

基于全球大气模型的日本关东平原 InSAR 对流层延迟改正研究

焦广棋^{1,2,3}, 孙 玉^{1,2,3}, 杨 琰^{1,2,3}

(1. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350108;

2. 地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108;

3. 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要:对流层延迟影响了 InSAR 技术监测地壳形变的精度。近年来,全球大气模型(GAM)以及通用大气改正在线服务(GACOS)成为有效改正对流层延迟的重要数据集。本研究以日本关东平原为例,采用 MERRA2 和 ERA5 这 2 种 GAM 以及 GACOS 改正时序 InSAR 干涉图的对流层延迟,通过考虑距离变化的相位标准差和半变异函数 2 种度量方法评估其改正效果。研究结果表明,2 种方法评估结果一致,3 种数据集所计算的对流层延迟差异较大且对于不同干涉图改正效果不同。对于整体时序 InSAR 干涉图来说,在 0~30 km 的空间尺度上,3 种数据集在研究区域内改正效果均不明显,而在 30~100 km 的空间尺度上,ERA5 和 GACOS 具有较好的改正效果,但 MERRA2 表现较差。经 ERA5 改正后时序 InSAR 干涉图相位标准差的均值削减量可达 17.5%,略高于 GACOS 的 13.3%,可为国内外沿海平原地区开展 InSAR 技术监测地壳形变提供支持。

关键词:InSAR; 对流层延迟改正; 全球大气模型(GAM); 通用大气改正在线服务(GACOS); 日本关东平原

中图分类号:P237

文献标志码:A

InSAR tropospheric delay correction based on global atmospheric models over the Kanto Plain in Japan

JIAO Guangqi^{1,2,3}, SUN Yu^{1,2,3}, YANG Yan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education,

Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. National-local Joint Engineering Research Center of Geospatial Information Technology,

Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology,

Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Tropospheric delay significantly impacts the reliability and accuracy of InSAR in monitoring crustal deformation. In recent years, global atmosphere models (GAM) and GACOS have become important datasets for effective tropospheric delay correction. Taking the Kanto Plain as an example, this study calculated the time-series InSAR tropospheric delay by using the GAMs of MERRA and ERA5 as well as GACOS. Their performances at different spatial scales were evaluated by using the semi-variance and phase standard deviation as a function of distance. The two statistical metrics show consistent results regarding the performance of the evaluated datasets.

收稿日期:2021-10-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41801393)

作者简介:焦广棋(1996—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事 InSAR 监测地壳形变的研究.E-mail:jiaoguangqi156@163.com

孙 玉(1986—),男,山东德州人,副研究员,博士,主要从事 InSAR 监测地壳形变的研究,本文通信作者。

E-mail:jade.yusun@outlook.com

The three datasets give different corrections and their effectiveness are different for different interferograms. For all time-series interferograms, no significant improvement was observed at spatial scale smaller than 30 km. At spatial scales from 30 to 100 km, while both ERA5 and GACOS can reduce the tropospheric effects at comparable level, MERRA2 seems to degrade the results for unknown reasons. The mean reduction of phase standard deviation can reach 17.5% after the ERA5 correction, which is higher than 13.3% of GACOS correction. The proposed method can provide support for the applications of InSAR to monitoring the crustal deformation in coastal plain areas.

Key words: InSAR; tropospheric delay correction; global atmospheric models(GAM); generic atmospheric correction online service(GACOS); the Kanto Plain in Japan

星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)信号穿透大气层时受到压强、温度和总电子含量等影响,其传播速率及路径发生改变而导致雷达信号相位延迟,称为大气延迟效应^[1]。大气延迟包含电离层延迟和对流层延迟:电离层延迟由自由电子密度分布不均引起,可显著影响极地、高纬地区和长波段(L波)信号,但对C波段信号影响较小;对流层中的温度、湿度和水汽等变化引起对流层延迟,该延迟可影响任何波段和地区,水汽含量丰富的地区影响更大^[2]。本研究仅讨论对流层延迟对C波段信号的影响,对电离层延迟未做修正。因此,所使用的 Sentinel 1A 影像干涉原始相位中包含不同程度的对流层延迟,严重干扰了形变监测及其机制的正确解译,是合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric SAR, InSAR)数据处理中主要的误差源之一^[3]。因此,估计并改正对流层延迟对基于 InSAR 技术的高精度形变监测至关重要。

对流层延迟可分为由地形起伏引起的垂直分层延迟和具有随机性的大气对流过程引起的湍流混合延迟。目前,国内外学者已针对对流层延迟改正开展了诸多研究,主要分为3类:①时空滤波法。整个大气延迟被假设为具有时空相关的随机分布性质,时空滤波可以有效抑制湍流混合延迟,但选择合适的滤波器和滤波窗口大小成为难点。时空滤波常被用于时序 InSAR 技术处理流程中去除对流层延迟,比如永久散射体方法(persistent scatterer InSAR, PSInSAR)、短基线子集方法(small baseline subset, SBAS)^[4]。②函数模型。以干涉相位与地形高程之间的关联性建立函数模型,包括线性模型和幂律模型,能够有效去除垂直分层延迟^[5]。③外部辅助数据集。利用外部数据集提供气象参数计算改正对流层延迟,但光学遥感数据受限于云、雨天气及夜间环境;全球导航定位卫星系统(global navigation satellites system, GNSS)数据受 GNSS 站点密度的影响导致改正效果不佳;全球大气模型(global atmospheric models, GAM)是近年来发展的改正对流层延迟的主要数据源,以全球覆盖、数据免费、适用性强等优势在单幅、时序干涉图对流层延迟改正中应用广泛,包括现代卫星应用生产再分析资料(Modern-Era retrospective analysis for research and applications, v2, MERRA2)、欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)发布的再分析资料(ECMWF reanalysis interim/v5, ERA-Interim/5)^[6]。InSAR 通用性大气改正在线服务(generic atmospheric correction online service, GACOS)融合了 ECMWF 数据集和连续全球定位系统(global positioning system, GPS)对流层延迟估计数据,采用迭代对流层分解模型处理后向用户免费提供全球性的对流层延迟数据^[7]。

