



引文格式:武帅莹,刘国祥,贾洪果,等.一种基于GNSS和机器学习的InSAR大气改正方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9):1864-1877.DOI:10.13203/j.whugis20220191

Citation: WU Shuaiying, LIU Guoxiang, JIA Hongguo, et al. An InSAR Atmospheric Correction Method Based on GNSS and Machine Learning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(9): 1864-1877. DOI: 10.13203/j.whugis20220191

# 一种基于GNSS和机器学习的InSAR大气改正方法

武帅莹<sup>1</sup> 刘国祥<sup>1,2</sup> 贾洪果<sup>1</sup> 张波<sup>1</sup> 张瑞<sup>1,2</sup>  
毛文飞<sup>1</sup> 吴婷婷<sup>1</sup>

1 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都, 611756

2 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都, 611756

**摘要:**准确分离干涉相位中的大气延迟是提高合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)测量技术形变监测精度的关键所在。提出一种基于机器学习的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)大气延迟建模方法,以美国加利福尼亚地区为研究区域,对2019年夏季和2020年冬季各一幅Sentinel-1短时基线干涉图进行大气改正。结果表明,经该方法大气改正后的InSAR干涉相位均方根误差平均降低了78%,显著优于基于相位-高程关系的幂律函数和广泛使用的气象模型改正效果。同时,通过模拟实验验证了所提方法在存在地表形变情况时仍然可靠。所提算法可为基于GNSS大气数据的InSAR对流层延迟时空制图提供参考。

**关键词:**InSAR; 对流层延迟; 机器学习; GNSS; 气象模型; K-means

中图分类号: P237

文献标识码: A

收稿日期: 2024-06-10

DOI: 10.13203/j.whugis20220191

文章编号: 1671-8860(2025)09-1864-14

## An InSAR Atmospheric Correction Method Based on GNSS and Machine Learning

WU Shuaiying<sup>1</sup> LIU Guoxiang<sup>1,2</sup> JIA Hongguo<sup>1</sup> ZHANG Bo<sup>1</sup> ZHANG Rui<sup>1,2</sup>  
MAO Wenfei<sup>1</sup> WU Tingting<sup>1</sup>

1 Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu 611756, China

**Abstract: Objectives:** The interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique has been widely applied to monitoring land deformation with very high spatiotemporal resolution. The elimination of atmospheric delay in the interferometric phase is critical to achieving higher accuracy of land deformation monitoring with the technique. **Methods:** This paper proposes a global navigation satellite system (GNSS) atmospheric delay modeling method based on the combination of the machine learning approach and the K-means algorithm. To evaluate the performance of the proposed, two Sentinel-1 short-time baseline interferograms in Southern California for summer 2019 and winter 2020 are used in the experiment. **Results:** The results after the correction of tropospheric delays show that the root mean square error of the interferometric phase is reduced by an average of 78%, which is significantly better than that of the conventional methods, including the power law function (highest 73%), generic atmospheric correction online service for InSAR estimation (61%), and weather models (58%). **Conclusions:** The experiment results indicate that the proposed method can effectively reduce the stratified tropospheric delay, and the modeled tropospheric

基金项目:国家自然科学基金(U22A20565, 42371460, 42171355);国家重点研发计划(2023YFB2604001)。

第一作者:武帅莹,博士生,主要从事雷达干涉测量及应用研究。shining@my.swjtu.edu.cn

通信作者:刘国祥,博士,教授。rsgxliu@swjtu.edu.cn

delays are robust to surface deformation. Besides, the proposed method is potentially used in the areas with low spatial density GNSS stations in simulation experiments. This study can provide a reference for InSAR tropospheric delay spatiotemporal mapping based on GNSS atmospheric data.

**Key words:** InSAR; tropospheric delay; machine learning; GNSS; weather model; *K*-means

近几十年来,合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)测量技术已成为地形图绘制<sup>[1-3]</sup>及水文<sup>[4-6]</sup>、地震<sup>[7-9]</sup>、火山活动<sup>[10-11]</sup>、山体滑坡<sup>[12-13]</sup>等与地质构造相关地表形变监测<sup>[14-15]</sup>的主要手段。随着 Sentinel-1 卫星数据全球范围的免费发布以及的 NISAR(national aeronautics and space administration-Indian space research organisation synthetic aperture radar)卫星发射升空,InSAR 进行大范围、高精度地表形变监测的潜力被极大提升<sup>[16-17]</sup>。但是,由于电磁波信号在传播过程中极易受到对流层大气的影响,大气温度、压力和相对湿度的变化造成空气折射率的时空变化,使得接收到的 InSAR 信号产生显著的相位延迟<sup>[18-19]</sup>。已有研究指出,单幅 SAR 影像中的大气延迟可高达几十厘米,从而导致真实形变信号被掩盖而无法准确提取<sup>[20-23]</sup>。因此,对于低量级、毫米尺度的地表形变监测,必须有效去除大气延迟效应,以提高 InSAR 监测结果和后续地球物理建模的精度<sup>[24-27]</sup>。

对流层延迟主要是由地形相关的垂直分层延迟和湍流混合部分组成<sup>[28-30]</sup>。目前,InSAR 对流层改正的主要手段大致分为三大类:第一类是基于相位时空特性的经验模型改正<sup>[31-36]</sup>,优点是无需借助于任何外部数据,但可能会去除与地形相关的形变信号;第二类改正方法则依赖于气象再分析数据,如天气研究与预报模式和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)气候再分析数据集(ECMWF reanalysis-interim, ERA-Interim)等<sup>[37-39]</sup>,或依赖中等分辨率成像光谱仪数据,如中等分辨率成像频谱仪和中分辨率成像光谱仪<sup>[40-42]</sup>,其优点是可提供大范围、较为精确的大气改正值。然而,这些模型数据的时空分辨率较低,产品采集时间与 SAR 成像时刻不同步且受云雨等天气因素的限制。以上两类方法主要用于消除地形相关的分层相位延迟影响,对于具有时空随机分布性质的湍流延迟部分,则需要联合堆栈<sup>[43-44]</sup>或时空滤波方法<sup>[45-46]</sup>做进一步处理。第三类改正方法是基于全球导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)大气延迟数据<sup>[47-49]</sup>。主流的研究策略是利用区域 GNSS 观测

网络获取高精度天顶对流层总延迟(zenith tropospheric delay, ZTD),通过内插方法将点状 GNSS 观测值内插至 InSAR 像元尺度,然后进行大气改正。GNSS 数据具有实时、全天候的特点,可获取 InSAR 同步大气值,并能够捕捉到对流层湍流的微小特征,因此该改正方法具有广阔的应用前景<sup>[50-52]</sup>。需要注意的是,此类方法受限于 GNSS 站点的密度、几何分布及数据内插方法。例如,在地形起伏较大且站点稀疏地区,由于大气在空间上变化快,内插结果可能存在较大的误差<sup>[19,49,53]</sup>。为克服单一 GNSS ZTD 数据集用于探测对流层大气的局限性,目前,国际上已开展联合 GNSS ZTD 数据与其他独立校正数据集的研究。文献[48]利用迭代对流层分解方法,基于高分辨率 ECMWF 气象模型,成功地从 InSAR 观测值中分离出分层和湍流相位延迟,并进一步与 GNSS ZTD 数据相结合,实现了对流层延迟校正的优化;文献[19]和文献[54]利用最小二乘配置软件 COMDIE(collocation of meteorological data for interpretation and estimation of tropospheric pathdelays)将 GNSS ZTD 与数值气象模型相结合,获取了更高精度的大气改正模型。尽管与气象模型数据融合可优化仅基于 GNSS ZTD 的大气改正手段,但由于数学模型较为复杂,计算量大,不便于在大范围内开展。

近年来,机器学习作为遥感领域中的研究热点,已成功应用于高光谱图像分类和解译、数据融合、目标探测、干涉相位解缠及滑坡监测等研究<sup>[20,55-58]</sup>,但较少应用于 InSAR 大气相位改正。文献[59]在挪威地区首次将 GNSS ZTD 数据与 InSAR 相位相结合,利用机器学习方法成功获取了区域性高精度大气延迟模型,极大地提高了 InSAR 地表形变监测精度。但文献[59]的研究是基于整个挪威地区,并未充分考虑广域对流层大气的空间变异性,忽略了分区域处理的重要性,而基于分区的建模已被证明可优化大气延迟模型<sup>[34]</sup>。因此,本文对文献[59]的方法进行改进,提出一种联合 *K*-means 分区与机器学习的对流层校正新方法,兼顾到大气的高空间变异性,从而进一步提高 GNSS ZTD 大气延迟建模精度。选取气候及地形地势复杂的

