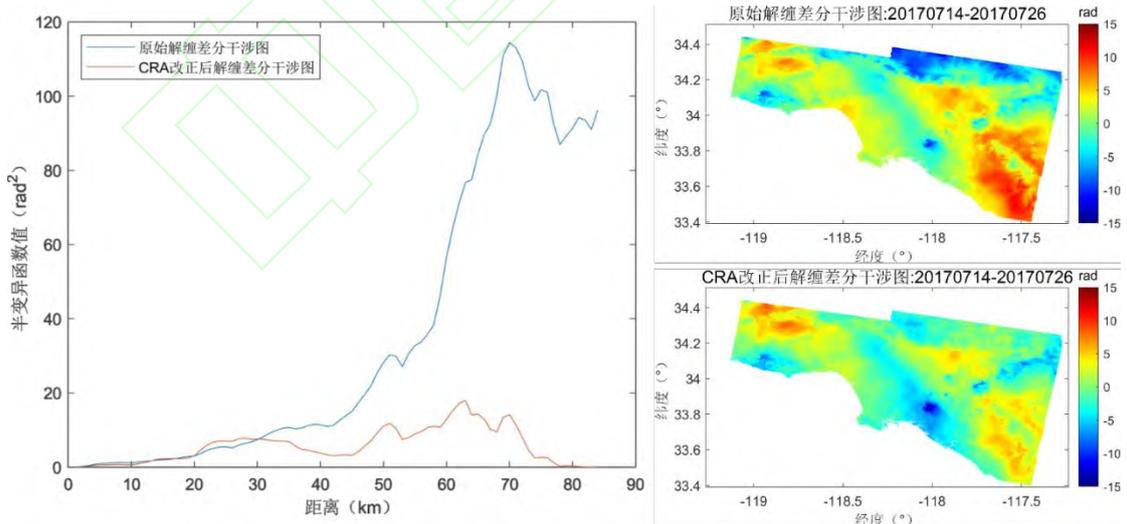


图 6 校正前后的空间结构函数统计图 (2017-07-14—2017-07-26 干涉对)

Fig. 6 Statistical diagrams of spatial structure functions before and after correction (2017-07-14—2017-07-26 interference pairs)

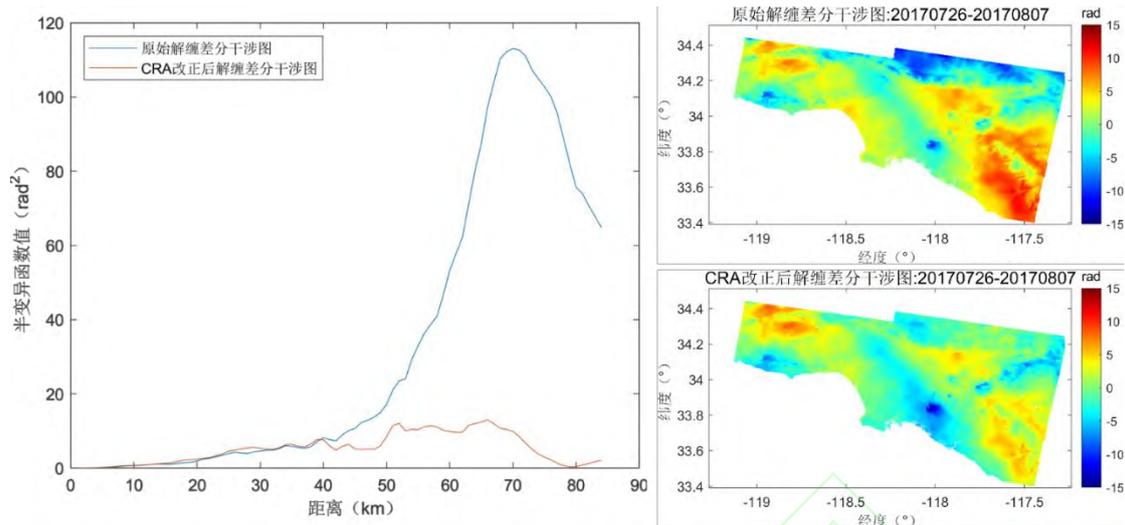


图 7 校正前后的空间结构函数统计图 (2017-07-26—2017-08-07 干涉对)

Fig.7 Statistical diagrams of spatial structure functions before and after correction (2017-07-26—2017-08-07 interference pairs)