针对 GAM 以及 GACOS 改正时序 InSAR 干涉图对流层延迟的可靠性,李鹏等^[1]采用线性模型、GACOS 及 ERA-Interim 改正覆盖阿尔金断裂带地区 Sentinel 1A 和 ASAR 影像生成干涉图中的对流层延迟,结果表明两类 SAR 影像生成的干涉图经 GACOS 改正后的相位标准差削减量分别可达 28.8% 和 14.8%,当去除轨道平面后可达 54.5% 和 68.1%。Wang 等^[3]以青藏高原地区的宽幅 Sentinel 1A 影像为例,对比评估 ERA-Interim、ERA5、GACOS 及 MERRA2 对流层延迟改正的效果,结果表明 ERA5 与 GACOS 具有相近的改正效果,验证了 2018 年新发布时间分辨率最高的 ERA5 应用于青藏高原 InSAR 对流层延迟改正的巨大潜力。ERA5 改正对流层延迟的效果在内陆地区已被证明,但在沿海地势平坦地区相比其他 GAM 的表现尚需进行对比研究。日本关东平原位于沿海地势平坦、地质构造复杂地区,2011 年 Mw9.0 地震引起地表渗透率改变导致关东平原内出现地表隆升现象,更需进一步开展该地区的地壳形变监测研究^[8]。

不同对流层延迟改正数据集的改正效果具有差异性,需要可靠的统计指标去衡量改正效果最优的数据集。目前,最常用的统计指标相位标准差能快速识别最佳对流层延迟改正数据集,但未能从空间尺度的角度

去衡量。半变异函数和顾及距离变化的相位标准差不仅可表达对流层延迟改正量的空间关系,还可从空间尺度上评估对流层延迟改正模型的效果^[9]。本研究利用覆盖日本关东平原中部 2016 年 12 月—2020 年 8 月的 57 景 Sentinel 1A 影像获取时序干涉原始相位,采用 2 种统计指标(顾及距离变化的相位标准差和半变异函数)定性与定量评估 2 种 GAM(ERA5 与 MERRA2)和 GACOS 对流层延迟改正的效果。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域概况

日本关东平原西、北部接山地和丘陵,中部包含台地和洼地,东部和南部临太平洋和东京湾,面积约为 1.6 万 km²,大部分海拔位于 100 m 以下。该地区属于亚热带季风气候,受海洋作用影响,具有明显的海洋性气候特征,气温年较差较小;沿岸的日本暖流导致年降水偏多,降雨量达 1 500 mm 以上;夏、秋季多台风,对流层中水汽含量丰富^[10]。世界上类似关东平原地形、纬度的地区如中国的华北平原。如图 1 所示,研究区位于 35.03°N~36.67°N,139.09°E~140.40°E(红色矩形所示),面积约 13 300 km²。该区域内中部地形相对开阔,林地分布较少,人口密度大,拥有世界上经济高度发达的东京都市圈。Morishita 使用 2015—2020 年 Sentinel 1A 影像监测东京周围地表隆升达 5 mm/a,在 Tochigi 地区出现季节性的沉降^[11]。为了利用 InSAR 技术更加精细地反映关东平原地表形变的时空演化规律,需要最大限度减弱或去除对流层延迟对形变结果的干扰。

1.2 数据简介

“哨兵一号”(Sentinel 1A/B)卫星向公众免费提供高质量的 SAR 影像,宽幅模式的地面覆盖范围约 250 km×160 km,分辨率为 5 m×20 m(距离向×方位向)^[12]。本研究获取 2016 年 12 月 8 日—2020 年 8 月 25 日覆盖研究区的 Sentinel 1A 影像,具体参数信息见表 1。欧空局提供与影像日期对应的精密定轨星历数据;美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration,NASA)提供 30 m 分辨率数字高程模型(shuttle radar topography mission)^[13]。

本研究采用的 3 种对流层延迟改正数据集包括:①ERA5 是 ECMWF 于 2018 年发布的时间分辨率最高的模型,采用了含有卫星数据改正、湿度分析等方法的四维同化技术(4D-VAR)处理后提供的全球气象再分析资料,时间分辨率 1 h,空间分辨率 0.25°×0.25°,压力层 37 层^[14];②GACOS 是采用迭代对流层分解模型,融合全球连续性 GPS 的对流层延迟估计数据、地形高程数据与高分辨率的 ECMWF 产品,提供 1979 年至今的全球对流层延迟产品,时间分辨率 6 h,空间分辨率 0.125°×0.125°,压力层 137 层,是目前最高的模型^[7];③MERRA2 是 NASA 利用大气数据同化系统对卫星、地面观测站、无线电探空及舰船的观测数据进行质量控制、增量分析及同化,提供 1980 年至今的全球气象再分析资料,时间分辨率 6 h,空间分辨率 0.5°×0.625°,压力层 42 层^[15]。

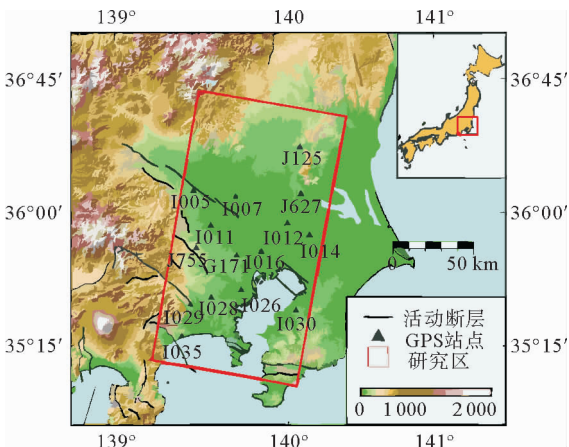


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

表 1 Sentinel 1A 影像参数信息

Tab. 1 Acquisition parameter information of Sentinel 1A images

参数名称	值	参数名称	值
影像数量	57 景	影像采集时刻	20:43
影像采集间隔	24 天	卫星飞行类型	降轨
极化方式	VV	空间基线	-125~100 m