美国南加州地区进行方法测试,并与传统的基于相位-高程的幂律函数关系以及第5代气象再分析数据(ERA5)和通用型 InSAR 大气校正在线服务(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)产品的大气相位改正结果进行比较,验证了本文联合方法的有效性和可靠性。此外,通过对比和模拟实验,讨论了影响联合方法大气延迟建模精度的因素及对于 GNSS 站点稀疏地区的可行性。

## 1 数据及研究方法

### 1.1 实验区域和数据

本文选取美国南加州地区(主要包括洛杉矶与橙县)为研究区域,如图 1 所示。该地区西邻太平洋,水汽含量丰富<sup>[60]</sup>,因此 SAR 观测成像受对流层延迟影响较严重;该地区的地形起伏较大,从西部沿海到东部山脉,高差可达 0~3 500 m,地形与气象数据丰富,是研究 InSAR 大气改正方法的理想实验场地。

本文选取 4 幅 Sentinel-1 卫星影像作为实验数据,其中夏季(2019-07-28 和 2019-08-09)和冬季(2020-01-18 和 2020-01-30)各两幅,时间间隔为 12 d。利用瑞士 GAMMA 遥感公司开发的商业软件分别生成两对短时基线干涉图,如图 2 所示。在 InSAR 处理过程中,首先使用增强光谱多样性算法去除因配准导致的条带不连续问题<sup>[61]</sup>;其次在距离向和方位向上进行 20:4 的多视处理;然后利用 POD(precise orbit determination)精密轨道数据对初始轨道参数进行精化,通过引入航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM) 30 m 的分辨率数字高程模

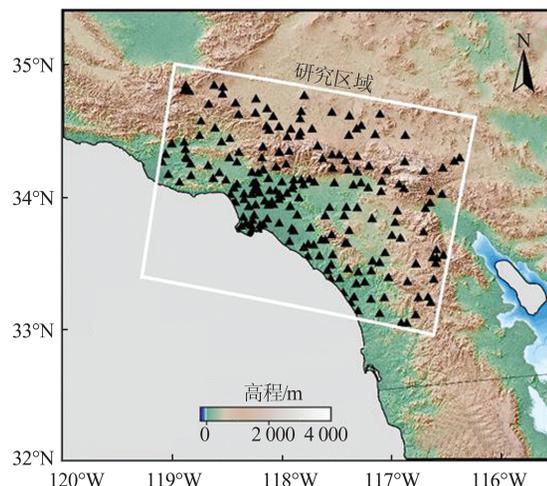
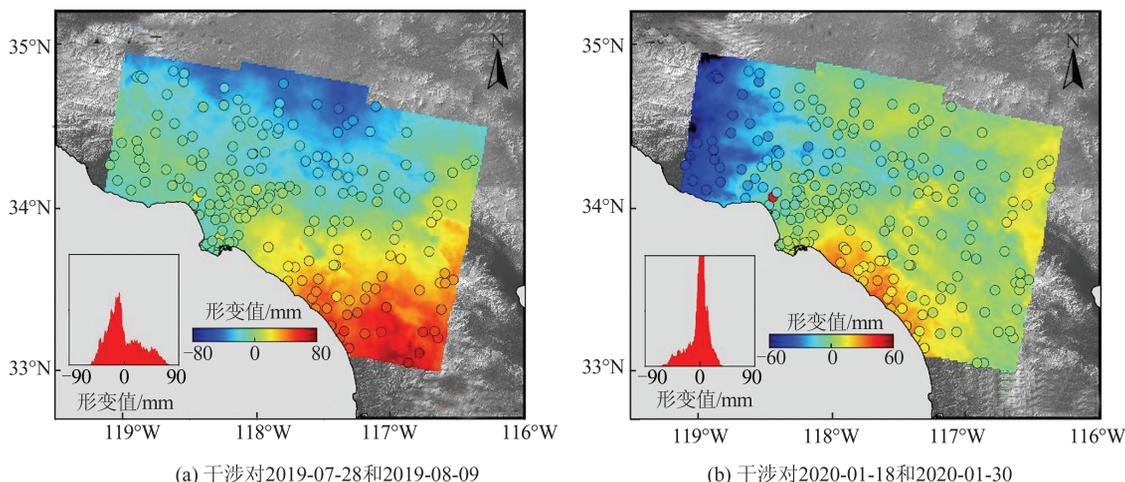


图1 研究区域地形图

Fig. 1 Topography of Study Area

型去除干涉图中的地形相位分量;最后采用最小费用流法<sup>[62]</sup>仅对相干性大于 0.5 的像素点进行相位解缠,并将解缠后的相位值转换至视线向(line-of-sight, LOS)位移(为方便起见,下文仍然称之为相位),用于后续大气改正实验。

美国南加州地区是世界上 GNSS 站点分布最为密集且均匀的地区之一。本文所用 GNSS ZTD 数据来自内华达大地测量实验室发布的采样率为 5 min 的产品。由于部分站点存在数据缺失情况,考虑到内插可能引入的误差,本文不建议进行缺失数据的恢复,仅选择在 InSAR 影像获取时刻有同步数据的站点。为用于 InSAR 干涉图的大气改正,将干涉对日期所对应 GNSS ZTD 数据两两相减获得差分 ZTD,并转换至 LOS 向,最终得到 GNSS 差分斜距向大气延迟(differential slant tropospheric delay, dSTD),如图 2 所示,其中纵轴为像素点个数,数值范围为 0~25 000。



(a) 干涉对2019-07-28和2019-08-09

(b) 干涉对2020-01-18和2020-01-30

图2 InSAR干涉相位及GNSS dSTD空间分布

Fig. 2 InSAR Interferometric Phase and Space Distribution of GNSS dSTD

## 1.2 研究方法

本文基于离散 GNSS dSTD, 通过  $K$ -means 算法与机器学习相联合方法对研究区域的大气延迟效应进行建模, 获得有效的像元级 InSAR 大气相位改正。本文的研究对象是单幅干涉图, 不涉及时序 InSAR 相关内容。首先对  $K$ -means 与机器学习方法的原理进行阐述, 然后介绍本文的联合方法在大气延迟建模中的具体实施过程。

### 1.2.1 $K$ -means 算法

$K$ -means 算法已被广泛应用于遥感影像的配准、分类与分割中, 并很大程度上提高了遥感影像处理精度。在 InSAR 去大气方面, 文献[34]通过整合 InSAR 干涉相位, 格网点经纬度和高程来构建分区, 然后在各分区内利用幂律函数拟合去除地形相关大气, 证实基于  $K$ -means 分区的大气改正可使单幅干涉图均方根误差 (root mean square error, RMSE) 降低 50% 左右, 改正效果明显优于具有同等分区个数的预定义窗口。目前, 中国尚未有研究将  $K$ -means 算法应用于 InSAR 大气改正中。因此, 本文基于文献[34]的分区思路, 联合支持向量机 (supporting vector machine, SVM) 对分区做进一步优化, 去除每一个分区中潜在的误判像素点 (不超过总数的 5%)。

### 1.2.2 机器学习

本文所使用的回归学习器模型主要包括线性回归、决策树回归、SVM、高斯过程 (Gaussian process, GP) 回归、树集成及神经网络。通过计算测试集预测值与真实值间的 RMSE, 最终确定实验的回归学习器模型。在此过程中, 使用 5 折交叉验证来验证训练模型。其中, GP 模型的回归学习器精度最高, 与现有研究结果一致<sup>[59, 63]</sup>。本研究

中的回归学习器模型确定为 GP 回归模型。

同样地, 采取 5 折交叉验证算法选取最优协方差函数。其中, 采用平方指数协方差函数的 GP 回归模型 RMSE 最小<sup>[59]</sup>, 因此对于干涉对 2019-07-28 和 2019-08-09, 本文最终使用的是应用平方指数协方差函数的 GP 回归学习器。同样采用 5 折交叉验证算法, 干涉对 2020-01-18 和 2020-01-30 使用有理二次协方差函数的 GP 回归学习器。