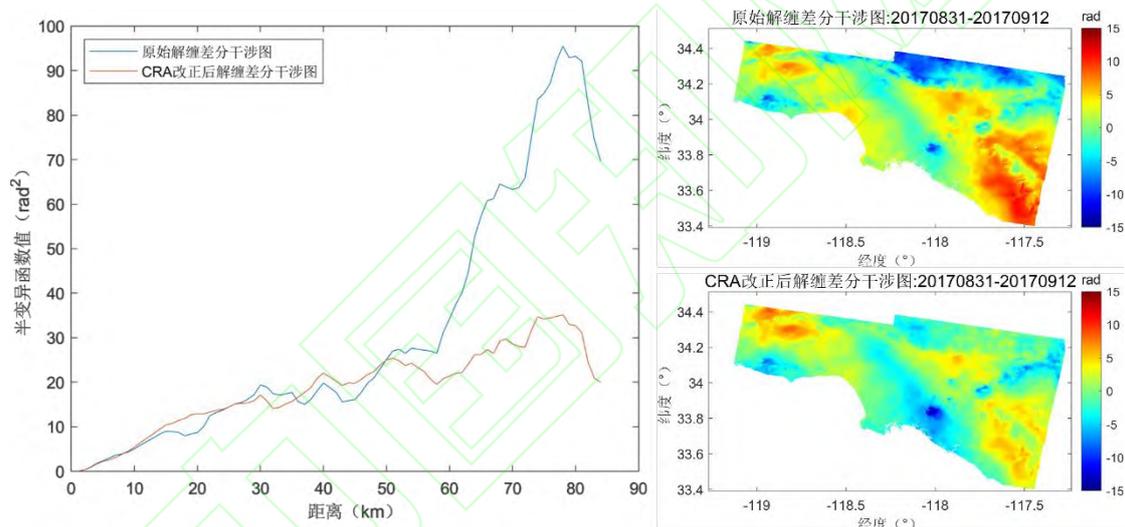


图 8 校正前后的空间结构函数统计图 (2017-08-31—2017-09-12 干涉对)

Fig.8 Statistical diagrams of spatial structure functions before and after correction (2017-08-31—2017-09-12 interference pairs)

本实验产生结果的原因可能有以下几点：一是由于 CRA 的空间分辨率在 34 km 左右，所以在参考点 40 km 左右开始期望平方差开始出现显著性差别。二是选择的参考点 (118.028° W, 33.927° N) 附近位于图幅近中央位置的参考点，图幅位置距参考点最大距离约为 90km。三是由于研究区域包含了部分海域，而随着距离渐远的情况下，当包含海域内时不参与计算，因此计算数目点减少，不稳定数目相比也减少，出现期望平方差降低，达到峰值后下降的情况。

2.2.3 相位-高程相关系数分析

对选取干涉图进行整幅计算相关系数评估，从图 9 可以看出，随着高程变化的相位部分得到 5~10 rad 的显著校正，整体相位的趋势更加平稳。从拟合的相关系数线来看，相关系数的绝对值得到显著降低，特别对于干涉图 2017-08-31—2017-09-12 而言，相关拟合系数从 -0.54 改进为 0.04，2017-06-20—2017-07-02 及 2018-02-03—2018-02-15 的干涉图幅幅也分别达到了 66%和 20%。