2 研究方法

2.1 GAM 对流层延迟改正原理

GAM 在全球尺度上以均匀分布的网格点形式提供相同时间间隔(1 h 或 6 h)的气象参数,利用 Sentinel 1A 卫星在研究区的成像时间提取 GAM 提供的温度、气压和位势高等气象要素计算对流层延迟。利用大气折射率 N 来表示对流层延迟,由于云层中水滴引起的液态水延迟对 C 波段的影响小于 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm/km}$,可忽略不计。 N 由静力延迟和湿延迟组成,可用式(1)表示^[16],利用式(2)对 N 积分计算得到对流层延迟^[7]:

$$N = N_{\text{hydro}} + N_{\text{wet}} = k_1 \frac{P}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

$$L = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{10^{-6}}{\cos\theta} \int_z^{z_{\text{ref}}} (N_{\text{hydro}} + N_{\text{wet}}) dz. \quad (2)$$

式中: N_{hydro} 和 N_{wet} 指静力延迟、湿延迟; P 指大气压, hPa; T 指温度, K; e 指水汽分压, hPa; k_1 、 k_2 、 k_3 系数值分别是 0.776 、 0.716 和 $3.75 \times 10^3 \text{ K}^2 \text{ Pa}^{-1}$; θ 指雷达信号入射角, °; λ 指雷达波长, m; z 指地面高程, m; z_{ref} 指参考高度值 15 km, 认为超过 15 km 以上的高度, 大气折射率不随高程改变。

根据影像获取时间 t , 提取 GAM 中网格点上的气象参数, 利用相对湿度计算水汽分压, 再用式(3)~(5)计算 GAM 网格点上的天顶绝对对流层延迟^[16]:

$$\delta L_{\text{LOS}}^{\text{total}}(z, t) = \delta L_{\text{LOS}}^{\text{hydro}}(z, t) + \delta L_{\text{LOS}}^{\text{wet}}(z, t), \quad (3)$$

$$\delta L_{\text{LOS}}^{\text{hydro}}(z, t) = \frac{10^{-6}}{\cos\theta} \frac{k_1 R_d}{g_m} [P(z, t) - P(z_{\text{ref}}, t)], \quad (4)$$

$$\delta L_{\text{LOS}}^{\text{wet}}(z, t) = \frac{10^{-6}}{\cos\theta} \int_z^{z_{\text{ref}}} \left[\left(k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) \frac{e(z, t)}{T(z, t)} - k_3 \frac{e(z, t)}{T(z, t)^2} \right] dz. \quad (5)$$

式中: $P = P_d + e$, 为总气压; R_d 和 R_v 分别为静力延迟气体和湿延迟气体常数, 287.05 、 $461.495 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; g_m 为重力加速度。

由于 GAM 的分辨率较低, 在垂直向上采用三次样条插值及水平向上采用双线性插值得到每景 SAR 影像中像素点的天顶对流层延迟。由于 SAR 卫星系统侧视成像, InSAR 技术只能监测视线向的形变信息, 因此需要利用每个像素的入射角信息将天顶方向的对流层延迟投影到视线向, 以主、辅影像中对应像素的对流层延迟相减得到干涉图的对流层延迟, 并将对流层延迟改正数从原始干涉图中扣除来完成对流层延迟改正。Sentinel 1A 卫星为 C 波段卫星, 波长为 5.6 cm , 利用相位和距离之间的转换关系, 采用式(6)将对流层延迟转换成对流层延迟相位:

$$\varphi = \frac{-4\pi}{\lambda} d. \quad (6)$$

式中, φ 为对流层延迟相位, d 为对流层延迟距离。

2.2 统计指标

采用不同的数据集改正对流层延迟可能会引入数据集本身的误差, 严重影响形变解译的可靠性和精度, 合适的评估指标对于识别最佳改正数据集尤为重要。统计指标相位标准差基于全局或局部范围内的干涉原始相位中无较大形变信号的准则来评估对流层延迟改正前后的效果^[1]。因此, 筛选未进行对流层延迟改正而解算的地表形变速率 $\pm 0.5 \text{ mm/a}$ 之内的数据点为评估数据集。本研究采用以下 2 种评价指标衡量对流层延迟改正前后的效果:

1) 考虑距离变化的相位标准差(standard deviation, STD)。随机选择 100 个半径从 $1 \sim 100 \text{ km}$ 的窗口, 计算每个相同大小的窗口内未进行对流层延迟改正和每种数据集进行对流层延迟改正后所有数据点的相位标准差, 如式(7)所示。随着窗口距离增大会包含更多的数据点, 然后计算 100 个大小相同窗口的相位标准差的平均值, 作为识别时序 InSAR 对流层延迟改正最佳数据集的指标:

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^2}, \mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i. \quad (7)$$

式中,干涉图数量 M ,干涉原始相位、3 种数据集改正对流层延迟后的相位均表示为 x_i 。

2) 半变异函数。该指标表示设定固定的间隔滞后距离 h , 计算变量在 x 和 $x+h$ 处的样本方差值。距离相近的数据点的性质较为相似, 半方差值随空间距离的增大而增大, 如式(8)所示^[9]。为提高计算效率, 对前期筛选的数据点进行降采样(1:100), 设置滞后距离 h 为 1 km, 从 0~100 km, 计算数据点对的半方差值:

$$S(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[(Z(x) - Z(x+h))^2] \quad (8)$$

式中,干涉原始相位、3 种数据集改正对流层延迟后相位在点 x 处的值为 $Z(x)$, h 为滞后距离, $\text{Var}[\cdot]$ 为计算采样点方差函数。