### 1.2.3 联合方法

本文通过  $K$ -means 分区算法先对干涉图进行分区, 然后针对各分区, 基于其范围内 GNSS dSTD, 利用 GP 回归学习器构建区域大气延迟。现有研究指出,  $K$ -means 分区数量会影响大气延迟建模精度。为此, 在  $K$ -means 分区过程中, 利用  $L$  曲线准则来选择最优分区数, 即计算不同分区情况下 (预设范围 1~20), 基于联合方法的大气改正前后干涉相位的 RMSE 减少值绘制相应曲线, 并选取其拐点为最优分区数。本文研究工作流程如图 3 所示, 主要包括 InSAR 及 GNSS 数据前期处理、 $K$ -means 分区、大气延迟机器学习建模和大气延迟改正及结果验证 4 个部分。

## 1.3 精度评定

通过计算干涉相位与各类方法所得大气延迟之间的皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, PCC)、中心均方根误差 (centered root mean square difference, RMSD) 和标准差 (standard deviation, STD), 并基于 3 个指标的余弦关系绘制泰勒图<sup>[64]</sup>, 将其整合到一张极坐标图上, 可更为清晰直观地判断各大气延迟结果与干涉相位之间的相关性。以上 3 个指标的计算式如下:

$$\begin{cases} E_{\text{PCC}} = \frac{\sum \{ [C - \text{mean}(C)] \cdot [C_r - \text{mean}(C_r)] \}}{N \cdot \sigma_C \cdot \sigma_{C_r}} \\ E_{\text{RMSD}} = \sqrt{\frac{\sum \{ [C - \text{mean}(C)] - [C_r - \text{mean}(C_r)] \}^2}{N}} \\ E_{\text{STD}} = \sqrt{\frac{\sum [D - \text{mean}(D)]^2}{N}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $C$  为 InSAR 干涉相位;  $C_r$  则代表不同方法的大气延迟结果;  $\sigma_C$  和  $\sigma_{C_r}$  分别代表  $C$  和  $C_r$  的中误差;  $N$  为像元点个数; 参数  $D$  根据情况取  $C$  和  $C_r$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 基于联合方法的大气相位延迟建模

进行大气延迟建模之前, 对比 InSAR 干涉相

位与 GNSS dSTD, 如图 4 所示, 两者具有很高的相关性, 平均 PCC 与 RMSD 分别为 0.95 mm 和 5.8 mm。其中, 干涉对 2019-07-28 和 2019-08-09 的 PCC 与 RMSD 分别为 0.97 mm 和 5.6 mm, 干涉对 2020-01-18 和 2020-01-30 的 PCC 与 RMSD 分别为 0.93 mm 和 6.1 mm, 说明研究区域内夏季和冬季 InSAR 相位均受大气延迟影响严重, 同时也证实联合方法中将 InSAR 干涉相位和 GNSS

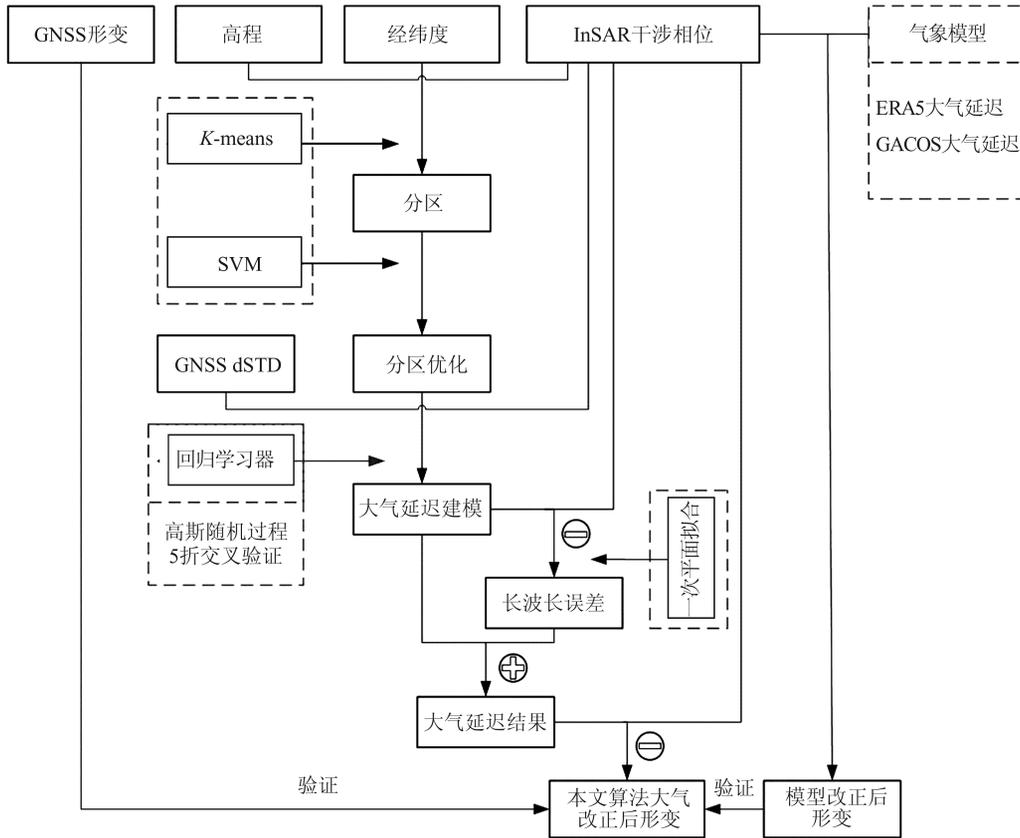


图3 本文算法技术流程

Fig. 3 Flowchart of the Proposed Algorithm

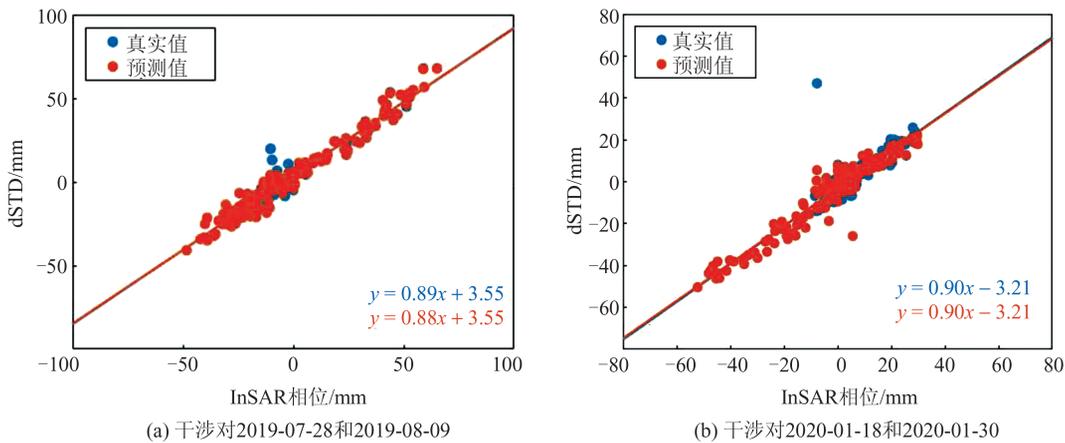


图4 机器学习的模型预测值与真实值对比

Fig. 4 Comparison of Prediction and Observation Values from Machine Learning

dSTD分别作为输入变量和响应变量的合理性。

基于上文介绍K-means算法对研究区域进行分区处理,夏季和冬季干涉对的分区数目分别为5个和4个,分区结果如图5所示。两个分区模式的差异性主要体现在北部和西北部地区,南部和东南部则基本一致。导致该差异存在的主要原因是由于干涉相位是K-means算法的输入变量之一,因此不同干涉对所对应的K-means分区结果会有所不同。

确定好K-means分区后,随即将获得基于联

合方法的不同干涉对大气延迟预测值。由图4可看出本文算法的大气预测值与真实值(GNSS dSTD)符合度极高,平均RMSD低于1.6 mm,说明本文选取的GP回归学习器的训练结果具有很高的精度。在使用联合方法对整个研究区域进行大气延迟建模时,由于K-means分区会导致一定的边界效应,使用7 km × 7 km高斯滤波对本文算法的大气延迟结果进行空间平滑(本文不讨论平滑对于改正效果的影响),最终获得的研究区域内本文算法的大气延迟空间分布如图6所示。