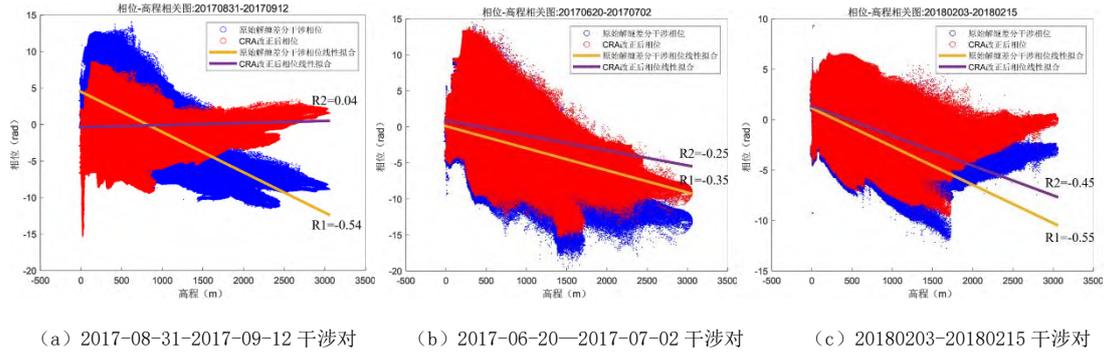


图 9 相位-高程相关系数分析图

Fig.9 Phase-elevation correlation coefficient analysis diagram

2.3 全球数值气象模型结果对比

在此给出了使用其他两种全球数值气象模型方法的对比结果，分别是使用 ECMWF 的 GACOS 和使用 ERA-Interim 的 PYAPS。

GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) InSAR 通用大气校正在线服务是英国纽卡斯尔大学李振洪教授团队开发。Yu 等^[41]在 2016 年提出了一种迭代的对流层分解内插模型 (ITD)，该模型将对流层延迟分量分解为高度相关的垂直大气和湍流大气两部分，进而根据区域内一组 GPS 参考站的逐点值对密集的 ZTD 场进行内插。并于 2017 年根据此 GPS 的插值方法，通过纳入数值气象数据而开发了通用的 InSAR 大气校正模型^[42]。其组合利用 GPS 和 HRES ECMWF 组合进行计算大气延迟。GACOS 为了结合 ECMWF 的高空间分辨率和 GPS 估计对流层延迟的高质量的优点，扩展了 ITD 方法向一体化模式转变。通过使用指数函数对地形相关的垂直分层延迟进行建模，然后通过剩余的延迟进行基于反距离加权 (IDW) 的内插来构造大气延迟的湍流部分^[43-43]。

PyAPS (Python-based Atmospheric Phase Screen mitigation library) 是 R. Jolivet 团队 2012 年开发，基于 PYTHON 的实现对流层分层校正软件包。其可以和欧洲中期天气预报中心的 ERA-Interim，美国国家环境预报中心的北美地区再分析数据 (NARR)，以及 NASA 的现代研究与应用回顾分析 (MERRA) 的输出一并使用^[44]。PyAPS 通过读取 DEM 并确定实验区域，获取时间上和 SAR 图像成像时间最近的时间处的来自气象再分析数据的温度、水汽分压和位势高度的数据，并将它们通过除以重力加速度内插到更精细的垂直尺度，并通过线性插值法及空气折射率 N 的积分方程计算每个网格点的 LOS 向延迟，针对不同采集时间对水汽图进行差分，最终以得出预测的干涉图对应的分层对流层延迟图。

对比结果如图 10-12 所示。总体来说，所有基于全球数值气象模型的校正都减少了数据中对流层大气延迟，特别在图示区域的左上方及右下方的山区部分，高程相关的大气得到明显抑制。对上述实验结果通过标准偏差 std 进行定量描述对比，结果如表 1 所示，整体 std 均得到有效降低。单个方法对比而言，GACOS 方法能取得一定效果，但同时可能存在如 2017-07-26—2017-08-07 干涉图中上方存在过度改正情况；PyAPS 方法对主要大气影响具有一定效果，但同时可能如 2017-08-31—2017-09-12 干涉图引入了西北至东南方向的误差情况。基于 CRA 的方法平均能改进 35%左右，较平均改进 30%的 GACOS 和 PYAPS 方法更佳。