2.3 数据处理流程

本研究时序 InSAR 干涉图的对流层延迟估计与改正的具体技术路线见图 2。①基于 SNAP 软件进行时序差分干涉:选择时间 2018 年 8 月 12 日的影像为主影像,其余 56 景辅影像分别与主影像进行配准,将配准后的影像进行差分干涉处理得到时序差分干涉图;②识别永久散射体点(persistent scatters, PS):采用 StaMPS 软件根据振幅离差指数(0.4)和相干点的相位空间选择长时间内保持稳定雷达散射特性的 PS 点^[17],得到时序 PS 点集;③估计与改正对流层延迟:以 TRAIN 平台计算 GACOS、MERRA2 和 ERA5 估计的对流层延迟^[18];④评估最优的对流层延迟改正数据集:采用顾及距离变化的相位标准差和半数据集。

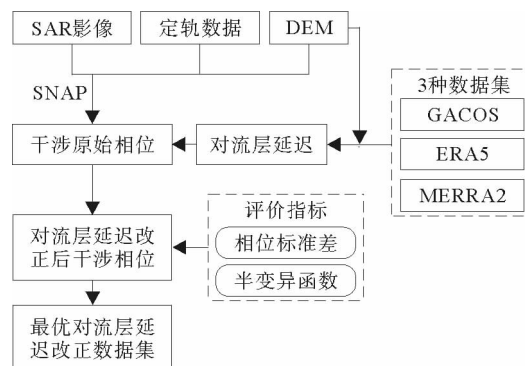


图 2 评估 3 种数据集改正对流层延迟技术路线图

Fig. 2 Flowchart of estimating and evaluating InSAR tropospheric correction based on three datasets

3 结果与讨论

3.1 对流层延迟改正结果

对预处理得到的 56 幅时序 InSAR 干涉图进行对流层延迟改正,采用 3 种数据集改正后给出不同的改正表现,选择 2 期单幅干涉图进行说明。单幅 2018 年 7 月 19 日—2018 年 8 月 12 日干涉图时间基线 24 d,空间基线 -49.4 m,图 3(a)给出了 3 种数据集估计的对流层延迟差分相位与干涉图改正前后的结果对比,对流层延迟差分相位呈明显的空间变化特征,从相模湾、东京湾沿岸向内陆地区(从东南向西北)递增。GACOS 模型估计的对流层延迟相位在空间上表现出更平滑且有利于捕捉小尺度变化,但 GACOS 改正后的结果显示对流层延迟相位仍残留在西北山区地带。图 4(a)、4(c)显示在 25~100 km 的空间尺度上,3 种数据集均有明显的对流层延迟改善效果。如表 2 所示,计算了整幅干涉图 GACOS、ERA5 及 MERRA2 改正后的相位标准差分别减少了 33.5%、27.9% 及 25.8%。

单幅 2018 年 8 月 12 日—2019 年 4 月 9 日干涉图时间基线 216 d, 空间基线 -15.7 m, 采用 3 种数据集估计的对流层延迟差分相位具有明显的差异, 其中图 3(b) 显示 MERRA2 在相模湾沿岸表现异常。图 4(b)、4(d) 显示 MERRA2 在 $13 \sim 100$ km 的空间尺度上, 相比另外 2 种数据集改正结果出现了较大的偏离, 可能与 MERRA2 的空间分辨率有关。在 $50 \sim 100$ km 的空间尺度上, GACOS 与 ERA5 表现出较为明显的改善效果。如表 2 所示, 整幅干涉图 GACOS、ERA5 改正后的相位标准差分别减少了 41.7% 和 12.9% , 而 MERRA2 改正之后相位标准差增加了 65.9% 。