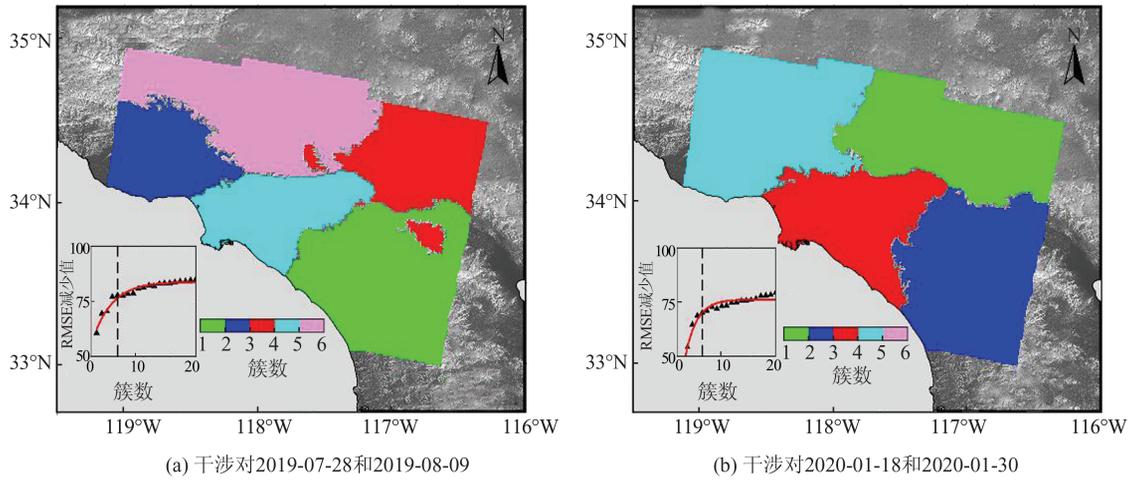


图 5 K-means 分区结果情况

Fig. 5 Clusters for Interferogram Pairs Derived by K-means Algorithm

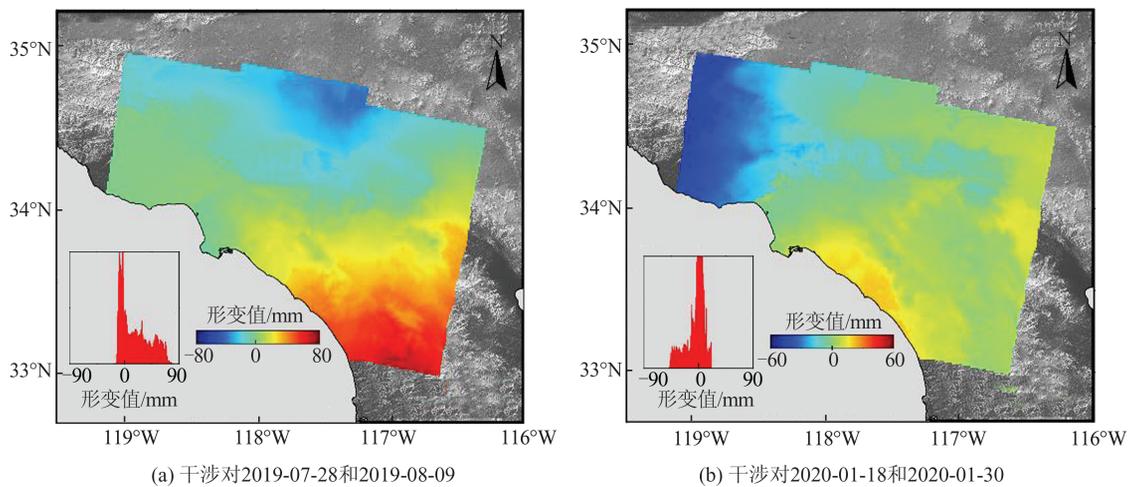


图 6 两幅干涉图对应本文算法的大气延迟分布

Fig. 6 Tropospheric Delays for the Two Interferograms by the Proposed Algorithm

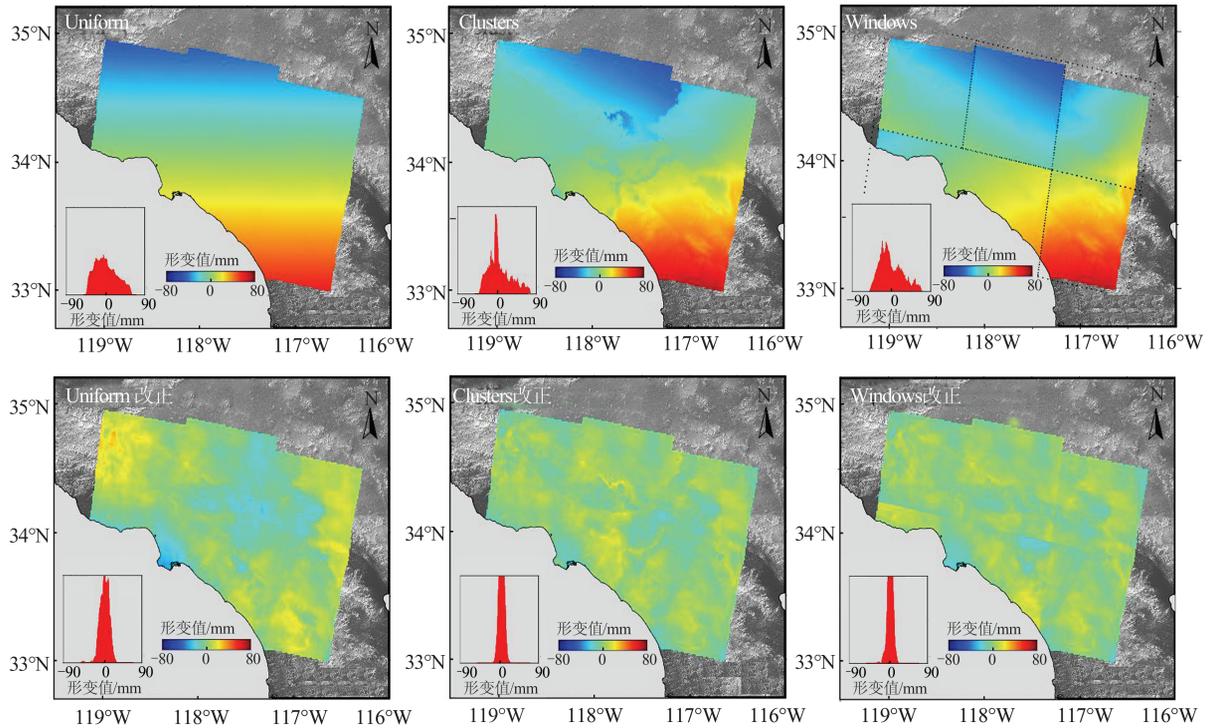
## 2.2 联合方法与传统方法大气校正比较

由上文可知, InSAR 大气相位延迟建模的主要手段大致分为 3 类, 本文算法归属第 3 类, 即基于离散 GNSS dSTD 的区域大气相位延迟建模。为验证联合方法的有效性, 将本文算法的大气改正结果分别与幂律函数(第 1 类)、ERA5 气象再分析数据和 GACOS 产品(第 2 类)获得的大气相位延迟的改正效果进行对比, 其中, 第 2 类大气产品均通过 TRAIN 软件<sup>[65]</sup> 计算得到。具体地, 基于幂律函数的大气相位延迟建模包含不分区(Uniform)、基于 K-means 分区(Clusters)和预定义窗口(Windows, 窗口数量与 K-means 分区数量一致)3 种情况。同样地, 使用 7 km × 7 km 高斯滤波对 Clusters 和 Windows 的分区结果进行空间平滑。