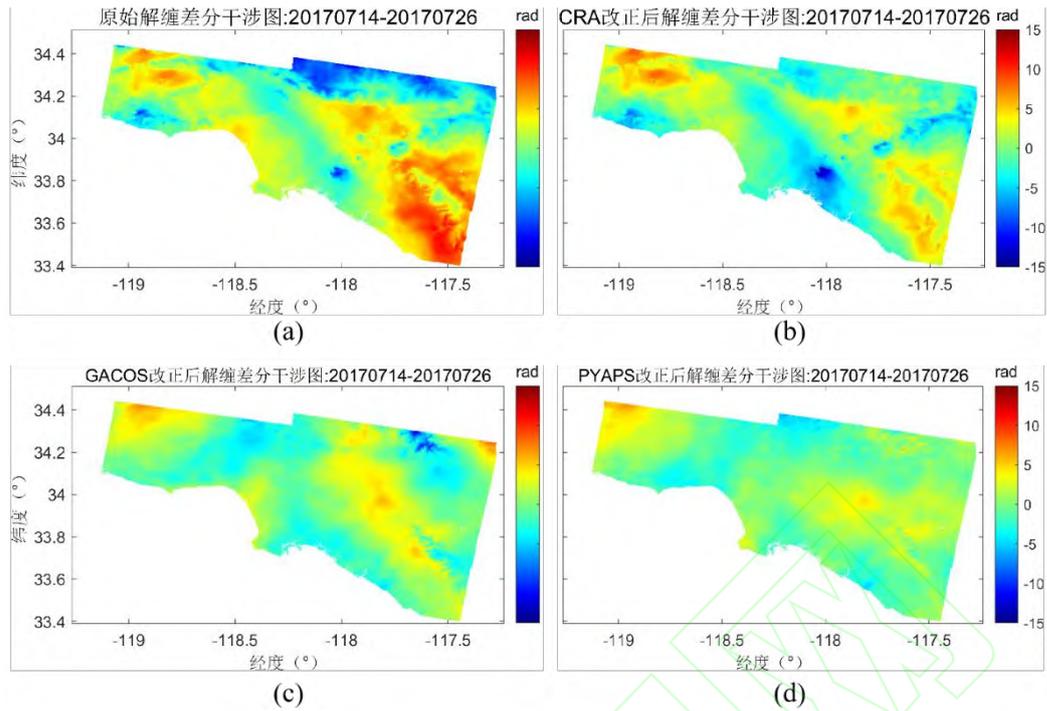


图 10 20170714-20170726 对比实验图

Fig.10 Comparative experimental diagram of 20170714-20170726 interference pair

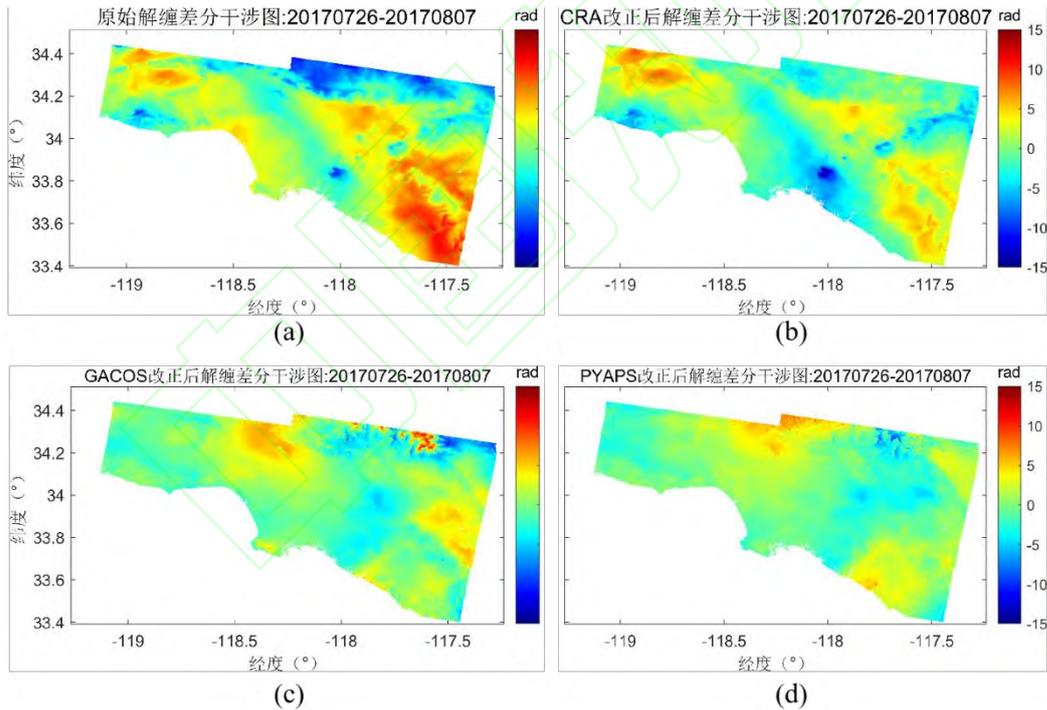


图 11 20170726-20170807 对比实验图

Fig.11 Comparative experimental diagram of 20170726-20170807 interference pair

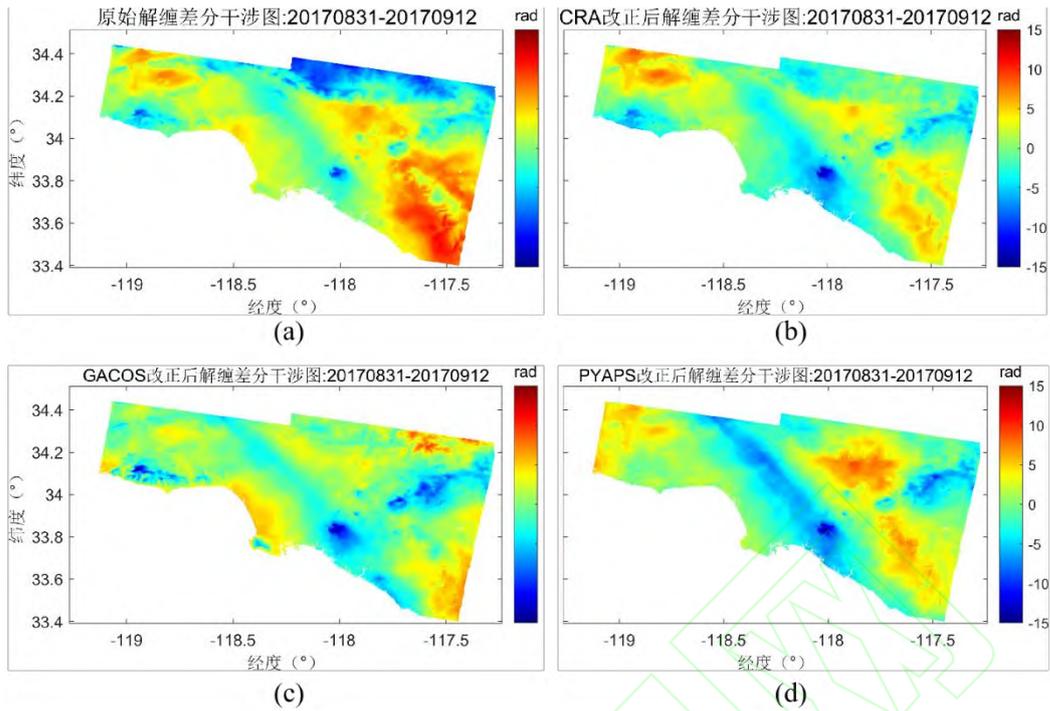


图 12 20170831-20170912 对比实验图

Fig. 12 Comparative experimental diagram of 20170831-20170912 interference pair

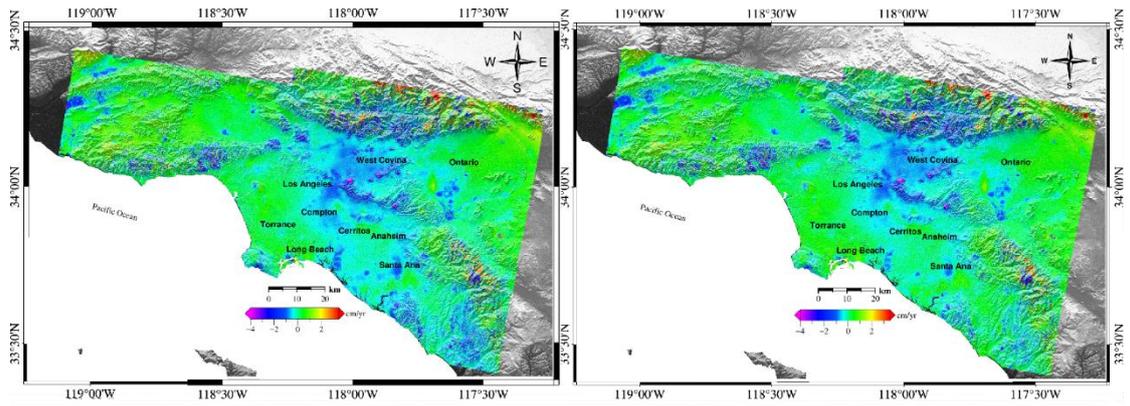
表 1 全球数值气象模型改正效果对比

Tab. 1 Comparison of correction effects of global numerical meteorological models

| 干涉对名称 | 差分干涉对 | CRA 方法及效果 | GACOS 方法及效果 | PYAPS 方法及效果 |
|-----------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| 2017-07-14—2017-07-26 | 2.6862 | 1.5581 (42.0%) | 1.8211 (32.2%) | 1.4245 (47.0%) |
| 2017-07-26—2017-08-07 | 2.5796 | 1.4840 (42.5%) | 1.6802 (34.9%) | 1.6248 (37.0%) |
| 2017-08-31—2017-09-12 | 2.8080 | 2.1553 (23.2%) | 2.0124 (28.3%) | 2.6430 (5.9%) |

