

新一代中国全球大气再分析产品(CMA-RA V1.5) InSAR大气延迟误差改正:评估与应用

肖儒雅, 李瑞, 陆兆威, 王迅, 何秀凤

河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100

摘要: 大气延迟是合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 的主要误差源之一, 对其进行高精度改正是提升 InSAR 应用可靠性的关键。基于外部数据 (如成像光谱仪、气象模型产品等) 进行 InSAR 大气改正当前应用最为广泛的技术手段。在中国第一代全球大气和陆面再分析产品 CRA (China's First Generation Global Atmosphere and Land Reanalysis Product) 基础上, 新一代中国全球大气再分析产品 CRA1.5 (China Meteorological Administration Global Atmospheric Reanalysis Version 1.5, CMA-RA V1.5) 提供了逐小时更新、水平分辨率达 10 km、覆盖 1979 年至今的全球三维大气参数。本文首次将 CRA1.5 产品应用于 InSAR 大气延迟误差改正, 并对其性能进行系统性评估。首先采用分层积分方法对再分析数据中的位势高度、温度及比湿参数进行高分辨率垂直插值, 精确估计天顶对流层延迟; 进而结合迭代对流层分解模型, 将离散对流层延迟插值为空间连续延迟场, 用于改正干涉相位中的大气信号。在中国山东省与美国加利福尼亚州两个研究区, 利用 2021 年—2023 年哨兵一号卫星数据, 生成共 870 幅干涉图, 从相位统计量、空间结构与地形相关性等多个维度构建综合评估体系, 全面检验了 CRA1.5 的改正性能, 并与广泛应用的第五代欧洲中期天气预报中心气候再分析数据 ERA5 (Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis of the Global Climate) 和通用型卫星雷达大气改正系统 GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) 进行了对比。结果表明, CRA1.5 可显著降低干涉图相位标准差 (两个研究区内平均降幅超过 30%), 有效抑制长波大气信号及高程相关误差, 综合性能与 ERA5 和 GACOS 相当。CRA1.5 具备优良的时空一致性与可靠性, 能够有效削弱 InSAR 大气延迟误差, 为中国发展自主可控的高精度大气改正技术提供了重要数据支撑, 对推动国产再分析资料在遥感量化应用方面具有重要意义。

关键词: InSAR, 对流层延迟, 大气改正, CRA1.5, 统计评估, 相位标准差, 空间结构函数

中图分类号: P228/P237/P2

引用格式: 肖儒雅, 李瑞, 陆兆威, 王迅, 何秀凤. 2026. 新一代中国全球大气再分析产品(CMA-RA V1.5) InSAR 大气延迟误差改正: 评估与应用. 遥感学报, 30(4): 819–832

Xiao R Y, Li R, Lu Z W, Wang X and He X F. 2026. New generation of China Meteorological Administration's Global Atmospheric Reanalysis Products (CMA-RA V1.5) for InSAR atmospheric correction: Evaluation and application. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 819–832 [DOI: 10.11834/jrs.20265366]

1 引言

合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术作为一种全天时、全天候、大范围同步观测的影像大地测量手段, 已被广泛应用于地形测绘 (Dong 等, 2022; Cao 等, 2025)、地表形变监测 (Dong 等, 2023; 肖儒雅 等, 2025)、地震形变反演 (Wang 等, 2014)、火山活动监测 (Xu 等, 2023) 及滑坡与边坡稳定性评估

(Dong 等, 2018; Dai 等, 2020; 戴可人 等, 2022; 朱建军 等, 2022) 等领域。然而, 雷达信号在大气传播过程中受到对流层延迟效应的影响, 制约了 InSAR 技术的高精度应用, 尤其是温度、湿度和气压变化引起的大气延迟误差, 往往掩盖真实地表形变信号 (Hooper 等, 2012; Bekaert 等, 2015), 造成地球物理过程的错误解译。

为抑制对流层延迟对 InSAR 监测结果的影响, 过去几十年间已发展出多种改正方法, 总体上可

收稿日期: 2025-09-12; 预印本: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42574067, 42174018)

第一作者简介: 肖儒雅, 研究方向为影像大地测量理论方法与应用。E-mail: ruya.xiao@hhu.edu.cn

通信作者简介: 何秀凤, 研究方向为卫星大地测量理论方法、GNSS 遥感与应用等。E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

分为基于干涉相位的改正方法和基于外部数据的改正方法。基于干涉相位的改正方法依据大气延迟在时空域的分布特征,包括时空滤波(Crosetto等, 2002)、干涉图叠加(Ferretti等, 2011; Xiao等, 2022; 李思慧等, 2023; Duan等, 2024)、干涉相位与地形的相关性分析(Elliott等, 2008; Shirzaei和Bürgmann, 2012; Liang等, 2023)等,这些方法不依赖外部气象数据,可削弱大气延迟误差的影响。基于外部数据的改正方法包括利用GNSS天顶对流层延迟(Onn和Zebker, 2006; Houlie等, 2016; Yu等, 2017, 2018a)、成像光谱仪数据(Li等, 2006, 2012; 刘圣伟等, 2007)以及大气再分析产品或业务预报模型(Jolivet等, 2014; 曾琪明等, 2016; Yu等, 2018b)等,核心在于利用外部观测数据对对流层延迟情况进行估计,进而用于InSAR干涉相位的改正。基于外部数据的改正方法因其较好的应用效果得到了广泛的应用,但此类方法也存在一定局限性:GNSS观测数据可提供高精度天顶对流延迟估计,但其空间分辨率受站点分布的限制,连续性较差;多光谱遥感易受云的影响,无法适用于所有SAR数据。大气再分析数据具有良好的时空连续性及较高精度,可更好的应用于InSAR大气改正。

利用中国第一代全球大气和陆面再分析产品CRA (China's First Generation Global Atmosphere and Land Reanalysis Product) 计算得到的天顶对流层延迟ZTD (Zenith Total Delay), 精度与欧洲中期天气预报中心ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的再分析中间产品ERA-I (ECMWF Interim Re-Analysis) 相当(周要宗等, 2023), 在InSAR大气改正中已展现出良好效果(袁煜伟等, 2025)。在此基础上的新一代中国全球大气再分析产品CMA-RA V1.5 (China Meteorological Administration Global Atmospheric Reanalysis Version 1.5, 后续简称为CRA1.5) 为高精度大气分析提供了新的数据基础。当前该数据在InSAR大气延迟误差改正中的适用性和性能尚未得到系统评估,亟需开展相关研究。

本文基于CRA1.5数据采用分层积分方法计算天顶对流层延迟,并利用迭代对流层分解ITD (Iterative Tropospheric Decomposition) 模型将ZTD数据插值至InSAR几何空间,用于大气延迟误差改正。研究选取中国山东省与美国加利福尼亚州

(简称“加州”)作为实验区,采用相位标准差、空间结构函数及相位-高程相关系数三项指标对改正结果进行综合评价,并与第五代ECMWF全球气候再分析数据ERA5 (Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis of the Global Climate) 和通用型卫星雷达大气改正系统GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR) 进行对比分析。

2 数据及研究区域

2.1 大气数据产品介绍

大气再分析数据通过融合多源观测资料与数值模式,重构历史大气状态,为气象、气候及遥感研究等提供具有高时空一致性的环境参量。近年来,随着数据同化技术的不断进步和计算能力的显著提升,国内外研发了多套全球再分析产品,其在时空分辨率、同化算法及数据覆盖范围等方面均取得重要进展。ERA5是目前国际上广泛应用的高精度再分析产品之一,它是基于四维变分同化系统(4D-Var),融合了包括地面气象站、无线电探空和卫星遥感等在内的全球多源观测数据形成的,数据垂直分层37层,时空分辨率为31 km/h (Hersbach等, 2020)。

2021年,中国气象局发布了中国第一代全球大气和陆面再分析产品(CRA),该产品采用三维变分数据同化(3D-Var)方法,重现了1979年—2018年地面至55 km高度的全球三维大气状态,垂直分层64层,时空分辨率为34 km/6 h (Liu等, 2023)。新一代中国全球大气再分析产品CRA1.5基于四维集合变分混合同化(Hybrid-4D-EnVar)和集合卡尔曼滤波技术,整合了中国第一代全球大气再分析数据、中国区域特有常规观测资料以及其他全球观测数据,提供从1979年至今的全球大气再分析数据,包含位势高度、温度、比湿等多种变量,垂直分层47层,时空分辨率达到10 km/h (Zhang等, 2025)。

GACOS系统最早由李振洪教授团队在英国纽卡斯尔大学开发、现由长安大学影像大地测量团队维护,是全球首个高分辨率InSAR大气改正在线服务系统。GACOS基于ECMWF高分辨率天气预报HRES模型数据(垂直分层137层、时空分辨率10 km/6 h),利用ITD模型生成高分辨率天顶对流层延迟结果(Yu等, 2017, 2018a, 2018b)。