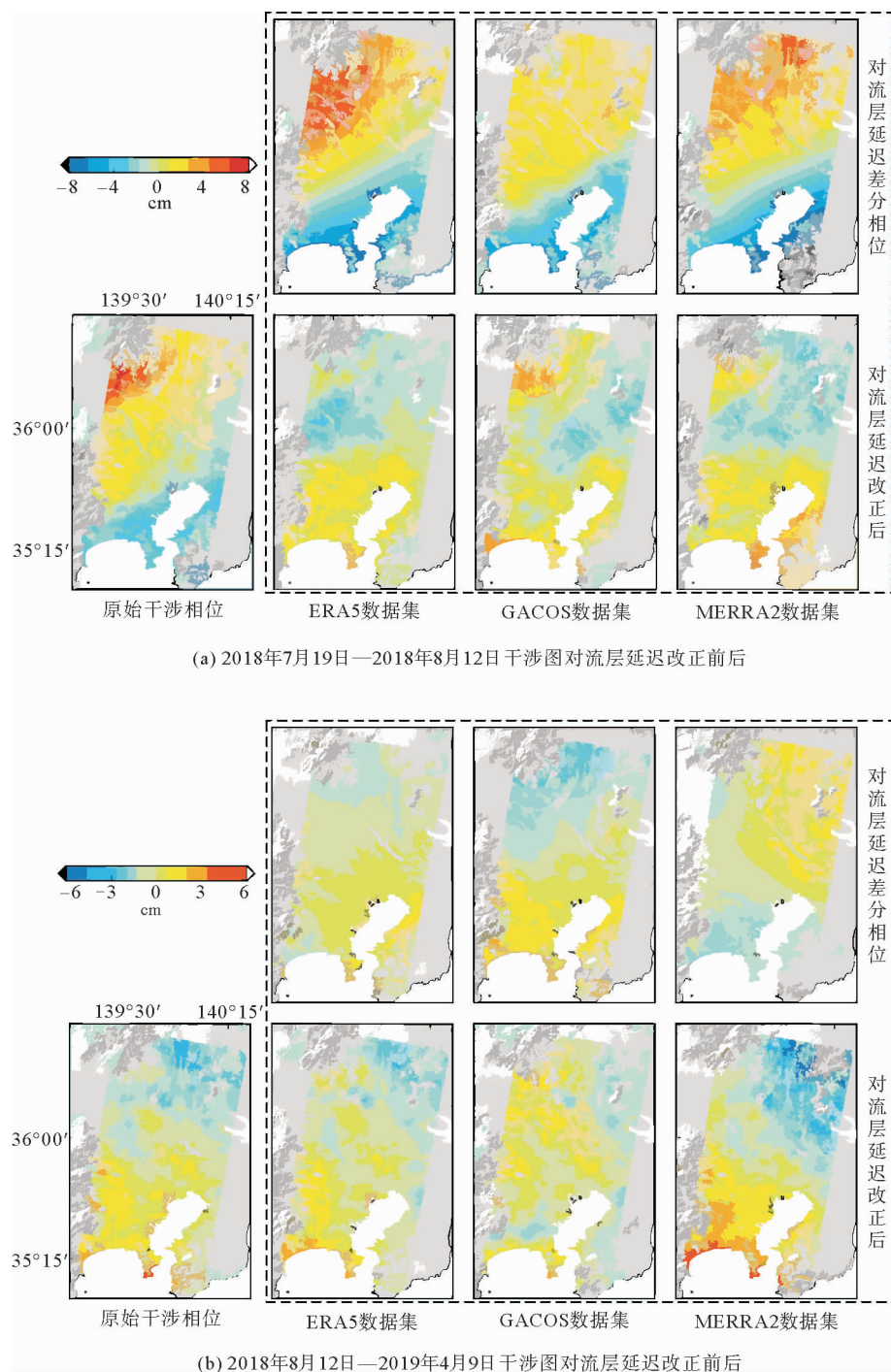


图3 3种数据集对 InSAR 干涉图对流层延迟的估计与改正结果

Fig. 3 Correction effects of InSAR interferograms tropospheric delay by three datasets

采用上述2种统计指标评估了56幅时序InSAR干涉图对流层延迟改正前后的效果,并以评估结果的平均值作为总体评价指标。由图5可知2种统计指标的结果基本一致,不同的颜色带表示57景影像生成56幅时序干涉图,在相同的空间尺度上,每幅干涉图经过对流层延迟改正后会对应56个评估值,然后计算56个评估值的标准差,表明每种数据集改正时序干涉图对流层延迟后评估值的离散程度。相位标准差是子区域内对流层改正后相位值变化的总体指标,顾及距离变化的相位标准差是在100个子区域内各自计算相位标准差后再取所有子区域标准差的平均值。半变异函数只判断计算滞后距离内目标点的相位值,该指标

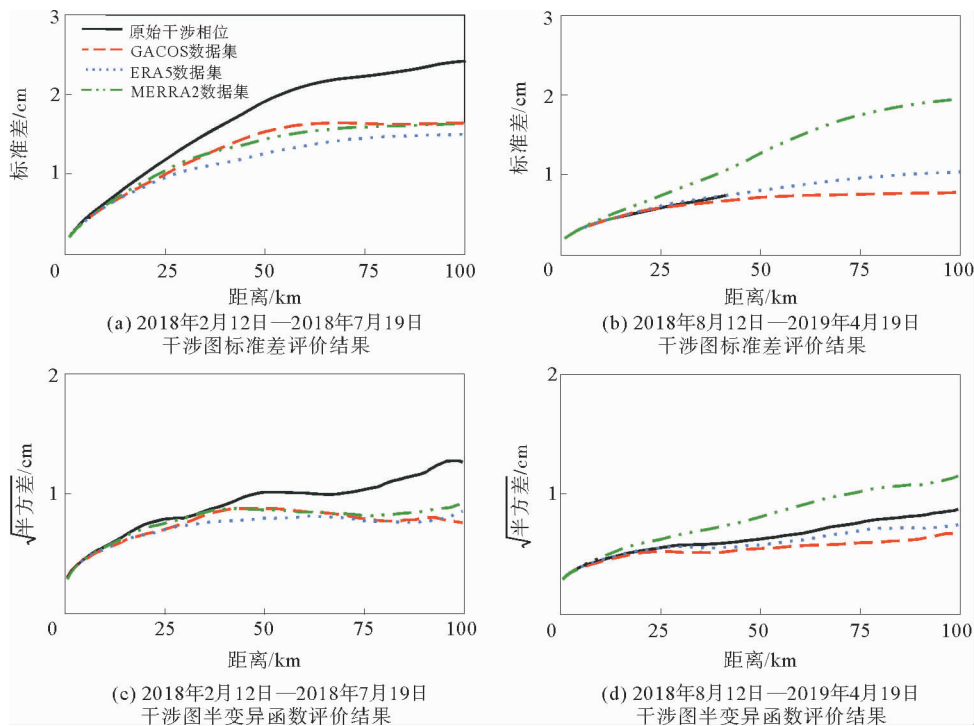


图 4 统计指标评估 2 幅干涉图对流层延迟改正的效果

Fig. 4 Statistical metrics assessments of GAM-based tropospheric correction of two interferograms

表 2 干涉图对流层延迟改正后结果对比

Tab. 2 Comparison of interferogram tropospheric delay correction results

cm

干涉图序号	原始相位标准差	GACOS 改正后	ERA5 改正后	MERRA2 改正后
2018 年 2 月 12 日—2018 年 7 月 19 日	2.33	1.55	1.68	1.73
2018 年 8 月 12 日—2019 年 4 月 19 日	1.32	0.77	1.15	2.19