2.4 形变速率结果比较

图 13 显示了 2017-06-18—2018-09-19 期间加利福尼亚州南部的 InSAR 平均视线形变速度图(单位: cm/a)。基本底图像是灰度合成孔径雷达图像。基于短基线原则(垂直基线小于 150 m、时间基线小于等于 36 d)获得的 78 幅干涉图,分别用经典的 SBAS-InSAR 和基于 CRA 的 SBAS-InSAR 计算了 2017-06—2018-09 的 LOS 向平均形变速率图。两种方法的平均速率形变结果较为相似,整体人类活动区域的地表呈现出下沉的趋势,最大下沉速率在 4 cm/a 左右,特别在 Santa Ana 和 Los Angeles 以及 West Covina 盆地处下沉较为明显,年平均下沉速率在 1~2 cm/a 左右,以及在 Ontraio 处出现符合该城市形状的下沉。特别值得注意的是,在 Santa Ana 附近以及 Cerritos 附近可以观察到沉降速率较为明显的改进,以及在 (117.5° W, 33.8° N) 山体部分改进效果较为明显,除少部分山体仍然受大气影响外,其余的形变速率相对减缓。



(a) 经典SBAS-InSAR结果

(b) 基于CRA改正的SBAS-InSAR结果

图 13 形变速率结果对比图

Fig. 13 Comparison of deformation rate results

2.5 基于 GPS 的大气改正效果评估

为了验证 CRA 大气产品在时间序列 InSAR 中的改正效果,比较了基于 CRA 的 SBAS-InSAR、经典的 SBAS-InSAR 和在视线方向投影的 GPS 的时序变化,并对对应 GPS 点位的平均形变速率,评价了 CRA 大气产品的改正效果和基于 CRA 的 SBAS-InSAR 方法的精度。通过将 GPS 三分量的形变监测结果投影到 InSAR 结果的 LOS 方向,选取 JPLM 站点为 GPS 基准站,计算对应 InSAR 结果在此处的形变量级,计算差值为校正常数,由此将 InSAR 结果统一到 GPS 的框架下进行比较,时序结果如图 14 所示。

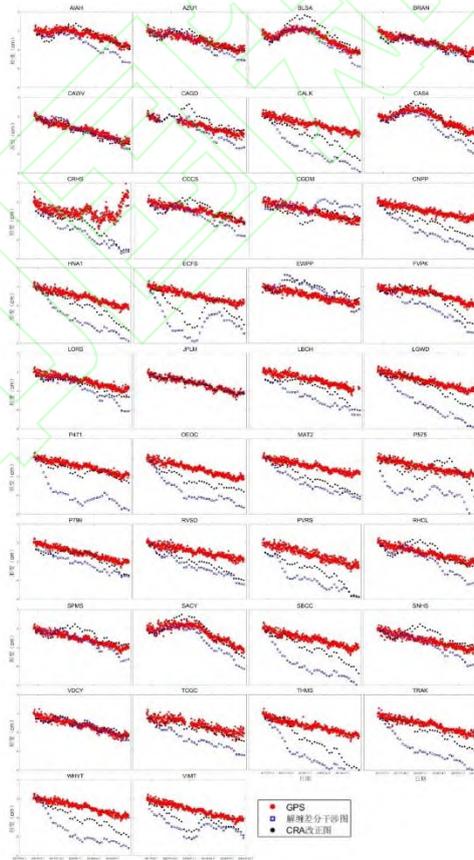


图 14 GPS 站数据和传统 SBAS-InSAR、基于 CRA 的 SBAS-InSAR 时序对比结果

Fig. 14 Comparison results of GPS station data and the Classic SBAS-InSAR and the method of atmospheric correction based on CRA

从全部的时序结果来看，CRA 改正过后的时序变化更加接近 GPS 的趋势。表 2 比较了基于 CRA 的 SBAS-InSAR 和 SBAS-InSAR 与 GPS 在 LOS 方向上的相对误差。总的来说，经过 CRA 改正后的 21 个点与 GPS 的差异减小，17 个点的差异增加。SBAS-InSAR 的均方误差为 1.63 cm/a，基于 CRA 的 SBAS-InSAR 的均方误差为 1.43 cm/a，说明 CRA 改正提高了变形监测的整体精度。