具有全球可用、近实时、高可靠性等优势，显著降低了 InSAR 大气延迟误差改正的技术门槛，在行业获得广泛应用和认可。

2.2 研究区域和 SAR 数据

本文实验区域选取中国山东省和美国加州。山东省位于中国东部沿海地区，东濒黄海和渤海，地形以平原和丘陵为主，属温带季风气候，四季分明，受海洋季风影响显著，降水多集中于夏季；加州位于美国西海岸，西邻太平洋，地形包括近海平原与

山脉，气候类型多样，南部主要属地中海气候，降水集中于冬季，冬季温和湿润、夏季干燥少雨。

哨兵一号 (Sentinel-1) 卫星搭载 C 波段合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 传感器，影像分辨率约 20 m，是当前 InSAR 形变监测领域应用最广泛的数据源。本研究选取 2021 年—2023 年期间覆盖中国山东和美国加州区域的哨兵一号渐进式扫描地形观测 TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) 模式雷达单视复数影像，影像覆盖范围如图 1 所示。

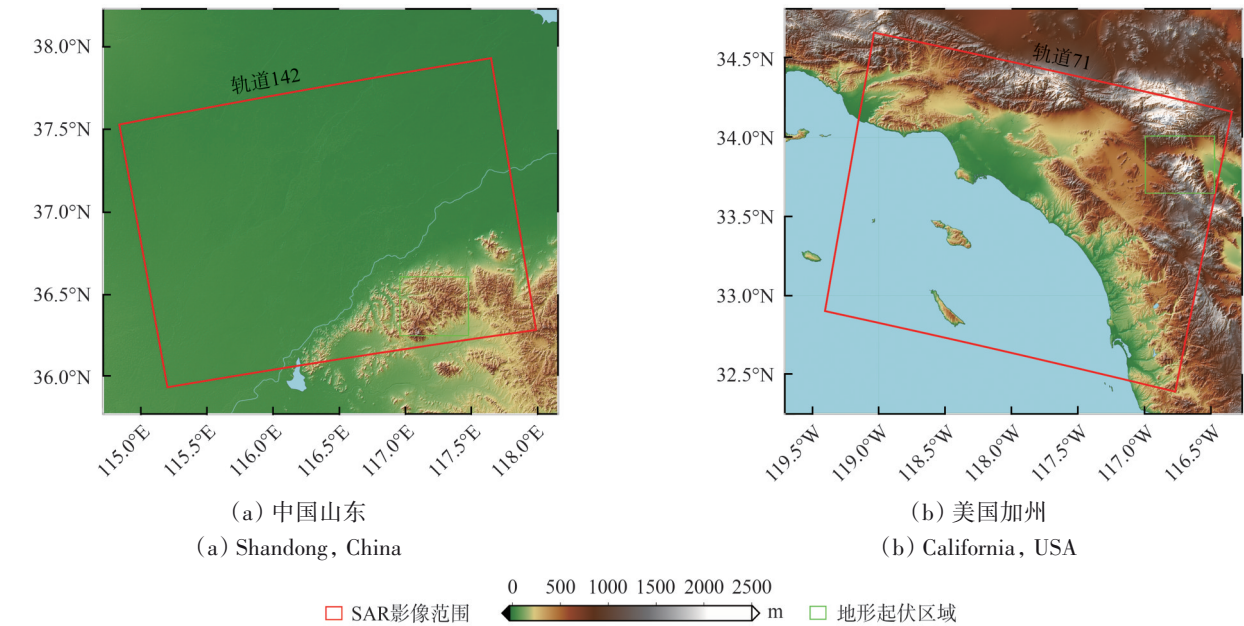
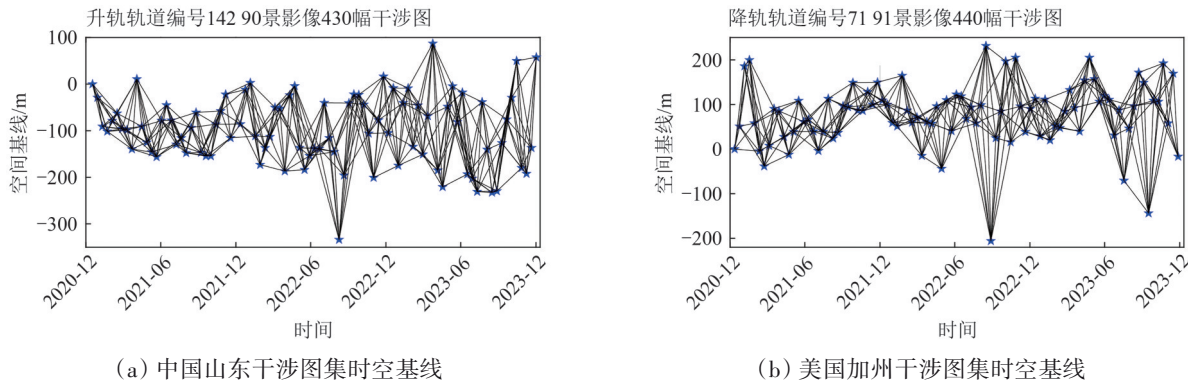


图 1 研究区域地形概况及 SAR 影像覆盖范围
Fig. 1 Topography of the study area and SAR image coverage

山东地区 SAR 影像轨道编号为 142，升轨获取，共 90 景；加州地区影像轨道编号为 71，降轨获取，共 91 景。在设置时间基线不超过 60 d、每

个日期向后生成最多 5 个干涉对的约束条件下，两地区分别生成 430 幅和 440 幅干涉图。干涉图集的时空基线分布如图 2 所示。



(a) Spatio-temporal baselines of interferograms in Shandong, China (b) Spatio-temporal baselines of interferograms in California, USA

图 2 干涉图集时空基线
Fig. 2 Spatio-temporal baselines of interferograms

3 InSAR 大气延迟误差改正及评估方法

对流层对 SAR 信号的延迟主要源于干气体和水汽引起的电磁波折射率变化, 导致传播路径延长, 表现为干延迟和湿延迟。干延迟主要受大气压力和温度控制, 通常较为稳定, 可通过模型有效估计; 湿延迟由大气水汽引起, 具有显著的时空变异性, 难以准确建模, 因此成为 InSAR 相位误差的主要来源。上述延迟效应会在干涉图中引入伪形变信号, 影响地表形变监测的精度, 在高湿度或地形起伏较大区域尤为明显。

本研究利用 CRA1.5 数据进行 InSAR 大气延迟误差改正, 并以全球广泛应用的再分析数据 ERA5 和大气改正系统 GACOS 作为参照, 系统评估其改正效能。具体流程包括: 首先, 根据大气垂直分层特性, 对 CRA1.5 和 ERA5 的垂直层次进行细化插值, 通过积分计算获取格网点处的 ZTD; 随后, 利用 ITD 模型 (Yu 等, 2018b) 将离散 ZTD 插值为高分辨率连续场, 用于 InSAR 大气改正; 最后, 基于相位标准差、空间结构函数及相位—高程相关系数 3 项指标, 综合评估 CRA1.5、ERA5 和 GACOS 在 InSAR 大气改正中的效果。

3.1 大气再分析数据处理

受地球重力作用, 大气呈现出显著的垂直分层特性, 近地表区域大气密度较高, 气压与密度随高度增加近似呈指数递减, 导致电磁波折射效应主要集中在近地层。本文采用分层积分方法处理 CRA1.5 和 ERA5 再分析数据在 0—50 km 高度范围内的大气参数, 间隔随高度变化: 0—2 km 区间步长为 2 m, 2—6 km 为 10 m, 6—16 km 为 20 m, 16—36 km 为 50 m, 36—50 km 为 200 m。从再分析数据中获取位势高度、温度和湿度数据, 并根据比湿和气压计算水汽压。在垂直细化层中, 温度采用线性方法插值, 气压与水汽压采用对数形式插值, 最终通过积分计算得到每个格网点的 ZTD 值:

$$\text{ZTD} = 10^{-6} \left(\frac{k_1 R_d}{g} P_{\text{sur}} + \left(k_2 - \frac{k_1 R_d}{R_v} \right) \int_{h_0}^{h_{\text{max}}} \frac{e}{T} dh + k_3 \int_{h_0}^{h_{\text{max}}} \frac{e}{T^2} dh \right) \quad (1)$$

式中, $k_1=0.776$ K/Pa, $k_2=0.716$ K/Pa, $k_3=3750$ K²/Pa,

$R_d=287.05$ J/kg·K, $R_v=461.495$ J/kg·K, $g=9.81$ m/s², P_{sur} 为地表气压, e 为水汽压, T 为温度, h_0 为地表高程。

对流层大气水汽延迟通常表现出显著的垂直与水平空间变异。Yu 等 (2017, 2018a, 2018b) 提出的 ITD 模型通过分离湍流和高程相关分量, 有效提升了 ZTD 的插值精度。本文基于 ITD 模型, 结合 90 m 分辨率的哥白尼数字高程模型 DEM (Copernicus Digital Elevation Model), 将 ZTD 分解为分层延迟和湍流延迟, 进而生成覆盖研究区域的高分辨率连续 ZTD 场。其模型表达式如下:

$$\text{ZTD}_k = T(x_k) + \text{ZTD}_0 e^{-\beta \bar{h}_k} + \varepsilon_k \quad (2)$$