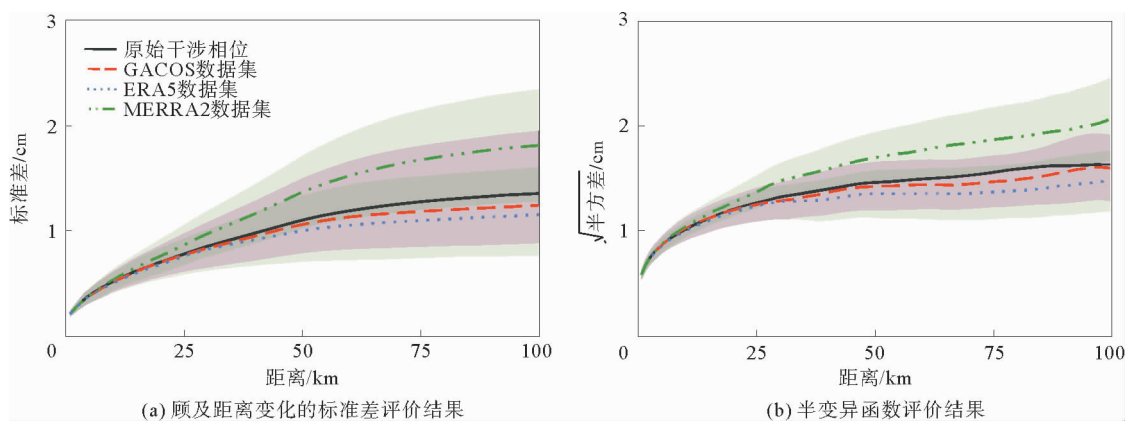


图 5 统计指标评估 56 幅 InSAR 干涉图对流层延迟的平均结果

Fig. 5 Statistical metrics assessments of GAM-based tropospheric corrections for results of averages for 56 interferograms

能够在离散的空间尺度上有效捕捉改正后相位值的空间变化。在大于 30 km 的空间尺度上,半变异函数值明显表现出 ERA5 比 GACOS 能够更有效改正干涉图中对流层延迟的优势。56 幅干涉图对流层延迟改正前后的评估结果平均值显示 0~30 km 的空间尺度上,3 种数据集均不能有效去除对流层延迟的影响,其中在大于 30 km 的空间尺度上 MERRA2 比 GACOS 和 ERA5 出现了较大的偏离。在 30~100 km 的空间尺

度上,ERA5 能够有效改正对流层延迟,但 GACOS 与原始干涉相位的曲线相近也取得了微弱的改正效果。

另外,从定量角度比较了 3 种数据集改正对流层延迟的效果,表 3 给出了统计整幅干涉图相位标准差的结果,可看出 GACOS、ERA5 及 MERRA2 对流层延迟改正后干涉图的相位标准差数量分别降低了 38、36 和 12 幅,对应的干涉图平均降低了 21.6%、27.3% 及 17.6%。ERA5 改正后的相位标准差平均值为 1.18 cm,相比原始相位标准差平均值(1.43 cm)降低了 17.5%,GACOS 改正后相比原始值降低了 13.3%。因此,相比 GACOS 及 MERRA2,采用 ERA5 进行估计与改正时序干涉图对流层延迟取得了较好的效果。

表 3 3 种数据集时序 InSAR 对流层延迟改正结果

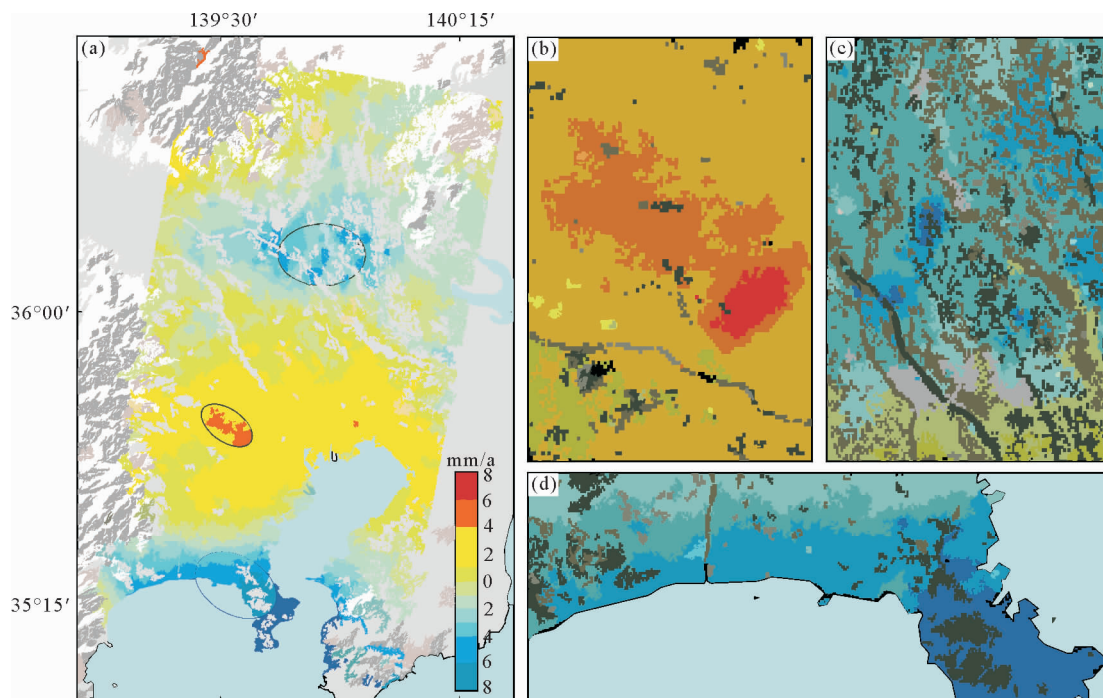
Tab.3 Results of InSAR tropospheric delay correction for three datasets

统计指标	原始干涉相位	GACOS	ERA5	MERRA2
标准差减小的干涉图数量/幅		38	36	12
干涉图标准差减小的平均值/%		21.6	27.3	17.6
改正前后相位标准差均值/cm	1.43	1.24	1.18	1.94
改正前后均值变化量/%		-13.3	-17.5	+35.6