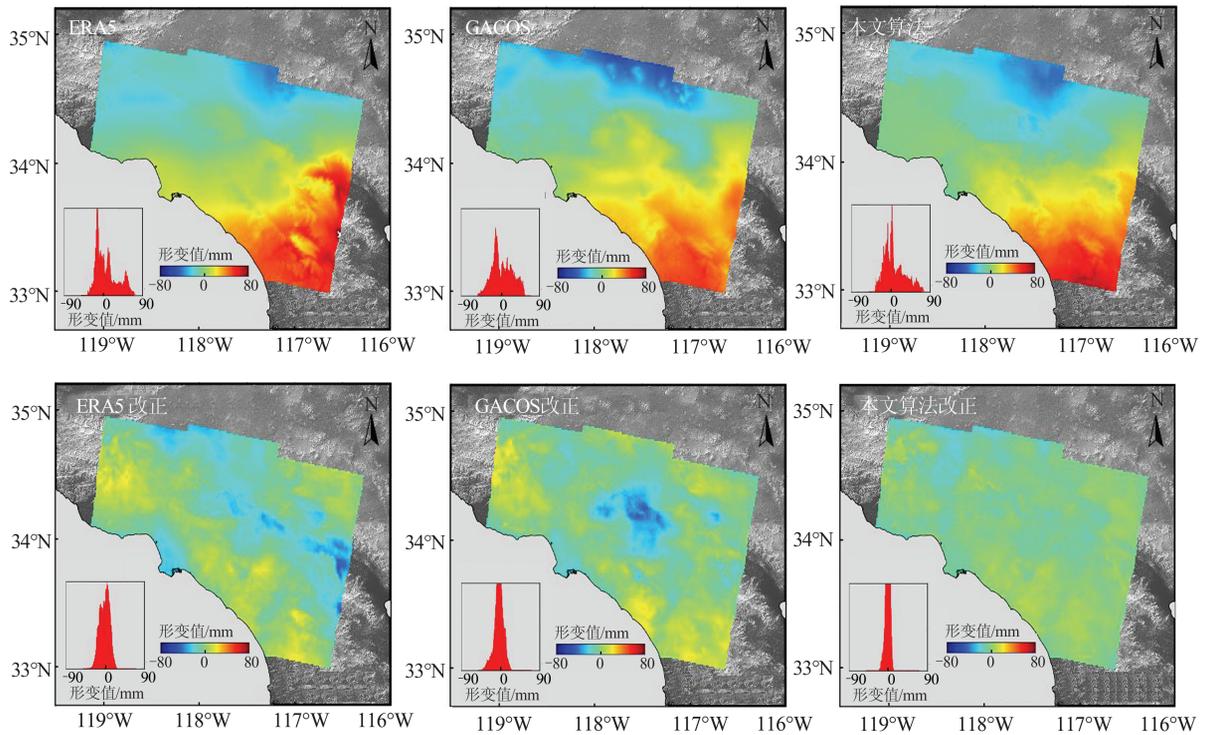
图 7 列举出各类大气相位延迟及对应改正结果(以干涉对 2019-07-28 和 2019-08-09 为例)。直

观地, 联合方法大气延迟改正效果最优, 改正后相位分布也最为均匀, 且主要分布在零值附近。通过计算大气延迟改正后干涉相位的 RMSE 减小值可发现, 联合方法大气延迟改正效果最优(81%), 其次是 Clusters(77%) 和 Windows(76%), 再就是 GACOS(61%)、Uniform(60%) 和 ERA5(58%)。同样地, 对于干涉对 2020-01-18 和 2020-01-30, 联合方法的改正效果也显著优于其他方法(具体数值见表 1)。

此外, 比较像元尺度下不同大气延迟结果与干涉相位之间的关系, 并绘制相关泰勒图, 如图 8 所示。结果显示, 本文算法的大气延迟与干涉相位之间的 PCC 最大, 平均值大于 0.98, 高于 Clusters(0.96)、Windows(0.96)、GACOS(0.92) 和 ERA5(0.93), 远高于 Uniform(0.87)。并且, 本文算法大气相位延迟与干涉相位之间的 RMSD 也最小, 均在 5 mm 以内。综合以上



(a) 基于幂律函数构建的区域大气相位延迟及改正结果



(b) ERA5气象再分析、GACOS产品和本文算法大气相位延迟及改正结果

图7 不同方法的大气相位延迟及改正结果(以干涉对2019-07-28和2019-08-09为例)

Fig. 7 Results of Tropospheric Delays and Corrections for Different Methods (Taking Interferometry on 2019-07-28 and 2019-08-09 as an Example)

指标可已得出结论,本文算法的大气延迟与干涉相位之间的相关性最高,结果优于其他大气产品。

为了进一步判断地形相关分层大气的改正效果,分别估计两干涉图改正前后相位与高程

的相关系数,作为分层延迟比率大小的指标,如图9所示。若干涉相位随着高程变化而产生明显的变化,则相关性高,说明干涉相位中存在显著的分层延迟;反之,则相关性低,干涉相位中的分层延迟占比小。由图9可知,原始干涉相位

表 1 不同大气改正方法对应 RMSE 减少值/%  
Table 1 RMSE Reductions for Different Tropospheric Correction Methods/%

干涉对	大气改正方法					
	本文算法	Clusters	Windows	ERA5	GACOS	Uniform
2019-07-28 和 2019-08-09	81	77	76	58	61	60
2020-01-18 和 2020-01-30	76	70	70	57	61	42

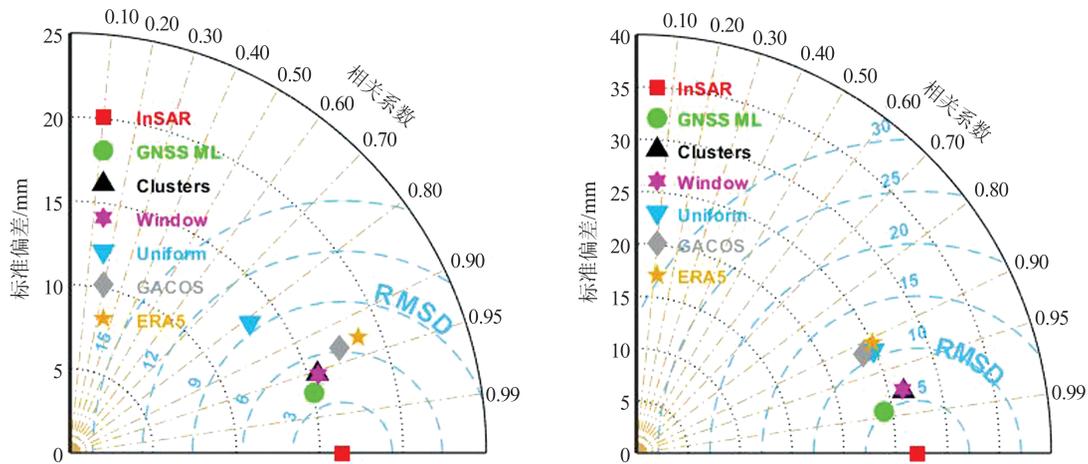


图 8 各类大气相位延迟与干涉相位关系泰勒图

Fig. 8 Taylor Diagrams for the Relationship Between Different Tropospheric Delays and Interferometric Phase

均随着高程发生显著的变化,两干涉对相位与高程呈现负相关。利用本文算法进行大气延迟改正后,各干涉图相位均呈现出一个相对平稳的趋势,相位-高程相关性很大程度上被减弱,平均相关系数由 0.27 降至 0.14(约 50%)。其次,相位-高程拟合得到的线性函数近乎水平,表明相位-高程函数几乎与高程变化无关,地形相关大气延迟改正效果显著,再一次证实了本文提出的联合方法的有效性。

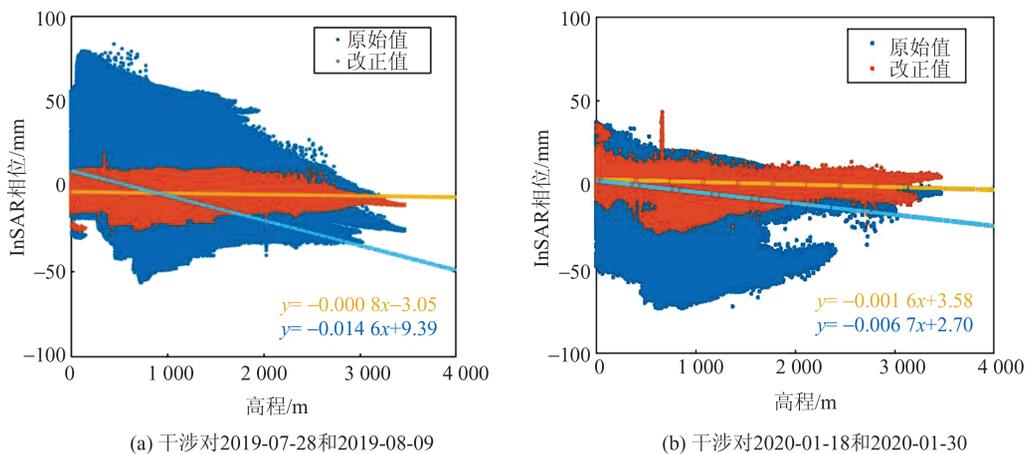
### 2.3 联合方法影响因子的敏感性分析

#### 2.3.1 训练集大小及空间分布的影响

为测试联合方法自身的鲁棒性,分析训练集

大小及其空间分布等特征对于 InSAR 干涉相位的改正效果,结果如图 10 所示。由于使用 K-means 算法可直接获取到不规则且包含不同 GNSS 站点数目的子集,无需人为划分训练集(图 10(a))。以干涉对 2019-07-28 和 2019-08-09 为例,不同分区之间进行排列组合,共可获得 31 种不同大小和组合的训练集。将所有训练集按照其大小进行排列,计算各组合情况下干涉相位改正前后 RMSE 减少趋势(图 10(b))。