表 2 GPS 对应站点与两种方法的总体比较

Tab.2 Overall comparison between GPS corresponding sites and two methods

| 相对误差增加数量 | 误差减少数量 | 最大误差 / (cm · a ⁻¹) | 均方误差 σ | |
|----------|--------|--------------------------------|------------|----------------------|
| | | | SBAS-InSAR | CRA-based SBAS-InSAR |
| 17 | 21 | 3.986 | 1.63 | 1.43 |

结合 GPS 站位置和时序图分析，认为存在误差有以下几点原因：一是受速率拟合结果的影响，时序结果中部分偏离 GPS，如 BLSA、CALK、CRHS、LBCH 等站点，时序上的整体趋势更加接近 GPS 的结果，但是总体沉降量偏离 GPS 导致拟合的形变速率产生了较大的误差。二是受原始部分干涉对的影响，时序上的变化主要集中于夏季和冬季产生了和 GPS 较大的差异，如 THMS 和 VIMT 站结果，此时正是南加州受季风影响较严重的时候，部分干涉图受尺度较小的大气湍流的影响。三是 CRA 数据和 GPS 数据空间分辨率的差异，CRA 产品时间分辨率为 6 小时，空间分辨率为全球 34km，对于部分干涉图中的大气能够减弱却并不能完全消除，导致最终结果和 GPS 间存在差异。

3 结语

本文提出了一种 InSAR 对流层延迟改正方法，该方法的主要特点是：（1）利用了第一代全球大气和陆面再分析产品（CRA）计算对流层延迟；（2）顾及气象参数物理特性，结合了不同高度对流层的空间随机模型，以便更好地计算 CRA 对流层样本；（3）直接沿卫星视线方向计算对流层延迟的积分。将其应用于南加州实验区域，对改正后干涉图评估分析，并运用 GPS 数据验证时序形变。结果表明：（1）基于 CRA 的 InSAR 大气改正方法可以改善大气延迟影响，说明了利用分辨率较低的全球大气模型数据建立高分辨率 InSAR 对流层延迟图时考虑对流层随机模型的有效性；（2）校正后的干涉图平均标准差减小了 34.7%，65%的干涉图平均标准差减小了 20%以上；（3）干涉图空间结构函数的期望平方差显著性下降表明该产品能有效抑制长波大气；（4）相关性的拟合系数变化表明该产品能够有效降低高程影响带来的大气垂直分层分量。

本文说明了 CRA 产品在 InSAR 大气校正上的有效性。通过定量评估可以使研究人员更加充分了解此产品的校正效果和性能，有助于促进该产品的发展。特别对于较大的研究区域范围（40 km 及以上），受高程影响大气变化显著时，或是受水汽影响严重以及研究区域存在数十公里及以上大规模大气运动导致大气延迟影响较为显著时，应用 CRA 可以得到有效的改正。此外，由于外部数据的差异性，后续研究可以将 GNSS 数据联合 CRA 解算以提高 InSAR 大气改正精度。

参考文献

- [1] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [2] Zebker H, Rosen P, Goldstein R, et al. On the derivation of coseismic displacement fields

- using differential radar interferometry: The Landers earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research B*, 2002, 99(B10): 19617–19634.
- [3] Hu J, Li Z, Ding X, et al. 3D coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1029–1041.
- [4] Xu Wenbin, Luo Xingjun, Zhu Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1632–1642. (许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(10): 1632–1642.)
- [5] Xu B, Li Z, Feng G, Zhang Z, Wang Q, Hu J, et al. Continent-Wide 2-D Co-Seismic Deformation of the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake Derived from Sentinel-1A Data: Correction of Azimuth Co-Registration Error[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5):1–12.
- [6] Li Da, Deng Kazhong, Gao Xiaoxiong, Niu Haipeng. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1531–1537. (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): 1531–1537.)
- [7] 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. (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.)
- [8] Yang Z, Li Z, Zhu J, et al. Deriving time-series three-dimensional displacements of mining areas from a single-geometry InSAR dataset [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 11): 1–16.
- [9] Li Z, Cao Y, Wei J, et al. Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192:258–284.
- [10] Zebker H, Rosen P, 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.
- [11] Hanssen R. *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*[M]. IEEE, 2001.
- [12] Li Z, Ding X, Huang C, et al. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(11):1189–1194.
- [13] Xu W, Li Z, Ding X, et al. Interpolating atmospheric water vapor delay by incorporating terrain elevation information[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(9):555–564.
- [14] Hooper A, Bekaert, et al. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques[J]. *Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal*, 2015. 170:40–47.
- [15] Cao Y, Li Z, Wei J, et al. Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(2):185–204.
- [16] Wei J, Li Z, Hu J, et al. Anisotropy of atmospheric delay in InSAR and its effect on InSAR atmospheric correction[J]. *Journal of geodesy*, 2019(2):93.
- [17] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [18] Fukushima Y. *Atmospheric Phase Delay Estimation From Multiple SAR Interferometry Measurements* [C]. *Fringe*. 2012.