式中, k 为待插值位置, T 表示湍流分量, x_k 是空间坐标向量; 分层分量以指数函数形式表示, 其中 ZTD_0 是待插值区域海平面处分层延迟分量, β 为衰减系数, $\bar{h}_k = (h_k - h_{\text{min}})/(h_{\text{max}} - h_{\text{min}})$ 为待插值位置 k 处的线性归一化高程, ε_k 为未建模残差。

ITD 模型的核心目标, 是在空间去相关范围内, 利用已知 ZTD 参考点迭代估计式 (2) 中的尺度函数 $\text{ZTD}_0 e^{-\beta \bar{h}_k}$ 。首先, 在假设无湍流信号的前提下, 初始估计 ZTD_0 和 β ; 随后, 利用反距离加权方法插值获得湍流信号, 并将其从总延迟中扣除, 以更新分层延迟分量; 通过多次迭代, 最终得到收敛的延迟系数 ZTD_0 和 β 。在此基础上, 将所有参考点的湍流延迟和残差插值到目标位置 k , 再结合分层延迟信息, 生成 CRA1.5 和 ERA5 对应的 InSAR 大气延迟图。

3.2 InSAR 大气改正

InSAR 干涉相位表示为

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{noise}} + \varphi_{\text{atm}} \quad (3)$$

式中, 地形相位 φ_{topo} 可通过外部 DEM 予以去除, 轨道误差 φ_{orb} 利用卫星精密轨道数据校正, 噪声相位 φ_{noise} 则通过相干性筛选与空间滤波方法进行抑制。去除上述误差后, 干涉图大气延迟误差改正表示为

$$\varphi'_{\text{int}} = -\frac{4\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) - \frac{4\pi}{\lambda} (\text{ZTD}_2^{\text{LOS}} - \text{ZTD}_1^{\text{LOS}}) \quad (4)$$

式中, λ 为雷达信号波长; r_1 和 r_2 分别是 t_1 和 t_2 时刻的斜距矢量, $\text{ZTD}_1^{\text{LOS}}$ 和 $\text{ZTD}_2^{\text{LOS}}$ 分别为对应时刻沿视线方向 LOS (Line of Sight) 的天顶对流层延迟。

3.3 InSAR 大气改正效果评估

基于物理特性, 大气延迟可分解为长波信号

分量和垂直分层分量。前者在平原和山区均存在，后者则与地形高度密切相关，在地形起伏较大的山区和丘陵地区尤为显著（Xiao等，2021）。本文采用相位标准差 Std（Standard Deviation）、空间结构函数 SSF（Spatial Structure Function）及相位—高程相关系数 3 项指标，系统评估 CRA1.5、ERA5 和 GACOS 在 InSAR 大气改正中的效果。

（1）干涉图相位标准差。干涉图相位标准差用于在无显著地表形变情况下，评估 InSAR 大气改正质量（Doin等，2009）。本文所选干涉图集的时间基线控制在 60 d 以内，可认为短期内地表形变较小，干涉相位中的主导信号为大气延迟。相位标准差的大小直接反映了大气信号的强度：

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (pha_i - \overline{pha_i})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中， pha_i 为像素 i 位置处相位值， $\overline{pha_i}$ 为该干涉图的相位均值，大气改正后相位标准差的降低表明大气延迟误差得到了有效抑制。

（2）空间结构函数。空间结构函数用于评估大气改正对长波信号的削弱效果。InSAR 干涉图中的长波信号误差常表现为空间趋势面，即相位在空间上呈系统性变化。通过空间结构函数可量化干涉相位值随空间距离变化的统计特征：

$$SSF(\vec{h}) = E\left(\left(f(x) - f\left(x + \vec{h}\right)\right)^2\right) \quad (6)$$

式中， x 为空间位置， $\vec{h}$ 是长度为 h 的向量。在各向同性假设下，可忽略方向影响，式（5）中的 $\vec{h}$ 可用标量 h 代替，即表示为距离结构函数：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\left(\left(f(x) - f(x+h)\right)^2\right) \quad (7)$$

半变异函数通常随距离增加而增大，直至达到去相关范围后趋近于稳定，该稳定值称为基台值。大气改正后去相关距离和基台值减小，表明长波信号被削弱。在实际处理中，去相关距离和基台值通常通过将理论模型拟合到实验半变异函数获得，当去相关距离超出实验半变异函数所覆盖的最大滞后距离时，模型外推部分缺乏数据约束，拟合结果可能产生一定的“边界效应”。

（3）相位—高程相关系数。大气延迟的垂直分层分量源于不同高度处大气状态的差异，常导致干涉相位与地形高程之间存在相关性。相位—高程相关系数可用于描述该依赖关系的强弱

（Jolivet等，2014）。经大气改正后，相位—高程相关系数的绝对值降低，表明相位中与地形相关的大气信号得以减弱，垂直分层分量的改正效果良好。

4 结果与分析

4.1 干涉图相位标准差统计评估

在两个研究区内，分别计算干涉图在大气改正前后的相位标准差，统计结果如图 3 所示。图 3 中第一列分别展示了山东地区 430 幅干涉图和加州地区 440 幅干涉图经 CRA1.5、ERA5 和 GACOS 大气改正前后的相位标准差。改正前，两地的原始相位标准差均存在一定程度的季节性波动。在多数情况下，经 CRA1.5、ERA5 和 GACOS 改正后，相位标准差均有所降低。山东和加州地区原始干涉图序列的平均相位标准差和不确定度分别为 6.22 ± 4.26 rad 和 5.15 ± 2.12 rad。改正后，山东地区干涉图序列的平均相位标准差分别降低至 4.18 ± 1.90 rad（CRA1.5）、 4.07 ± 1.90 rad（ERA5）和 4.35 ± 2.13 rad（GACOS）；加州地区干涉图序列的平均相位标准差分别降低至 3.26 ± 1.19 rad（CRA1.5）、 2.99 ± 1.07 rad（ERA5）和 2.97 ± 1.20 rad（GACOS）。大气改正后，相位标准差的季节性波动特征也得到了抑制。

图 3 中第二列分别展示了山东和加州地区干涉图相位标准差在大气改正前后的绝对变化情况，其中正值代表改正后相位标准差下降。在山东地区，CRA1.5、ERA5 和 GACOS 改正分别使 73.49%、78.84% 和 73.49% 的干涉图相位标准差降低，平均降幅分别为 32.80%、34.57% 和 30.06%。在加州地区，三者分别使 87.50%、89.55% 和 88.41% 的干涉图相位标准差减小，平均降幅分别为 36.70%、41.94% 和 42.33%。

将相位标准差变化量与原始干涉图标准差的比值作为大气改正性能评价的指标，结果如图 4 所示。在山东地区，CRA1.5 改正后标准差减小 40%—60% 的干涉图占比最高，达 24.42%；而 ERA5 和 GACOS 改正后标准差减小 20%—40% 的占比最高，分别为 25.81% 和 26.45%。在加州地区，ERA5 和 GACOS 改正后标准差减小 40%—60% 的干涉图占比最高，分别为 31.36% 和 33.86%；而 CRA1.5 改正后则以 20%—40% 降幅为主，占比为 30.23%。