由图 10(b)可看出, RMSE 减少趋势随训练集增大而缓慢增大,而训练集的空间分布对 RMSE 减少值的影响则更为显著。例如,当子区



(a) 干涉对 2019-07-28 和 2019-08-09

(b) 干涉对 2020-01-18 和 2020-01-30

图 9 干涉相位-高程关系图

Fig. 9 Correlation Diagram Between Interferometric Phase and Elevation

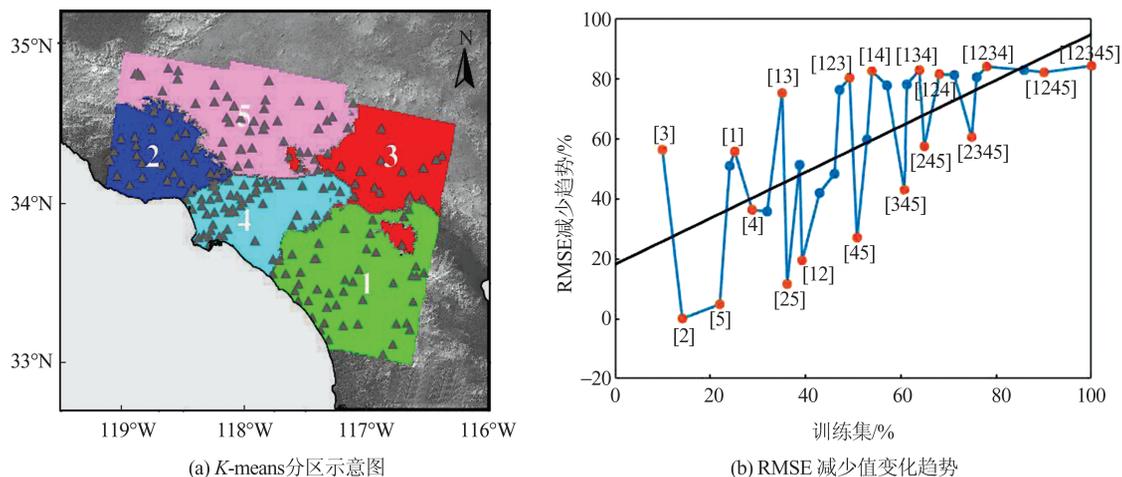


图10 训练集不同特性对预测结果的影响

Fig. 10 Influence of Different Characteristics of Training Data on Prediction Results

域1和3作为训练集时,数据集大小虽不足总数的40%,但RMSE减少值却高达78%,接近于子区域1~4同时作为训练集的情况。结果表明,本文算法的精度主要取决于训练集的空间分布,对训练集本身大小的敏感度并不高,即使是在小训练集的情况下也可具有较好的改正效果。而对于训练集的分布情况,随着样本分散在整个区域,训练精度也随之显著提高,这是由于联合方法中更广泛的采样会使得样本具有良好的代表性。文献[59]提到,当训练数据位于影像的一侧时,训练数据与测试数据之间的欧氏距离会增大,从而降低协方差函数,导致预测不可靠。然而对于南加州地区,当训练集主要分布在东部山区时,依然可以达到很好的大气改正效果,推测其原因是由于研究区域内的大气相位延迟主要集中在东部山区,从而使得当训练集主要集中于东侧时,整体改正效果依然保持一个较好的水平。

### 2.3.2 地表形变对联合方法的影响

以往基于干涉图的InSAR大气延迟改正研究中,由于时间基线较短,均假设地表形变信号几乎为零(或者将明显的地表形变区域进行掩膜),干涉相位主要归因于对流层效应<sup>[33,49]</sup>。然而,在实际情况中的地表形变是难以避免的,地壳构造活动、地表质量变化和人为因素等均会导致地表形变。因此,前述假设可能会导致地表形变被误判为大气延迟,从而影响大气延迟建模精度。而当研究区域缺少先验信息时,掩膜手段也不能详尽形变区域。因此,地表形变对于大气延迟建模的影响是不可忽视的。在本节中着重讨论存在地表形变情况下,利用联合方法进行大气

相位延迟建模的有效性。通过模拟得到的地表形变相位值,重复上文实验利用联合方法进行大气延迟相位建模,通过比较有无地表形变情况下,本文算法的大气延迟建模结果(分别对应GNSS站点和InSAR像素点处)的相关性来判断地表形变对本文算法的影响(图11)。

如图11(b)所示,本文算法的大气建模结果在有无地表形变情况下具有很高的 consistency。在GNSS站点处,两干涉图RMSE均小于0.3 mm,即使考虑InSAR所有像素点,两干涉图RMSE也仅有0.4 mm。结果说明,实验期间是否发生地表形变,对本文算法的大气建模精度并无影响。

## 3 结语

随着InSAR技术的不断发展,大气延迟效应依然是大范围高精度InSAR形变监测的主要限制因素。传统的大气延迟改正手段具有一定的局限性,如基于相位和高程相关性的经验函数可能会误判与高程相关的形变信号,且无法很好地去掉湍流延迟;而基于气象再分析数据的改正方法则受时空分辨率、产品采集时间与SAR成像时间不同步、无云等条件限制。因此,寻找一种可靠的InSAR大气延迟改正方法是非常有必要的。

本文提出一种基于高精度GNSS ZTD数据,联合K-means分区算法与GP回归学习器的InSAR大气延迟改正方法(联合方法),极大程度地提高了GNSS ZTD大气相位延迟的建模精度。通过与传统方法进行对比,对于单幅干涉图,本文联合方法改正后的InSAR相位RMSE减少值可达77%以上,优于幂律函数(最高为73%)、GACOS产品(61%)和气象再分析数据ERA5(58%)。