- [19] Li Z, Ding X, Liu G. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(11): 907-917.
- [20] Li Z, Fielding E, Cross P, et al. InSAR atmospheric correction GPS Topography-dependent Turbulence Model (GTTM) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111:B02404.
- [21] Yu C, Penna N, Li Z. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations[J]. *Journal of Geophysical Research, D. Atmospheres: JGR*, 2017.
- [22] Li Z. Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MERIS data[J]. University College London (University of London), 2005.
- [23] Li Z, Xu W, Feng G, et al. Correcting atmospheric effects on InSAR with MERIS water vapour data and elevation dependent interpolation model[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(2): 898-910.
- [24] Jung J, Kim D, Park S. Correction of Atmospheric Phase Screen in Time Series InSAR Using WRF Model for Monitoring Volcanic Activities[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2678-2689.
- [25] Jolivet R, Agram P, Lin N, Simons M, Doin M, Peltzer G, et al. Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119: 18.
- [26] Hu Z, Jordi J. An Accurate Method to Correct Atmospheric Phase Delay for InSAR with the ERA5 Global Atmospheric Model[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17):1969.
- [27] Cao Y, Jonsson S, Li Z. Advanced InSAR Tropospheric Corrections from Global Atmospheric Models that Incorporate Spatial Stochastic Properties of the Troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2021.
- [28] Wang Minyan, Yao Shuang, Jiang Lipeng, et al. Collection and preprocessing of Global Atmospheric reanalysis (CRA-40) Satellite remote Sensing data in China[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1):158-163(王旻燕,姚爽,姜立鹏,等.我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理[J].*气象科技进展*, 2018, 8(1):158-163.)
- [29] Shi Chunxiang. Multi-source fusion grid live data and the development and application progress of the first generation global atmospheric reanalysis products in China. [R] Beijing: Intelligent Earth Lecture Hall, 2021. (师春香.多源融合网格实况数据与我国第一代全球大气再分析产品研发与应用进展[R].北京:智慧地球大讲堂, 2021.)
- [30] Yu X, Zhang L, Zhou T, et al. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: comparative assessment [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1):46-63
- [31] Li Z, Cao Y, Wei J, et al. Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192:258-284.
- [32] Yao Yibin, Zhang Liang, Zhang Qi, et al. Tropospheric Delay Model and Real-Time Differential Service for Large Height Difference RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1019-1028. (姚宜斌,张良,张琦,等.面向大高差RTK的对流层延迟改正模型及实时差分服务构建[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(7): 1019-1028.)
- [33] Hu Y, Yao Y. An Accurate Height Reduction Model for Zenith Tropospheric Delay Correction Using ECMWF Data[C]//China Satellite Navigation Conference. Springer, Singapore, 2017.
- [34] Onn F, Zebker H. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric

- phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2006, 111(B9).
- [35] Zhou Wenbin, Xu Wenbin, Li Zhiwei, et al. Elevation-dependent MERIS Water Vapor Interpolation and Its Application to Atmospheric Correction on ASAR Interferogram[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 963-977. (周文斌, 许文斌, 李志伟, 等. 考虑高程信息的MERIS水汽插值及其在ASAR干涉图大气改正中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(8): 963-977.)
- [36] Xu B, Li Z, Wang Q, et al. A Refined Strategy for Removing Composite Errors of SAR Interferogram[J]. 2014. DOI:10.1109/LGRS.2013.2250903.
- [37] Li Z, Ding X, Huang C, et al. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(11):1189-1194.
- [38] Cao Y, Li Z, Wei J, et al. Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(2):185-204.
- [39] 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. (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.)
- [40] Xiao R, Yu C, Li Z, et al. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 96:102289.
- [41] Yu C, Penna N, Li Z. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations[J]. *Journal of Geophysical Research, D. Atmospheres: JGR*, 2017.
- [42] Chen Y, 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.
- [43] Yu C, Li Z, Penna N. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 204:109-121.
- [44] Agram P, Jolivet R, et al, New Radar Interferometric Time Series Analysis Toolbox Released[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94.