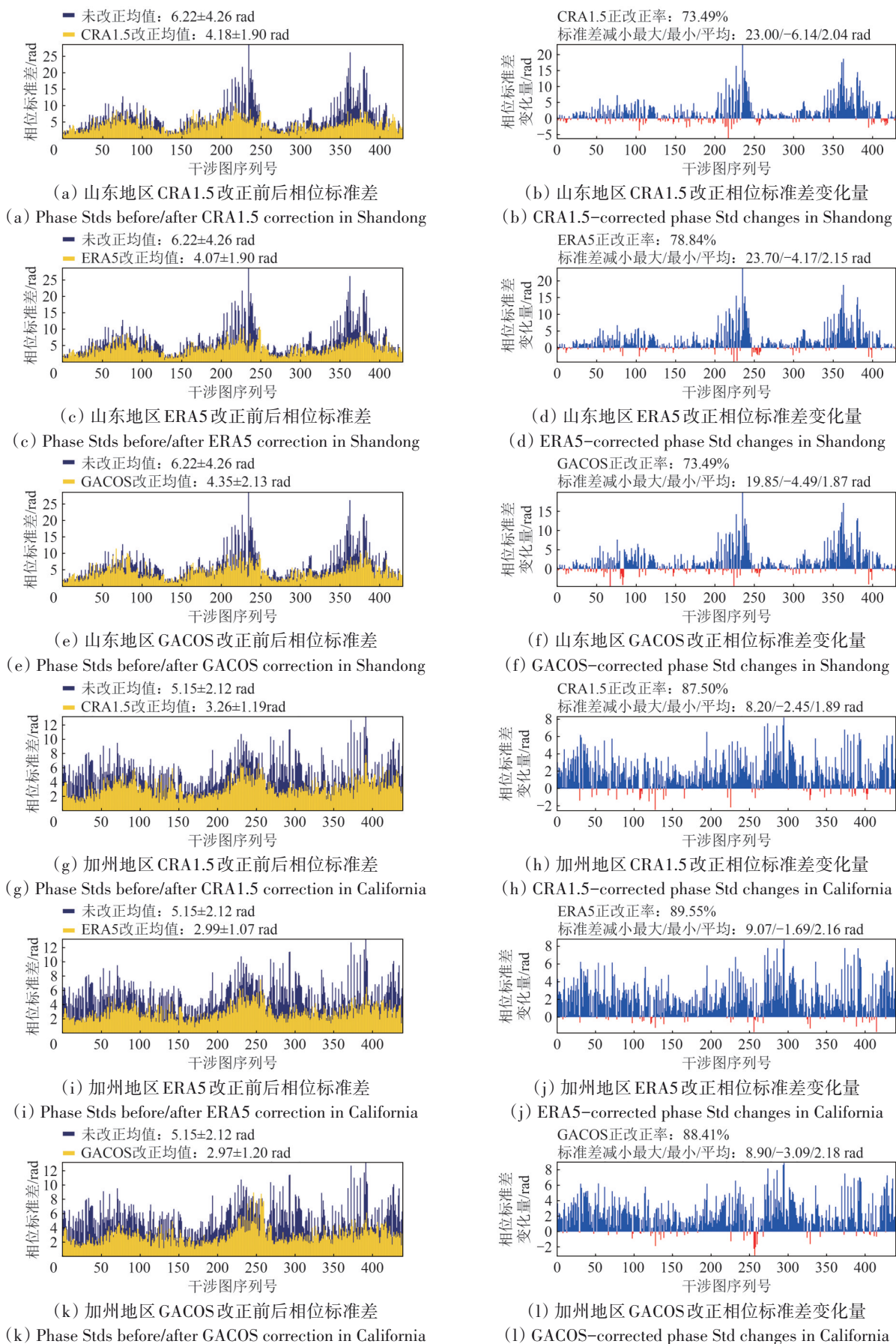


图3 大气改正前后相位标准差统计结果

Fig. 3 Statistical results of phase standard deviation before and after atmospheric correction

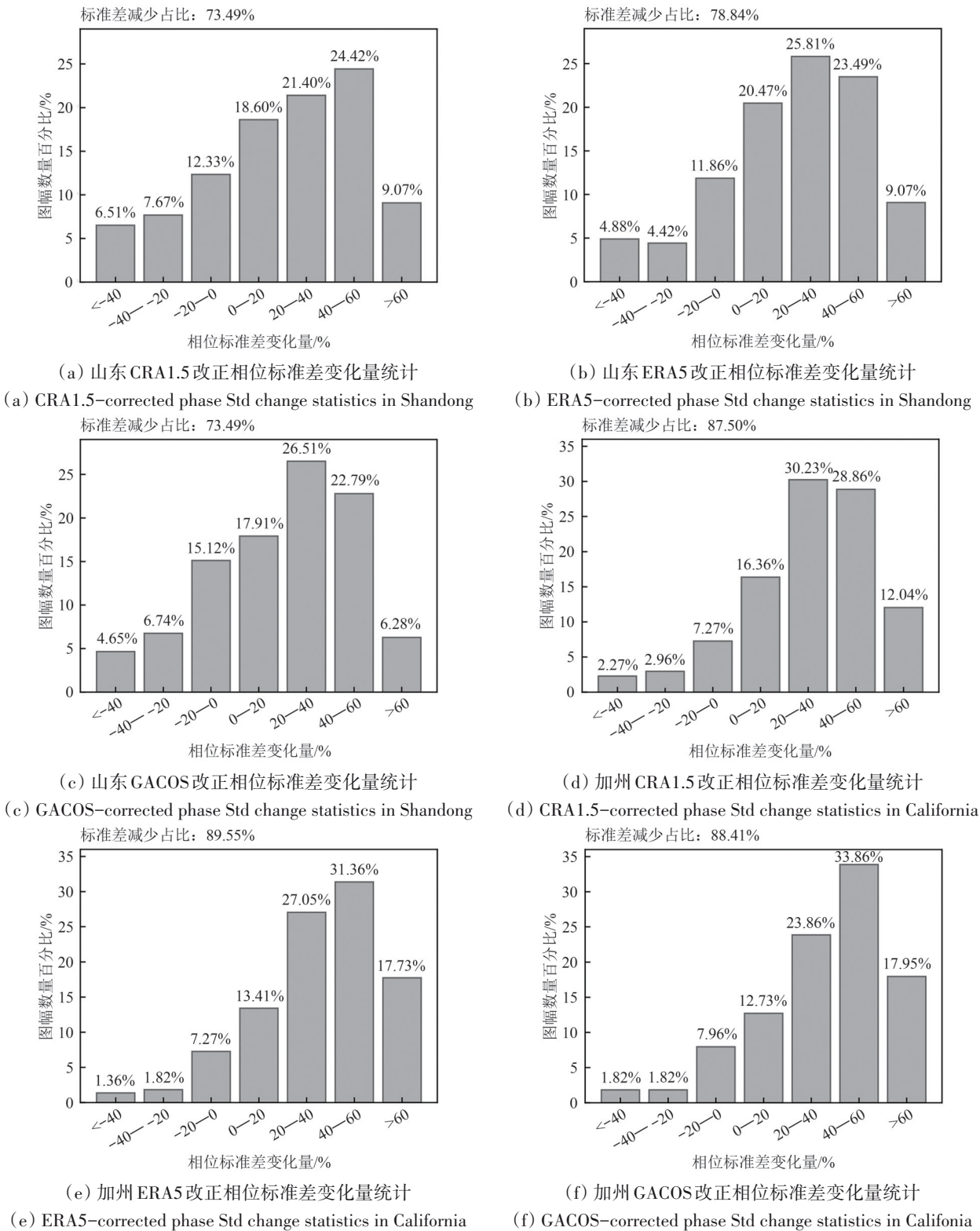


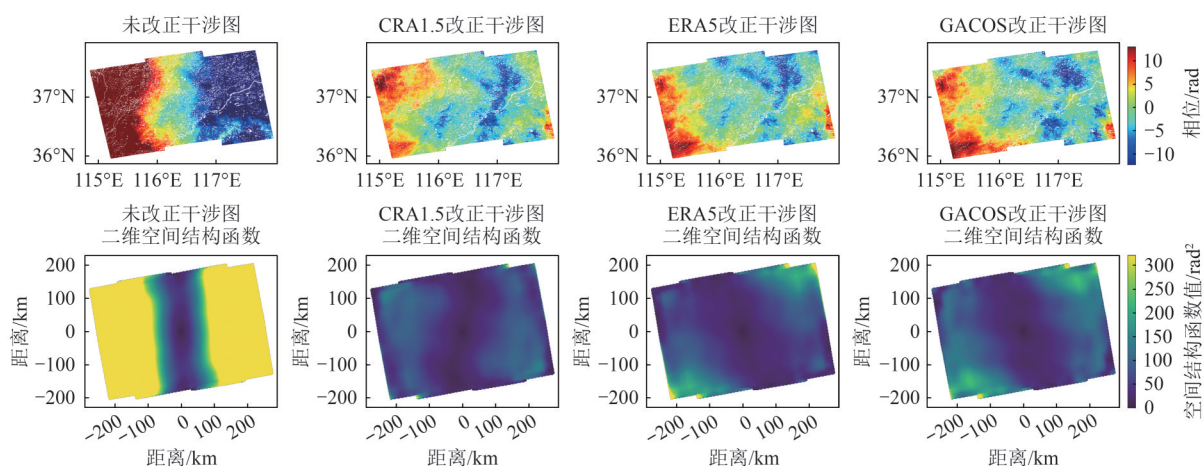
图4 相位标准差变化量统计
Fig. 4 Statistical results of phase standard deviation changes