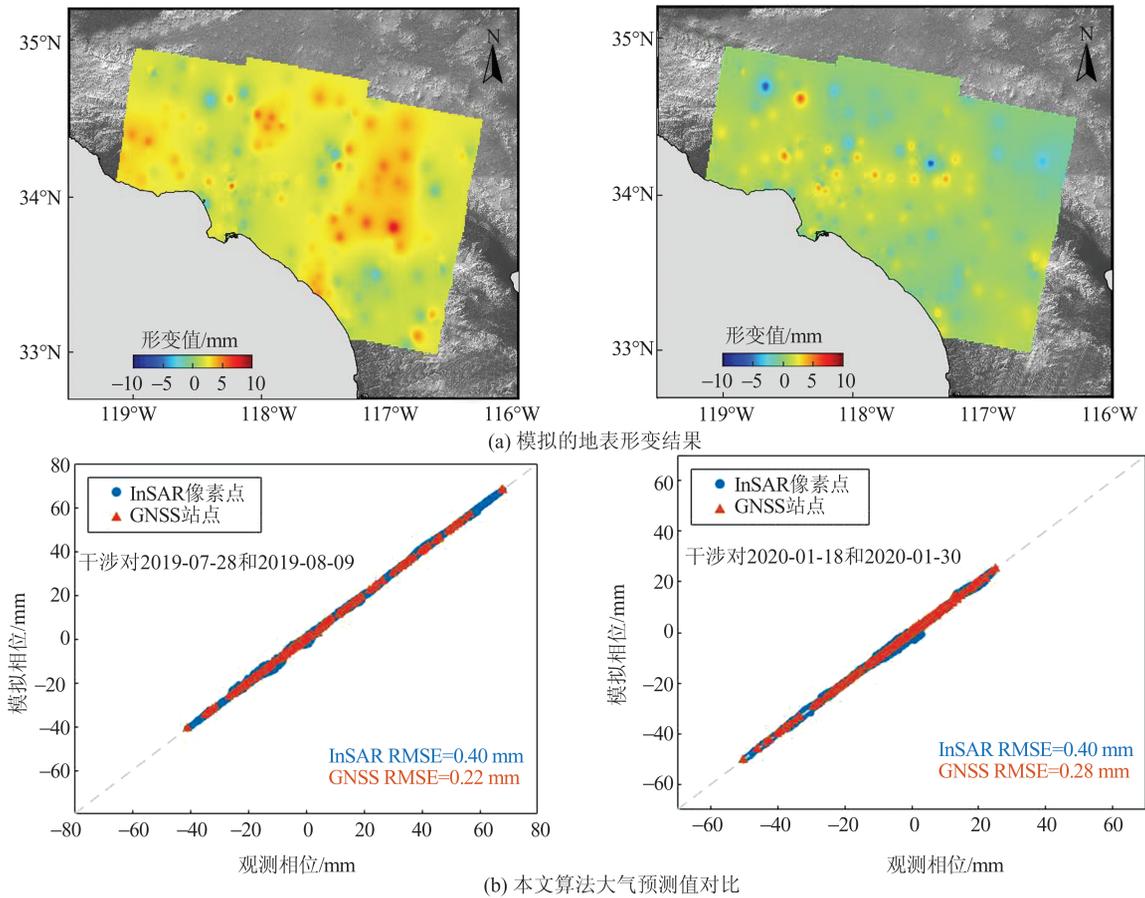


图 11 模拟实验结果

Fig. 11 Results of the Simulation Experiment

对本文联合方法影响因子的敏感性进行分析,发现训练集的空间分布对改正效果至关重要,而数据集大小的影响并不明显;进一步通过模拟实验发现,当实验期间发生地表形变时,本文算法的大气延迟建模依旧具有很高的精度;最后通过将 GNSS 站点进行空间降采样发现,GNSS 站点空间密度为 30 km 左右时,联合方法依然可以进行高精度的大气相位建模,说明联合方法具有很好的鲁棒性和适用性。

随着全球 GNSS 网络的不断扩大,利用 GNSS ZTD 进行大范围高精度的大气相位建模也将变得更加可行。本文研究可为利用机器学习方法进行 InSAR 大气相位延迟建模提供一定的参考。

参 考 文 献

[1] 孙亚飞,江利明,柳林,等. TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 100-105.  
SUN Yafei, JIANG Liming, LIU Lin, et al. Generating and Evaluating Digital Terrain Model with TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry[J]. *Geo-*

*matics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 100-105.  
[2] 殷硕文,邵茜. 基于地形匹配的 InSAR 地形变化检测方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(1): 118-121.  
YIN Shuowen, SHAO Qian. A Method of Topographic Change Detection Base InSAR Terrain Matching Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 118-121.  
[3] 朱建军,付海强,汪长城. InSAR 林下地形测绘方法与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2030-2038.  
ZHU Jianjun, FU Haiqiang, WANG Changcheng. Methods and Research Progress of Underlying Topography Estimation over Forest Areas by InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2030-2038.  
[4] 何平,温扬茂,许才军,等. 用多时相 InSAR 技术研究廊坊地区地下水体积变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1181-1185.  
HE Ping, WEN Yangmao, XU Caijun, et al. Volume Change of Groundwater in Langfang Region Derived

- from Multi-temporal InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1181-1185.
- [5] CHAUSSARD E, MILILLO P, BÜRGMANN R, et al. Remote Sensing of Ground Deformation for Monitoring Groundwater Management Practices: Application to the Santa Clara Valley During the 2012–2015 California Drought[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 8566-8582.
- [6] OJHA C, SHIRZAEI M, WERTH S, et al. Sustained Groundwater Loss in California's Central Valley Exacerbated by Intense Drought Periods [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4449-4460.
- [7] 罗三明, 杨国华, 李陶, 等. PSInSAR方法探测意大利拉奎拉地震形变过程分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(5): 602-605.  
LUO Sanming, YANG Guohua, LI Tao, et al. Analysis of Deformation Process of the L'Aquila Earthquake Detected by PSInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 602-605.
- [8] 许才军, 何平, 温扬茂, 等. 日本2011 Tohoku-Oki Mw 9.0级地震的同震形变及其滑动分布反演: GPS和InSAR约束[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1387-1391.  
XU Caijun, HE Ping, WEN Yangmao, et al. Co-seismic Deformation and Slip Distribution for 2011 Tohoku-Oki Mw 9.0 Earthquake: Constrained by GPS and InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1387-1391.
- [9] LINDSEY E O, NATSUAKI R, XU X H, et al. Line-of-Sight Displacement from ALOS-2 Interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 Aftershock [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(16): 6655-6661.
- [10] 许才军, 何平, 温扬茂. 利用PSInSAR研究意大利Etna火山的地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(9): 1012-1016.  
XU Caijun, HE Ping, WEN Yangmao. Surface Deformation of Mt. Etna, Italy from PSInSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1012-1016.
- [11] SPAANS K, HOOPER A. InSAR Processing for Volcano Monitoring and Other Near-Real Time Applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(4): 2947-2960.
- [12] 敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改进的CR-InSAR技术用于四川甲居滑坡形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(3): 377-383.  
AO Meng, ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, et al. An Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 377-383.
- [13] 刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测一号卫星滑坡大变形InSAR监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1753-1762.  
LIU Bin, ZHANG Li, GE Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1753-1762.
- [14] 龚志强, 唐伟, 蒋金豹, 等. 基于时序InSAR技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1422-1433.  
GONG Zhiqiang, TANG Wei, JIANG Jinbao, et al. Monitoring and Modeling of Land Subsidence in Liaohe Delta Oilfield Based on Time Series InSAR Technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1422-1433.
- [15] 郑美楠, 邓喀中, 郭庆彪, 等. 淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷InSAR监测与规律分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1356-1366.  
ZHENG Meinan, DENG Kazhong, GUO Qingbiao, et al. Monitoring and Law Analysis of Surface Secondary Subsidence of Closed Mines in Huainan Mining Area Based on InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1356-1366.
- [16] NEELY W R, BORSA A A, SILVERII F. GInSAR: A CGPS Correction for Enhanced InSAR Time Series [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(1): 136-146.
- [17] HUSSAIN E, WRIGHT T J, WALTERS R J, et al. Constant Strain Accumulation Rate Between Major Earthquakes on the North Anatolian Fault [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1392.
- [18] 祝杰, 李瑜, 王坦, 等. 重轨星载InSAR形变监测中一种改进的大气延迟相位校正方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(11): 1164-1169.  
ZHU Jie, LI Yu, WANG Tan, et al. An Improved Atmospheric Phase Delay Correction Method in Spaceborne Repeat-Track InSAR Monitoring [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(11): 1164-1169.
- [19] SHEHAJ E, WILGAN K, FREY O, et al. A Collocation Framework to Retrieve Tropospheric De-