注:±代表均值增加与减少。

3.2 地表形变解算结果

根据上述 3 种数据集进行对流层延迟改正后的评估结果可知 ERA5 改正表现较好,利用 ERA5 去除对流层延迟后,采用 PSInSAR 方法获取了研究区雷达视线向形变速率,如图 6(a)所示。研究区内的地表形变机制可分为自然因素和人类活动 2 个方面:复杂的地质环境主要影响隆升区,发生在东京周围((图 6(b))。由于 2011 年 Mw9.0 东北大地震可能导致该地区的地表渗透率增强和孔隙压力改变,最大的隆起区东南部



(a)形变速率场;(b)隆升区域分布在东京周围;(c)沉降 1 区域分布在古贺-野木周围;(d)沉降 2 分布在相模湾沿岸

图 6 研究区视线向形变速率

Fig. 6 Line of sight deformation velocity in the study area

边界清晰,可能受地下地质边界的影响,这与前人研究结果一致^[8]。人类活动的影响主要体现在沉降区域,在古贺-野木町周围(图 6(c))和相模湾沿岸(图 6(d))发生了地表下沉,古贺-野木町周围拥有易收缩的土壤,可能由于夏季农业地下水使用引起;而相模湾沿岸沉降主要由独特的地质构造背景和围填海工程引起^[11]。

利用卫星平台的方位角和每个 PS 点的入射角信息,将 GPS 的 NEU 方向的观测值投影到 SAR 卫星系统的雷达视线向并计算 GPS 站点的形变速率以验证 InSAR 监测结果的可靠性。以每个 GPS 站点为中心,半径 100 m 内的 InSAR 观测值进行反距离加权插值得到该站点的 InSAR 观测值并计算形变速率。以 G171 站点为参考点计算其他 GPS 站点的相对形变速率,发现 InSAR 与 GPS 的较差小于 2.5 mm/yr,具有较高的一致性(见表 4)。

表 4 InSAR 与 GPS 结果比较

Tab. 4 Comparison of InSAR velocity with GPS velocity at the same GPS station

				mm/yr			
GPS 站点	InSAR	GPS	差值	GPS 站点	InSAR	GPS	差值
I005	-3.75	-1.96	-1.79	I028	-2.39	-3.94	1.55
I007	-1.77	-0.01	-1.76	I029	-2.07	-3.64	1.57
I011	-1.37	0.19	-1.56	I030	-3.32	-5.68	2.36
I012	-2.14	0.31	-2.45	I035	0.62	-0.67	1.29
I014	-0.19	-1.11	0.92	J215	-1.15	-0.09	-1.06
I016	0.69	0.54	0.15	J627	-1.02	-0.09	-0.93
I026	-0.69	-3.19	2.50	J755	-1.16	-1.10	-0.06

3.3 讨论

日本关东平原地区的时序干涉图中对流层延迟明显,受海洋的影响导致该地区大气对流活动频繁,更容易产生空间小尺度且无规则的湍流混合延迟。研究区内大部分地表高程变化较小,仅在地形起伏剧烈的西北山区地带少量存在由大气厚度变化引起的垂直分层延迟。对流层延迟改正前后的相位标准差均值和削减量反映了不同改正数据集对 InSAR 对流层延迟的敏感性具有差异,可能是由于不同改正数据集与 Sentinel 1A 影像的采集时间存在不同的时间差。GAM 依赖于地面观测气象资料的采集,关东平原地区毗邻太平洋,易受台风等事件影响引起水汽的快速变化,难以被现有精度的 GAM 所捕捉。不同时空分辨率、气压分层数的数据集提供的气象参数也存在差异性,也导致了改正效果不同,图 7 表明了 ERA5 和 MERRA2 提供的温度、位势和相对水汽含量在第二压力层的显著差异性。MERRA2 的时空分辨率比 GACOS、ERA5 更低,提供的大气参数难以计算研究区内对流层的真实延迟。GACOS 融合了全球连续 GPS 天顶延迟数据进行增强处理,提高了空间与时间上的改正精度,研究区内 GACOS 略低于 ERA5 的改正效果。ERA5 在时间上更接近 Sentinel 1A 影像的获取时间,进而在时序 InSAR 对流层延迟改正中降低了对流层估计的不确定性。

4 结论

本研究以覆盖日本关东平原的 57 景 Sentinel 1A 影像为例,采用考虑距离变化的相位标准差和半变异函数评估分析了 GACOS、ERA5 及 MERRA2 这 3 种数据集改正时序 InSAR 干涉图对流层延迟的效果。结果表明,考虑距离变化的相位标准差和半变异函数可用于不同空间尺度对流层延迟改正效果的评估,二者评估结果一致。对于单幅干涉图来说,3 种数据集的改正效果具有差异;对于 56 幅时序 InSAR 干涉图改正效果综合评估来看,在 0~30 km 空间尺度上,3 种数据集在该研究区内的对流层延迟改正效果均不明显;在 30~100 km 空间尺度上,ERA5 与 GACOS 具有一定改正效果,MERRA2 效果较差。

以日本关东平原作为典型的沿海平原地区,采用 InSAR 技术在海岸带地区开展大范围的地表形变监测受对流层延迟误差的严重影响,结果显示,时间分辨率最高的 ERA5 数据集在该地区的对流层延迟改正中具有较好的效果,能够为 InSAR 技术在国内外沿海平原地区的应用提供参考。