4.2 长波大气信号改正评估

4.2.1 单幅干涉图评估

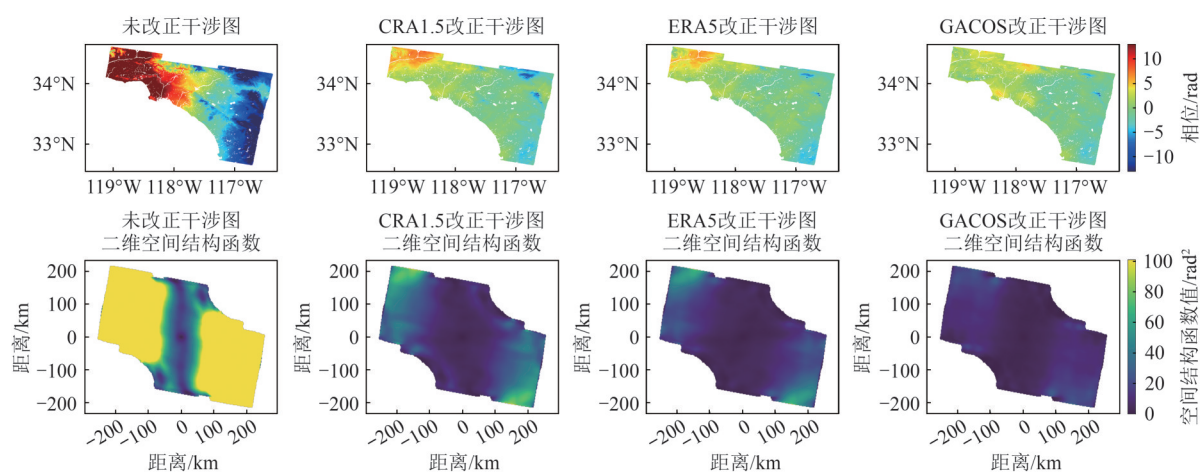
为展示利用空间结构函数评估长波大气信号的改正效果，本研究分别从山东和加州地区各选

取了一幅干涉图进行评估，分别为干涉图 2023-07-12—2023-08-29（山东）和干涉图 2022-11-21—2022-12-03（加州）。图 5 展示了这两幅干涉图在改正前后的二维空间结构函数，图 6 则对应其半变异函数结果。



(a) 山东干涉图 2023-07-12—2023-08-29 二维空间结构函数结果

(a) Two-dimensional SSF of Interferogram 2023-07-12—2023-08-29 in Shandong

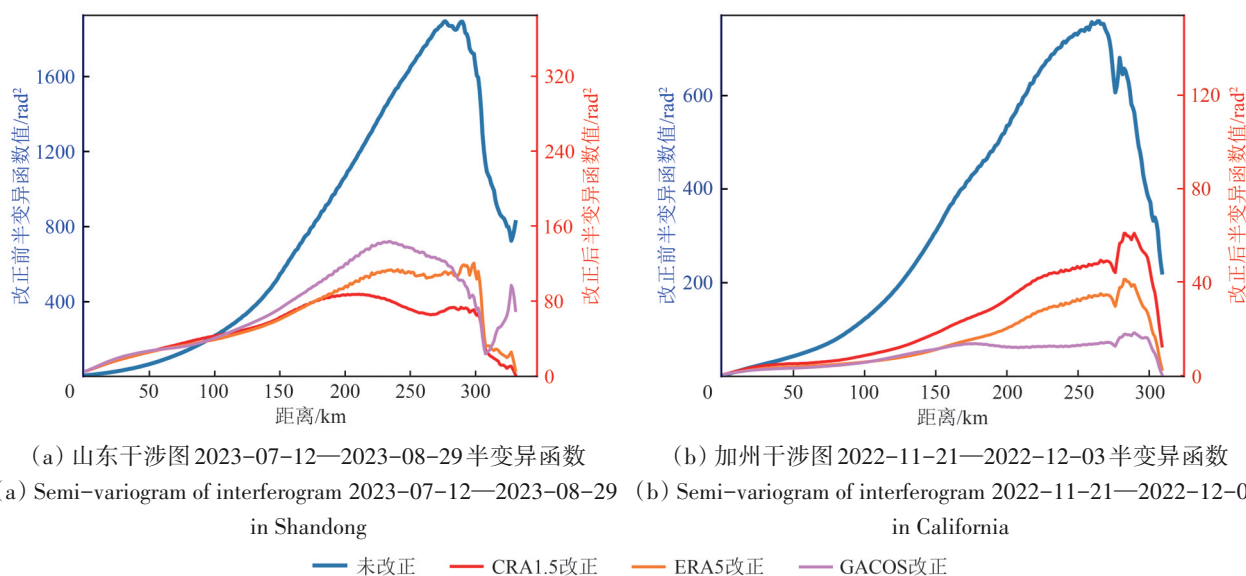


(b) 加州干涉图 2022-11-21—2022-12-03 二维空间结构函数结果

(b) Two-dimensional SSF of interferogram 2022-11-21—2022-12-03 in California

图5 干涉图二维空间结构函数结果

Fig. 5 2D SSFs of interferograms



(a) 山东干涉图 2023-07-12—2023-08-29 半变异函数

(b) 加州干涉图 2022-11-21—2022-12-03 半变异函数

(a) Semi-variogram of interferogram 2023-07-12—2023-08-29 in Shandong (b) Semi-variogram of interferogram 2022-11-21—2022-12-03 in California

— 未改正 — CRA1.5改正 — ERA5改正 — GACOS改正

图6 干涉图半变异函数结果

Fig. 6 Semi-variogram of interferograms

空间结构函数的二维分布能够有效揭示大气延迟信号的空间非均匀性及其在方向上的相关性特征。图 5 中可见，干涉图 2023-07-12—2023-08-29（山东）和干涉图 2022-11-21—2022-12-03（加州）的空间相关信号均主要沿东西方向分布。经 CRA1.5、ERA5 和 GACOS 改正后，两幅干涉图中原有的空间相关性显著减弱，表明东西方向上的长波大气信号得到了有效抑制。

图 6 展示了半变异函数随距离的变化情况。经大气改正后，两地区干涉图的半变异函数值均显著下降（需注意左右坐标轴的值域差异，改正后曲线对应右侧坐标轴）。具体而言，山东和加州地区干涉图的半变异函数峰值从改正前的 1896 rad^2 和 761 rad^2 ，分别下降至 87 rad^2 和 62 rad^2 （CRA1.5

改正）、 121 rad^2 和 42 rad^2 （ERA5 改正）、 144 rad^2 和 18 rad^2 （GACOS 改正）。改正后半变异函数曲线峰值急剧下降，说明干涉图中存在的长波信号主要源于大气延迟误差。

4.2.2 干涉图统计评估

为系统分析大气延迟误差空间结构的统计特征，将所有干涉图的空间结构函数结果进行叠加，以提取其平均空间特征，从而揭示干涉图中大气延迟误差的分布模式。图 7 展示了叠加后得到的二维空间结构函数结果，其整体呈“同心圆”状分布，未表现出显著的方向性，反映出不同时期大气延迟在空间方向上具有非一致性。经 CRA1.5、ERA5 与 GACOS 改正后，各方向上的长波信号均得到不同程度的削弱。

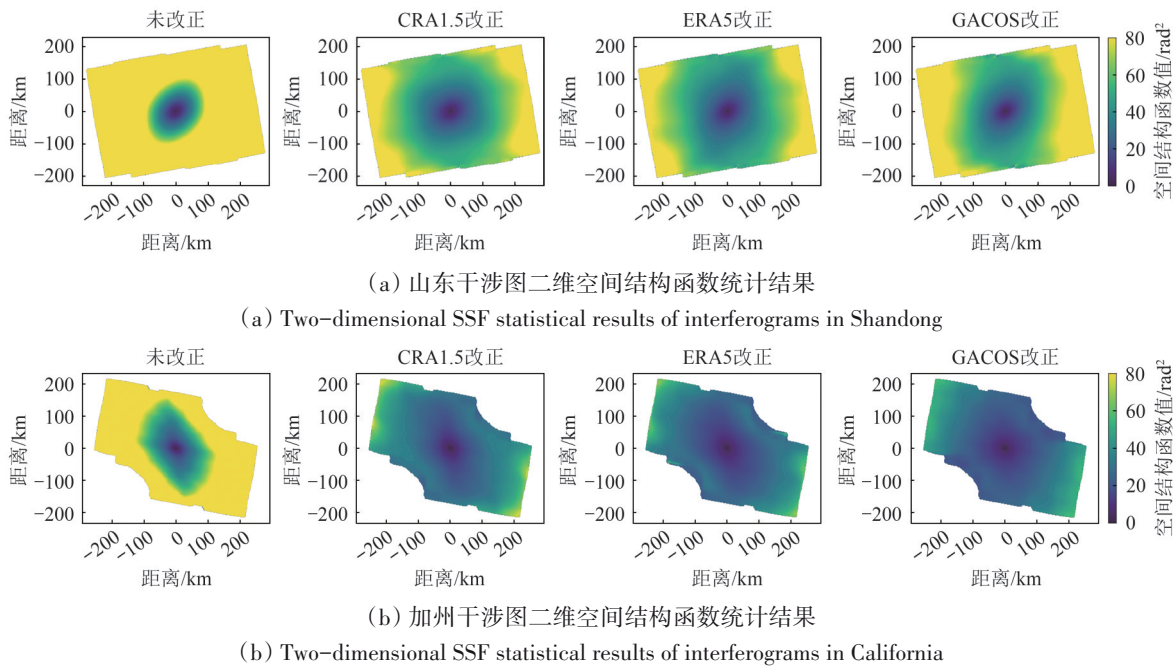


图 7 干涉图二维空间结构函数统计结果

Fig. 7 2D SSF statistical results of interferograms

图 8 展示了所有干涉图叠加后得到的平均半变异函数曲线。未改正的干涉图平均半变异函数值随着距离增加迅速上升，而经过改正后的曲线更为平缓，表明其空间相关性在不同距离上有所减弱。在地统计学（geostatistics）中，基台值表示半变异函数达到稳定时的最大值，反映数据的总体变异强度，其数值越大，表明数据变异性越显著；去相关距离则表示变量空间相关性消失的临界距离，在该距离范围内，数据点间存在较强的相关性，超出该范围后相关性显著降低，其数值大小