- lays from a Combination of GNSS and InSAR[J]. *Navigation*, 2020, 67(4): 823-842.
- [20] ROUET-LEDUC B, JOLIVET R, DALAISON M, et al. Autonomous Extraction of Millimeter-Scale Deformation in InSAR Time Series Using Deep Learning[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6480.
- [21] HOOPER A, BEKAERT D, SPAANS K, et al. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation[J]. *Tectonophysics*, 2012, 514: 1-13.
- [22] 崔喜爱, 曾琪明, 童庆禧, 等. 重轨星载 InSAR 测量中的大气校正方法综述[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 9-17.
- CUI Xi'ai, ZENG Qiming, TONG Qingxi, et al. Overview of the Atmospheric Correction Methods in Repeat-Pass InSAR Measurements [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(1): 9-17.
- [23] 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.
- 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): 1531-1537.
- [24] 何永红, 靳鹏伟, 舒敏. 基于多尺度相关性分析的 InSAR 对流层延迟误差改正算法[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(9): 1878-1886.
- HE Yonghong, JIN Pengwei, SHU Min. InSAR Tropospheric Delay Error Correction Algorithm Based on Multi-scale Correlation Analysis[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(9): 1878-1886.
- [25] 姜宇, 单新建, 宋小刚, 等. InSAR 大气误差改正及其在活动断层形变监测中的应用[J]. *地震学报*, 2017, 39(3): 374-385.
- JIANG Yu, SHAN Xinjian, SONG Xiaogang, et al. Atmospheric Correction for InSAR and Its Application in Mapping Ground Motion Due to Interseismic Strain Accumulation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(3): 374-385.
- [26] ZHU M, ZENG Q M, JIAO J. Quantitative Assessment to the Impact of InSAR Ionospheric and Tropospheric Corrections on Source Parameter Modelling: Application to the 4th Nuclear Test, North Korea [J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 224(1): 86-99.
- [27] 李鹏, 高梦瑶, 李振洪, 等. 阿尔金断裂带宽幅 InSAR 对流层延迟估计方法评估[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(6): 879-887.
- LI Peng, GAO Mengyao, LI Zhenhong, et al. Evaluation of Wide-Swath InSAR Tropospheric Delay Estimation Methods over the Altyn Tagh Fault [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 879-887.
- [28] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 967-979.
- LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979.
- [29] COSTANTINI M, FERRETTI A, MINATI F, et al. Analysis of Surface Deformations over the Whole Italian Territory by Interferometric Processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed Radar Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 250-275.
- [30] 徐甫, 王政, 李振洪, 等. 复杂环境下的地基雷达大气改正方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(12): 2069-2081.
- XU Fu, WANG Zheng, LI Zhenhong, et al. An Atmospheric Correction Method for Ground-Based Radar Under Complex Environment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 2069-2081.
- [31] JOLIVET R, AGRAM P S, LIN N Y, et al. Improving InSAR Geodesy Using Global Atmospheric Models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(3): 2324-2341.
- [32] 占文俊, 李志伟, 韦建超, 等. 一种 InSAR 大气相位建模与估计方法[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2320-2329.
- ZHAN Wenjun, LI Zhiwei, WEI Jianchao, et al. A Strategy for Modeling and Estimating Atmospheric Phase of SAR Interferogram [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2320-2329.
- [33] MURRAY K D, BEKAERT D P S, LOHMAN R B. Tropospheric Corrections for InSAR: Statistical Assessments and Applications to the Central United States and Mexico [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111326.
- [34] MURRAY K D, LOHMAN R B, BEKAERT D P S. Cluster-Based Empirical Tropospheric Corrections Applied to InSAR Time Series Analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(3): 2204-2212.

- [35] 高梦瑶, 许才军, 刘洋. 青藏高原西北缘时序 InSAR 对流层延迟改正方法评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1548-1559.  
GAO Mengyao, XU Caijun, LIU Yang. Evaluation of Time-Series InSAR Tropospheric Delay Correction Methods over Northwestern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1548-1559.
- [36] 李鹏, 李振洪, 李陶, 等. 宽幅 InSAR 大地测量学与大尺度形变监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1195-1202.  
LI Peng, LI Zhenhong, LI Tao, et al. Wide-Swath InSAR Geodesy and Its Applications to Large-Scale Deformation Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1195-1202.
- [37] 唐伟, 廖明生, 张丽, 等. 基于全球气象再分析资料的 InSAR 对流层延迟改正研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 527-540.  
TANG Wei, LIAO Mingsheng, ZHANG Li, et al. Study on InSAR Tropospheric Correction Using Global Atmospheric Reanalysis Products [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(2): 527-540.
- [38] HU Z B, MALLORQU I J. An Accurate Method to Correct Atmospheric Phase Delay for InSAR with the ERA5 Global Atmospheric Model [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1969.
- [39] JUNG J, KIM D J, PARK S E. Correction of Atmospheric Phase Screen in Time Series InSAR Using WRF Model for Monitoring Volcanic Activities [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2678-2689.
- [40] 常亮, 郭立新, 冯贵平. MODIS 红外水汽校正及其在 InSAR 大气改正中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(1): 47-51.  
CHANG Liang, GUO Lixin, FENG Guiping. Calibration of MODIS Water Vapor Product at Infrared Band and Its Application to InSAR Atmospheric Correction [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(1): 47-51.
- [41] 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.  
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.
- [42] JOLIVET R, GRANDIN R, LASSERRE C, et al. Systematic InSAR Tropospheric Phase Delay Corrections from Global Meteorological Reanalysis Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): L17311.
- [43] SCHMIDT D A, BÜRGMANN R, NADEAU R M, et al. Distribution of Aseismic Slip Rate on the Hayward Fault Inferred from Seismic and Geodetic Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B8): B08406.
- [44] WEI M, SANDWELL D, SMITH-KONTER B. Optimal Combination of InSAR and GPS for Measuring Interseismic Crustal Deformation [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(2): 236-249.
- [45] CAO Y M, LI Z W, WEI J C, et al. Stochastic Modeling for Time Series InSAR: With Emphasis on Atmospheric Effects [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(2): 185-204.
- [46] GONG W Y, ZHAO D Z, ZHU C H, et al. A New Method for InSAR Stratified Tropospheric Delay Correction Facilitating Refinement of Coseismic Displacement Fields of Small-to-Moderate Earthquakes [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1425.
- [47] HOULIÉ N, FUNNING G J, BÜRGMANN R. Use of a GPS-Derived Troposphere Model to Improve InSAR Deformation Estimates in the San Gabriel Valley, California [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5365-5374.
- [48] YU C, LI Z H, CHEN J J, et al. Small Magnitude Co-Seismic Deformation of the 2017 Mw 6.4 Nyingchi Earthquake Revealed by InSAR Measurements with Atmospheric Correction [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 684.
- [49] 陈元洪, 郭际明, 陈品祥, 等. 基于 CORS 的 DInSAR 大气延迟校正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(6): 1026-1030.  
CHEN Yuanhong, GUO Jiming, CHEN Pinxiang, et al. Reduction of Atmospheric Effects on InSAR Interferograms Based on CORS [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(6): 1026-1030.
- [50] REUVENI Y, BOCK Y, TONG X P, et al. Calibrating Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Images with Regional GPS Network Atmosphere Models [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202(3): 2106-2119.
- [51] RICCARDI U, TAMMARO U, CAPUANO P. Tropospheric Delay in the Neapolitan and Vesuvius Areas (Italy) by Means of a Dense GPS Array: A Contribution for Weather Forecasting and Climate Monitoring [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(9): 1225.

- [52] 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.
- [53] WALTERS R J, ELLIOTT J R, LI Z, et al. Rapid Strain Accumulation on the Ashkabad Fault (Turkmenistan) from Atmosphere-Corrected InSAR [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(7): 3674-3690.
- [54] WILGAN K, HURTER F, GEIGER A, et al. Tropospheric Refractivity and Zenith Path Delays from Least-Squares Collocation of Meteorological and GNSS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(2): 117-134.
- [55] SPOORTHI G E, GORTHI S, GORTHI R K S. PhaseNet: A Deep Convolutional Neural Network for Two-Dimensional Phase Unwrapping [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(1): 54-58.
- [56] MA L, LIU Y, ZHANG X L, et al. Deep Learning in Remote Sensing Applications: A Meta-Analysis and Review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 152: 166-177.
- [57] JIN J C, CHEN G, MENG X M, et al. Prediction of River Damming Susceptibility by Landslides Based on a Logistic Regression Model and InSAR Techniques: A Case Study of the Bailong River Basin, China [J]. *Engineering Geology*, 2022, 299: 106562.
- [58] XUE X M. Time-Dependent Modeling of Volcano Deformation in Alaska and Transient Detection Using Machine Learning Methods[D]. East Lansing, MI, USA: Michigan State University, 2021.
- [59] SHAMSHIRI R, MOTAGH M, NAHAVAND-CHI H, et al. Improving Tropospheric Corrections on Large-Scale Sentinel-1 Interferograms Using a Machine Learning Approach for Integration with GNSS-Derived Zenith Total Delay (ZTD) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111608.
- [60] TANG W, LIAO M S, ZHANG L, et al. Study on InSAR Tropospheric Correction Using Global Atmospheric Reanalysis Products [J]. 2017, 60(2): 527-540.
- [61] PRATS-IRAOLA P, SCHEIBER R, MAROTTI L, et al. TOPS Interferometry with TerraSAR-X [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3179-3188.
- [62] COSTANTINI M. A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.
- [63] BÉLISLE E, HUANG Z, LE DIGABEL S, et al. Evaluation of Machine Learning Interpolation Techniques for Prediction of Physical Properties [J]. *Computational Materials Science*, 2015, 98: 170-177.
- [64] 李永生, 张景发, 姜文亮, 等. 基于网络法时序 InSAR 大气误差校正方法研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(1): 145-149.
- LI Yongsheng, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. Atmospheric Artifacts Correction in Time Series InSAR Using Network Methodology [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(1): 145-149.
- [65] BEKAERT D P S, WALTERS R J, WRIGHT T J, et al. Statistical Comparison of InSAR Tropospheric Correction Techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 40-47.