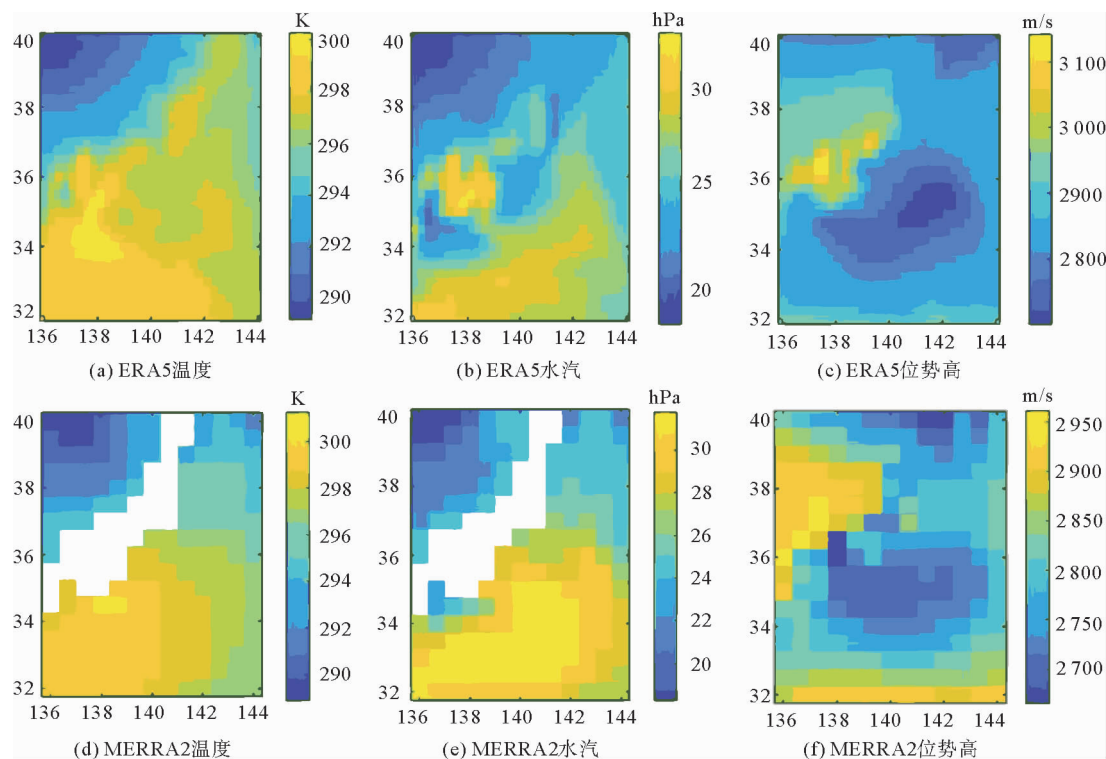


图7 ERA5与MERRA2在第2压力层的温度、水汽及位势参数比较(白色区域为空值)

Fig. 7 Comparison of temperature, water vapour and geopotential of ERA5 and MERRA2 at the 2nd pressure level

参考文献:

- [1]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.
- [2]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.
- [3]WANG Y Q,CHANG L,FENG W P,et al.Topography-correlated atmospheric signal mitigation for InSAR applications in the Tibetan plateau based on global atmospheric models[J].International Journal of Remote Sensing,2021,42(11):4361-4379.
- [4]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.
- [5]BEKAERT D P S,HOOVER A,WRIGHT T J.A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2015,120(2):1345-1356.
- [6]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.
- [7]YU C,LI Z H,PENNA N T,et al.Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations[J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2018,123(10):9202-9222.
- [8]ISHITSUKA K,MATSUOKA T,NISHIMURA T,et al.Ground uplift related to permeability enhancement following the 2011 Tohoku earthquake in the Kanto Plain,Japan[J].Earth,Planets and Space,2017,69(1):81-90.
- [9]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/OL].Remote Sensing of Environment,2019,232.DOI:10.1016/j.rse.2019.

111326.

- [10] ISHIHARA T, SUGAI T. Eustatic and regional tectonic controls on late Pleistocene paleovalley morphology in the central Kanto Plain, Japan[J]. *Quaternary International*, 2017, 456: 69-84.
- [11] MORISHITA Y. Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCS-BAS[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, 8(1): 1-23.
- [12] 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.
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.
- [13] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission[J/OL]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45. DOI: 10.1029/2005RG000183.
- [14] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [15] GELARO R, MCCARTY W, SUÁREZ M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [16] DOIN M P, LASSERRE C, PELTZER G, et al. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(1): 35-50.
- [17] HOOPER A, BEKAERT D, SPAANS K, et al. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J]. *Tectonophysics*, 2011, 514-517: 1-13.
- [18] 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.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 18 页)

- [23] 林妙琴, 李建国. 冀北滦平盆地三岔子剖面晚侏罗世-早白垩世孢粉组合及其意义[C]//中国古生物学会孢粉学分会十届一次学术年会论文摘要集, 2017: 16. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2017.008839.
- [24] QIAO D W, PENG N, KUANG H W, et al. Changes in prevailing surface-paleowinds reveal the atmospheric circulation transition during Early Cretaceous in North China[J/OL]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 586. DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110784.
- [25] GAO Y J, ZHANG S H, ZHAO H Q, et al. North China block underwent simultaneous true polar wander and tectonic convergence in late Jurassic: New paleomagnetic constraints[J/OL]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 567. DOI: 10.1016/j.epsl.2021.117012.
- [26] 王大宁, 王旭日, 季强. 冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交的孢粉植物群演替与古气候变化[J]. *地球学报*, 2016, 37(4): 449-459.
WANG Daning, WANG Xuri, JI Qiang. The palynoflora alternation and the paleoclimate change at the turning time between Late Jurassic and Early Cretaceous in Northern Hebei and Western Liaoning [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(4): 449-459.
- [27] 覃祚煥, 席党鹏, 徐延康, 等. 冀北滦平盆地榆树下剖面大北沟组岩石地层, 生物地层及其地质年代探讨[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 78-105.
QIN Zuohuan, XI Dangpeng, XU Yankang, et al. Lithostratigraphy, biostratigraphy and geological time of Dabeigou Formation from the Yushuxia Section in the Luanping Basin, Northern Hebei[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 78-105.
- [28] 孟庆强. 地质体中天然氢气成因识别方法初探[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 552-558.
MENG Qingqiang. Identification method for the origin of natural hydrogen gas in geological bodies[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 552-558.
- [29] DUGGEN S, CROOT P, SCHACHT U, et al. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: Evidence from biogeochemical experiments and satellite data[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34. DOI: 10.1029/2006GL027522.

(责任编辑:高丽华)