可用于衡量空间连续性的强弱。表 1 统计了山东和加州地区原始干涉图和经大气改正后干涉图的平均去相关距离和平均基台值。结果显示，经大气改正后，两地区的平均去相关距离和平均基台值均显著下降，在山东和加州地区，CRA1.5 对长波信号的改正效果与 ERA5 和 GACOS 基本相当。CRA1.5 改正后，山东地区的平均去相关距离与平均基台值分别由 296 km 和 322 rad^2 下降至 253 km 和 86 rad^2 ；加州地区由改正前的 241 km 和 149 rad^2 下降至 227 km 和 52 rad^2 。

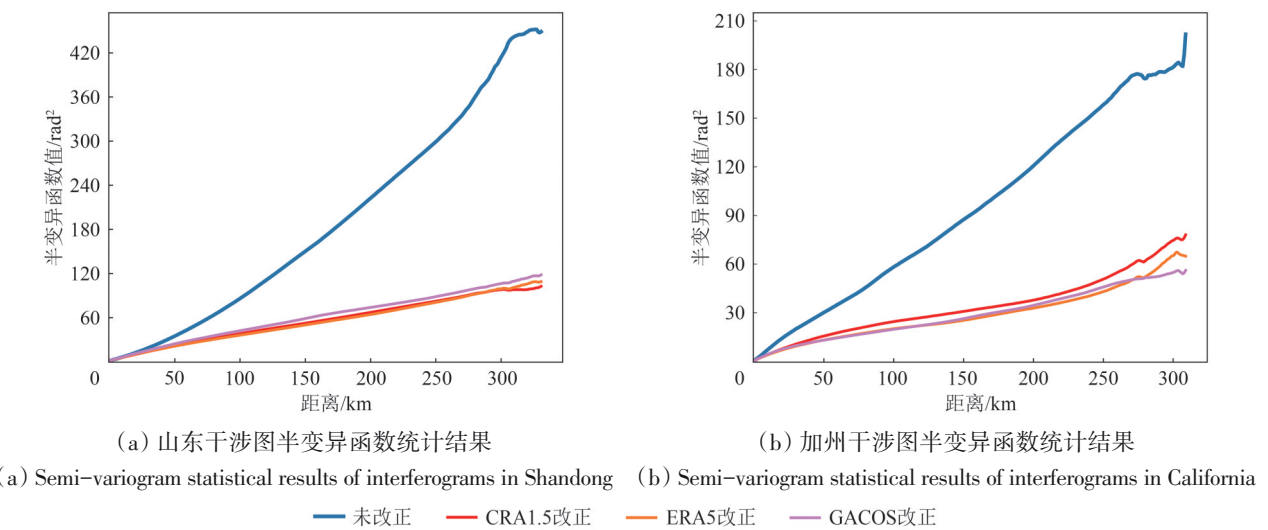


图8 干涉图半变异函数统计结果

Fig. 8 Semi-variogram statistical results of interferograms

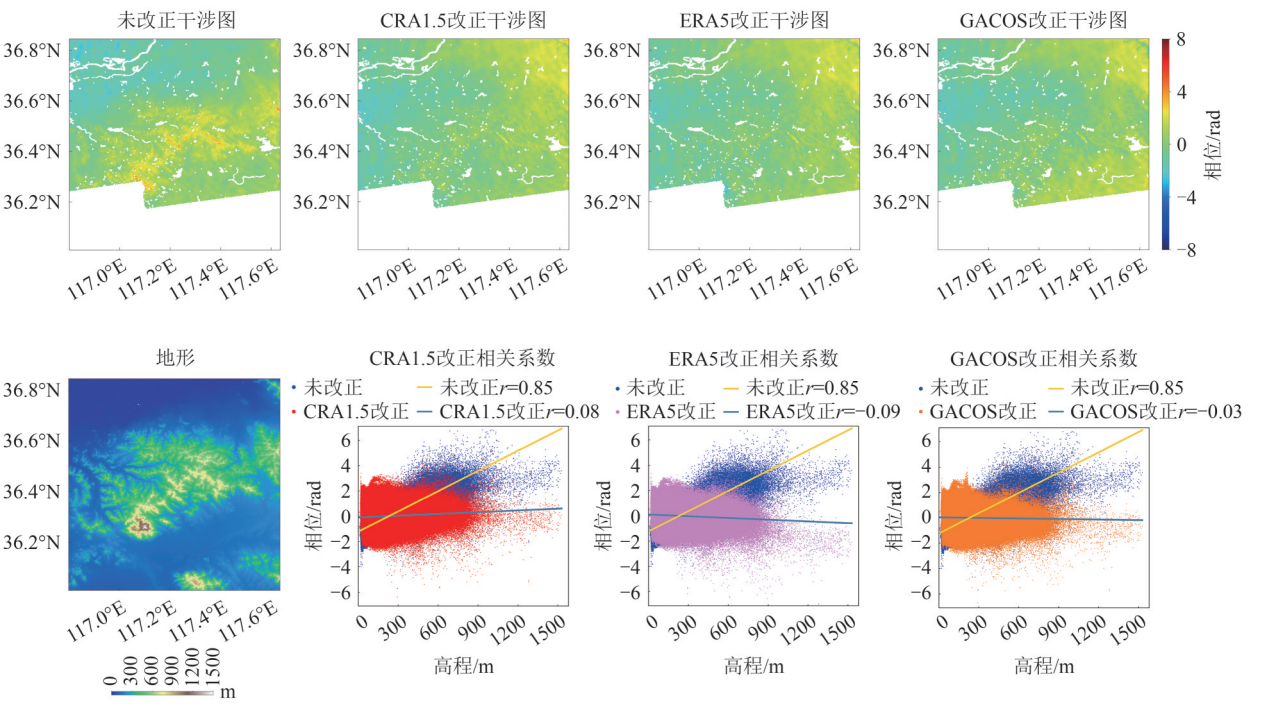
表1 平均去相关距离和基台值

Table 1 Average decorrelation range and sill value

区域	大气改正数据	平均去相关距离/km	平均基台值/rad ²
中国	未改正	296	323
	CRA1.5	253	86
	ERA5	258	85
	GACOS	244	94
美国	未改正	241	149
	CRA1.5	227	52
	ERA5	238	44
	GACOS	230	44

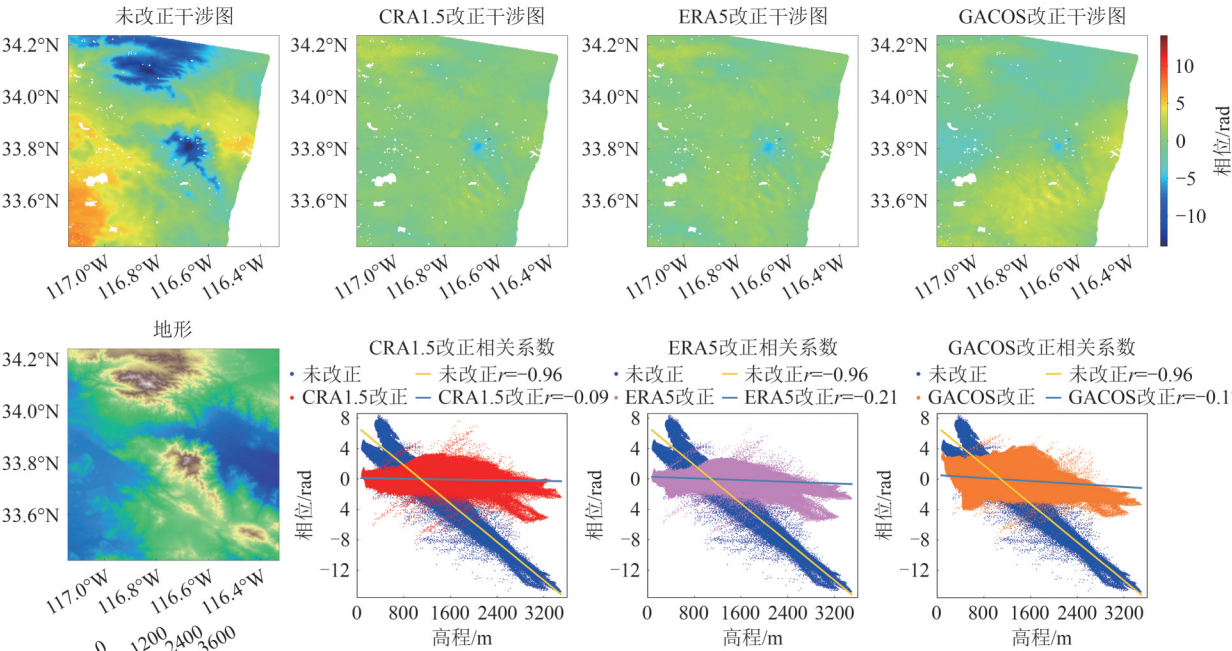
4.3 相位—高程相关系数改正评估

由于大气效应的垂直分层分量只影响地形起伏区域，本研究分别选取山东丘陵地区（最大高程 1528 m）和加州圣哈辛托山脉（San Jacinto Mountains，最大高程 3496 m）作为典型实验区，如图 1 中地形起伏区域所示。针对干涉图 2022-01-18—2022-02-23（山东）和干涉图 2021-11-14—2021-12-08（加州）中地形起伏区域，计算其相位—高程相关系数，结果如图 9 所示。



(a) 山东丘陵地区相位—高程相关系数结果

(a) Phase-elevation correlation coefficient for Shandong hilly areas



(b) 加州圣哈辛托山脉地区相位—高程相关系数结果

(b) Phase-elevation correlation coefficient for San Jacinto Mountains region of California

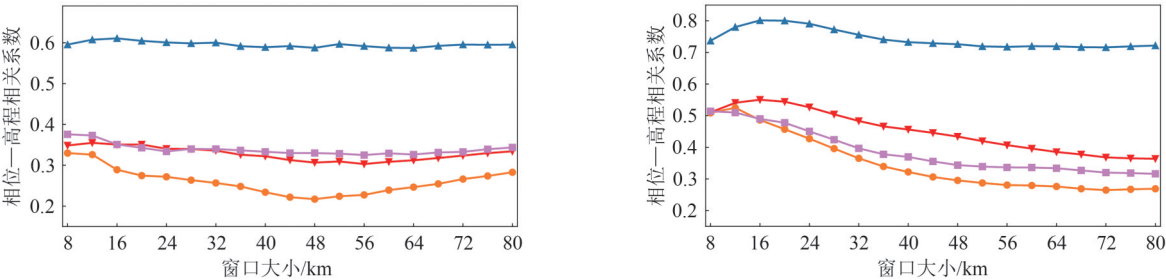
图9 干涉图相位—高程相关系数结果

Fig. 9 Phase-elevation correlation coefficient of interferograms

由图9可见，相位与高程的相关性在大气改正后显著降低，说明与地形相关的大气相位信号得到了有效抑制。具体而言，在山东丘陵地区，经CRA1.5、ERA5和GACOS改正后，相关系数从0.85分别降至0.08、-0.09和-0.03；加州圣哈辛托山脉地区，则从-0.96分别改善至-0.09、-0.21和-0.17。为评估CRA1.5、ERA5和GACOS在不同空间尺度上对垂直分层大气分量的改正效果，本研究在地形起伏区域内，从中心为起点，按4 km步长设置从8—80 km的多个空间窗口，分别计算各干涉图在不同窗口范围内的相位—高程相关系数。

筛选出原始相位—高程相关系数绝对值大于0.4的干涉图，表明这些干涉图中相位与高程存在显著相关性，得到如图10所示的原始及改正后干涉图中平均相位—高程相关系数绝对值结果。

由图10可见，在不同空间尺度上，经改正后地形相关的大气信号均得到不同程度的抑制。在山东和加州地区最大窗口（80 km）范围内，平均相位—高程相关系数分别从0.60和0.72，经CRA1.5、ERA5和GACOS改正后降低至0.33/0.34/0.28（山东）和0.36/0.31/0.27（加州）。



(a) 山东平均相位—高程相关系数

(b) 加州平均相位—高程相关系数

(a) Average phase-elevation correlation coefficients in Shandong (b) Average phase-elevation correlation coefficients in California

— 未改正 — CRA1.5改正 — ERA5改正 — GACOS改正

图10 平均相位—高程相关系数

Fig.10 Average phase-elevation correlation coefficients

5 结 论

本文以全球广泛应用的再分析数据ERA5和通用型卫星雷达大气改正系统GACOS为参照,从相位统计量、长波信号改正及相位—高程相关性3个维度,系统评估了新一代中国全球大气再分析产品CRA1.5在InSAR大气延迟改正中的有效性。首先,细化CRA1.5和ERA5产品的垂直层次,通过积分计算ZTD;其次,基于迭代对流层分解模型将离散ZTD点插值为高密度连续场,用于InSAR大气改正;最后,利用相位标准差、空间结构函数和相位—高程相关系数等多种指标,综合评估CRA1.5在InSAR大气改正中的效果。在山东和加州实验区的分析结果表明,CRA1.5能够有效改善InSAR大气延迟误差,主要研究结论如下:

(1) CRA1.5能够显著降低InSAR干涉图的相位标准差,并抑制其季节性波动。在两个研究区内,CRA1.5的改正效果与ERA5和GACOS相当,三者有效改正比例均超过70%,平均相位标准差降幅均达30%以上。

(2) 在长波信号抑制方面,CRA1.5可有效减弱InSAR干涉图中的长波信号影响,明显减弱空间趋势性及相同距离下的半变异函数值。其改正性能与ERA5和GACOS等国际主流产品相当。

(3) 相位—高程相关性分析结果表明,CRA1.5数据能够有效削弱地形起伏区域中由大气垂直分层效应引起的误差。在整体与多尺度统计分析中,CRA1.5均表现出与ERA5相近的改正能力;而GACOS凭借更精细的垂直分层结构,在高程相关大气改正方面更具优势。

志 谢 感谢中国气象局提供的CMA-RA V1.5再分析数据;欧洲中期天气预报中心提供的ERA5数据;英国纽卡斯尔大学和长安大学提供的GACOS数据;欧洲航天局提供的Sentinel-1卫星数据。

参考文献(References)

Bekaert D P S, Walters R J, Wright T J, Hooper A J and Parker D J. 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170: 40-47 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.035]

Cao C L, Li Z W, Liu L Q and Jiang M. 2025. Terrain-guided block

adjustment for InSAR DSM elevation calibration. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 12501-12510 [DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3567263]

Crosetto M, Tscherning C C, Crippa B and Castillo M. 2002. Subsidence monitoring using SAR interferometry: reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering. *Geophysical Research Letters*, 29(9): 1312 [DOI: 10.1029/2001gl013544]

Dai K R, Li Z H, Xu Q, Bürgmann R, Milledge D G, Tomás R, Fan X M, Zhao C Y, Liu X J, Peng J B, Zhang Q, Wang Z, Qu T T, He C Y, Li D R and Liu J N. 2020. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems: a novel and exciting framework. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1): 136-153 [DOI: 10.1109/mgrs.2019.2954395]

Dai K R, Shen Y, Wu M T, Feng W K, Dong X J, Zhuo G C and Yi X Y. 2022. Identification of potential landslides in Baihetan Dam area before the impoundment by combining InSAR and UAV survey. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 2069-2082 (戴可人, 沈月, 吴明堂, 冯文凯, 董秀军, 卓冠晨, 易小宇. 2022. 联合InSAR与无人机航测的白鹤滩库区蓄水前地灾隐患广域识别. *测绘学报*, 51(10): 2069-2082) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022.20220305]

Doin M P, Lasserre C, Peltzer G, Cavalié O and Doubre C. 2009. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1): 35-50 [DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.03.010]

Dong J, Guo S K, Wang N, Zhang L, Ge D Q, Liao M S and Gong J Y. 2023. Tri-decadal evolution of land subsidence in the Beijing Plain revealed by multi-epoch satellite InSAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 286: 113446 [DOI: 10.1016/j.rse. 2022.113446]

Dong J, Zhang L, Tang M G, Liao M S, Xu Q, Gong J Y and Ao M. 2018. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: a case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205: 180-198 [DOI: 10.1016/j.rse.2017. 11.022]

Dong Y T, Zhao J, Li C Y and Liao M S. 2022. Gapless-REMA100: a gapless 100-m reference elevation model of Antarctica with voids filled by multi-source DEMs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 186: 70-82 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022. 01.024]

Duan M, Li Z W, Xu B, Jiang W P, Cao Y M, Xiong Y and Wei J C. 2024. Turbulent atmospheric phase correction for SBAS-InSAR. *Journal of Geodesy*, 98(9): 81 [DOI: 10.1007/s00190-024-01892-9]

Elliott J R, Biggs J, Parsons B and Wright T J. 2008. InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters*, 35(12): L12309 [DOI: 10.1029/2008gl033659]

Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/tgrs.2011.2124465]

- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S and Thépaut J N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049 [DOI: 10.1002/qj.3803]
- Hooper A, Bekaert D, Spaans K and Arkan M. 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517: 1-13 [DOI: 10.1016/j.tecto.2011.10.013]
- Houlie N, Funning G J and Bürgmann R. 2016. Use of a GPS-derived troposphere model to improve InSAR deformation estimates in the San Gabriel Valley, California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(9): 5365-5374 [DOI: 10.1109/tgrs.2016.2561971]
- Jolivet R, Agram P S, Lin N Y, Simons M, Doin M P, Peltzer G and Li Z H. 2014. Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 2324-2341 [DOI: 10.1002/2013jb010588]
- Li S H, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Time-series InSAR tropospheric atmospheric delay correction based on common scene stacking. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2406-2417 (李思慧, 董杰, 张路, 廖明生. 2023. 时序 InSAR 对流层大气延迟改正的相位堆叠方法. *遥感学报*, 27(10): 2406-2417) [DOI: 10.11834/jrs.20221736]
- Li Z H, Fielding E J, Cross P and Muller J P. 2006. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: medium resolution imaging spectrometer and advanced synthetic aperture radar integration. *Geophysical Research Letters*, 33(6): L06816 [DOI: 10.1029/2005gl025299]
- Li Z W, Xu W B, Feng G C, Hu J, Wang C C, Ding X L and Zhu J J. 2012. Correcting atmospheric effects on InSAR with MERIS water vapour data and elevation-dependent interpolation model. *Geophysical Journal International*, 189(2): 898-910 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05432.x]
- Liang H Y, Zhang L, Lu Z and Li X. 2023. Correction of spatially varying stratified atmospheric delays in multitemporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113382 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113382]
- Liu S W, Zhang C L, Guo X F, Chu Y L, Ge D Q and Fan J H. 2007. Theoretical study for application of MODIS atmospheric water vapor retrieval to InSAR atmospheric correction. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 11(3): 367-372 (刘圣伟, 张朝林, 郭小方, 楚艳丽, 葛大庆, 范景辉. 2007. MODIS 水汽反演用于 InSAR 大气校正的理论研究. *遥感学报*, 11(3): 367-372) [DOI: 10.11834/jrs.20070350]
- Liu Z Q, Jiang L P, Shi C X, Zhang T, Zhou Z J, Liao J, Yao S, Liu J W, Wang M Y, Wang H Y, Liang X, Zhang Z S, Yao Y, Zhu T, Chen Z, Xu W H, Cao L J, Jiang H and Hu K X. 2023. CRA-40/atmosphere-the first-generation Chinese atmospheric reanalysis (1979-2018): system description and performance evaluation. *Journal of Meteorological Research*, 37(1): 1-19 [DOI: 10.1007/s13351-023-2086-x]
- Onn F and Zebker H A. 2006. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9): B09102 [DOI: 10.1029/2005jb004012]
- Shirzaei M and Bürgmann R. 2012. Topography correlated atmospheric delay correction in radar interferometry using wavelet transforms. *Geophysical Research Letters*, 39(1): L01305 [DOI: 10.1029/2011gl049971]
- Wang X W, Liu G X, Yu B, Dai K R, Zhang R, Chen Q and Li Z L. 2014. 3D coseismic deformations and source parameters of the 2010 Yushu earthquake (China) inferred from DInSAR and multiple-aperture InSAR measurements. *Remote Sensing of Environment*, 152: 174-189 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.014]
- Xiao R Y, Wang X, Sun J Y, Li T, Tian X and He X F. 2025. Comparisons of differential interferometry of Chinese SAR satellites in ground deformation monitoring. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(8): 1517-1526 (肖儒雅, 王迅, 孙静怡, 李涛, 田馨, 何秀凤. 2025. 国产 SAR 卫星差分干涉测量地表形变监测比较. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(8): 1517-1526) [DOI: 10.13203/j.whugis.20240468]
- Xiao R Y, Yu C, Li Z H and He X F. 2021. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction: applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102289 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102289]
- Xiao R Y, Yu C, Li Z H, Jiang M and He X F. 2022. InSAR stacking with atmospheric correction for rapid geohazard detection: applications to ground subsidence and landslides in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115: 103082 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.103082]
- Xu W B, Xie L, Bürgmann R, Liu X G and Wang J G. 2023. The 2022 eruption of Wolf volcano, Galápagos: the role of caldera ring-faults during magma transfer from InSAR deformation data. *Geophysical Research Letters*, 50(14): e2023GL103704 [DOI: 10.1029/2023gl103704]
- Yu C, Li Z H and Penna N T. 2018a. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204: 109-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018b. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017jb015305]
- Yu C, Penna N T and Li Z H. 2017. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3): 2008-2025 [DOI: 10.1002/jgrd.12203]

- 10.1002/2016jd025753]
- Yuan Y W, Li Z W and Mu M Z. 2025. Application of China's first generation global atmospheric reanalysis data in InSAR atmospheric correction: a case study of southern California. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(5): 959-972 (袁煜伟, 李志伟, 母岷政. 2025. 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. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(5): 959-972) [DOI: 10.13203/j.whugis20230154]
- Zeng Q M, Zhang X J and Jiao J. 2016. Atmospheric correction of spaceborne repeat-pass InSAR DEM generation based on WRF. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1151-1160 (曾琪明, 章晓洁, 焦健. 2016. InSAR生成DEM中WRF大气校正. *遥感学报*, 20(5): 1151-1160) [DOI: 10.11834/jrs.20166174]
- Zhang T, Zhou Z J, Liu Z Q, Shi C X, Yao S, Jiang L P, Yao Y, Zhang Z S, Liang X, Zhang Z Q, Gu J X, Liao J, Cao L J, Jiang H, Wang H Y, Zhang D B, Chen Z, Yuan F, Li Q L, Xu W H, Chen L F, Zhu Y N, Zhu C, Deng S, Zhou Y K and Sun S. 2025. The CMA global atmospheric reanalysis version 1.5 (CRA1.5). *Journal of Meteorological Research*, 39(6): 1379-1398 [DOI: 10.1007/s13351-025-5112-3]
- Zhou Y Z, Lou Y D, Zhang W X, Liang H, Shi C, Wu D and Cao Y C. 2023. On the calculation and comparative analysis of tropospheric delay from CRA40 product. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(1): 22-31 (周要宗, 楼益栋, 张卫星, 梁宏, 施闯, 吴迪, 曹云昌. 2023. 基于CRA40产品的对流层延迟计算及对比分析. *测绘学报*, 52(1): 22-31) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2023. 20210370]
- Zhu J J, Hu J, Li Z W, Sun Q and Zheng W J. 2022. Recent progress in landslide monitoring with InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 2001-2019 (朱建军, 胡俊, 李志伟, 孙倩, 郑万基. 2022. InSAR滑坡监测研究进展. *测绘学报*, 51(10): 2001-2019) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022. 20220294]

New generation of China Meteorological Administration's Global Atmospheric Reanalysis Products (CMA-RA V1.5) for InSAR atmospheric correction: Evaluation and application

XIAO Ruya, LI Rui, LU Zhaowei, WANG Xun, HE Xiufeng

School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: Atmospheric effect is one of the major sources of errors in Synthetic Aperture Radar interferometry (InSAR), and high-precision correction is essential for improving the reliability of InSAR applications. Atmospheric correction using external data, such as imaging spectrometer measurements or meteorological reanalysis products, is the most widely used technical means at present. Based on China's first-generation global atmosphere and land reanalysis product (CRA), the latest generation of China Meteorological Association Global Atmospheric Reanalysis (CMA-RA V1.5, abbreviated as CRA1.5) provides hourly updated, global 3D atmospheric parameters with a horizontal resolution of 10 km covering the period from 1979 to the present. In this study, the CRA1.5 product is applied to InSAR atmospheric correction for the first time, and its performance is systematically evaluated. First, high-resolution vertical interpolation of geopotential height, temperature, and specific humidity parameters from reanalysis data is implemented by the hierarchical integration method, enabling the accurate estimation of Zenith Tropospheric Delay (ZTD). Second, the discrete ZTD values are interpolated into a high-spatial-continuum delay field by using an iterative tropospheric decomposition model, which is then employed to correct atmospheric signals in the interferometric phase. A total of 870 interferograms from Sentinel-1 satellite data acquired between 2021 and 2023 are constructed over two study areas, namely, Shandong in China and California in the USA. The performance of CRA1.5 is evaluated through a comprehensive set of metrics, including phase statistics, spatial structure, and terrain correlation. CRA1.5 is then compared with the widely used ERA5 and Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS). Results show that CRA1.5 substantially reduces the phase standard deviation of interferograms (with the average reduction exceeding 30% in both regions), effectively suppresses long-wavelength atmospheric signals and elevation-related errors, and delivers an overall performance that is comparable to that of ERA5 and GACOS. CRA1.5 demonstrates excellent spatiotemporal consistency and reliability in mitigating InSAR atmospheric delay errors. It provides critical data support for the development of independent, high-precision atmospheric correction technologies in China and underscores the value of domestic reanalysis data for quantitative application of remote sensing.

Key words: InSAR, zenith total delay, atmospheric correction, CRA1.5, statistical evaluation, standard deviation, spatial structure function

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42574067, 42174018)