doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.09

基岩热膨胀对中国西南三维地表周年形变 的影响分析

王鹏飞^{1,2}, 王松筠³, 李 进^{1,2}, 齐朝祥^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 美国德克萨斯大学奥斯汀分校 空间研究中心, 奥斯汀 78759)

摘要: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 可以监测获取地表形 变时间序列,其中的周年信号除包含负荷形变外,还有由于地表温度变化引起的基岩热膨胀效 应。利用全球三维热弹性形变模型,对中国西南地区 39 个陆态网观测站在 U、E、N 三个方向的热膨胀效应进行估计,分析 GNSS 时间序列在热膨胀效应改正前后,与 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)和 GRACE Follow-On (GRACE-FO) 卫星重力观测所反映 地表负荷形变的符合程度。结果表明,加以热膨胀效应改正后,GNSS 垂直分量(U方向)与 卫星重力结果的符合程度略微减弱;而在水平分量 E 方向的符合程度有一定改善,但 N 方向出 现较显著的减弱。该文得到的西南地区研究结果与已有全球或者大尺度区域的研究结果不一致,表明利用全球热弹性形变模型估计不同区域热膨胀效应的精度需要进一步评估,并且其对地表 三维形变的影响也值得后续深入研究。

关键词:热膨胀效应;地表负荷形变;GNSS;GRACE;GRACE-FO
中图分类号:P312
文献标识码:A

1 引 言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 观测站可以提供高精度 的地表形变观测数据,通过处理 GNSS 在地面站点测得的位置时间序列,进一步可以分析 地表三维形变特征^[1],为开展地球参考框架的建立和维持、地震学、水文学以及全球气候变 化等研究提供数据支撑。GNSS 形变观测包含多种地球物理信号,主要包括台站所在区域的 板块运动和地表质量变化导致的负荷形变等^[2]。其中,地表负荷质量变化又分为人为因素导

- **资助项目:** 国家自然科学基金 (42394132, 12003057, 12173069, 11703065); 国家重点研发计划 (2021YFC3200203, 2018YFE0118500)
- 通讯作者: 王鹏飞, wangpengfei@shao.ac.cn

收稿日期: 2023-08-12; 修回日期: 2023-11-17

致的质量迁移(如地下水和煤矿开采、填湖造田等)和自然因素引起的地表质量季节性变化 (如降水、洋流、大气活动等)。此外,地表温度变化引起的观测站水泥墩和基岩的周期性热 弹性形变幅度可达数毫米,因此,热膨胀效应对利用 GNSS 形变观测开展负荷效应研究的 影响不容忽视^[3,4]。

热膨胀效应是由于地球表面温度的周期性变化引起物体形变的现象。自1975年 Berger^[5] 提出二维热弹性形变模型后,许多研究对此进行了深入探讨。Dong 等人^[6]提出了 计算基岩垂直方向热弹性形变的方法,结果显示全球地表垂直方向的最大周年振幅不超过 0.56 mm; Yan 等人^[3]进一步分析了 86 个全球定位系统 (global positioning system, GPS) 观测站,发现基岩热膨胀效应引起的垂直方向形变最大周年振幅可达 1.3 mm;闫昊明等 人^[7] 研究了热弹性形变对我国 GNSS 台站的影响,发现垂直方向的热弹性形变最大能达到 1 mm^[7];姜卫平等人^[8]对热弹性形变时间序列进行了拟合分析,认为周年变化是其主要信 号; 贾路路等人^[9]利用 GPS 和重力场恢复与气候实验卫星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 数据联合分析热膨胀效应对地表垂向形变的影响,结果显示改正热 膨胀效应可以提升两者的一致性。以上研究表明热膨胀效应引发的地表周年形变是台站位 移的一个不可忽视的因素,然而,上述研究都是集中于垂直方向的地表形变,且均基于半 空间的地球模型,而实际的地球更接近于球形。为此,Fang 等人^[10]在 2014 年提出了在地 心静止约束条件下,基于球形模型的热膨胀效应引起的水平和垂直方向的三维形变计算方 法。Xu 等人^[11]采用该方法对热弹性形变进行了计算,结果表明垂直方向最大周年振幅可达 3 mm,水平方向可达 1.5 mm。魏娜等人^[12]则利用全球 GPS 观测站的数据,采用该方法计 算了热弹性形变,并与 GPS 形变在扣除 GRACE 数据计算的负荷形变之后的结果进行比 较,结果表明两者在 N 方向空间一致性较好。谭伟杰等人基于该方法计算了中国大陆地区 的三维热弹性形变,将温度变化引起的地表周年变化信息分别叠加到 GRACE 和物质负荷 模型反演的地表周年信号中,再与 GNSS 形变进行比较;结果也证明,考虑了热膨胀效应 的影响后,两者与 GNSS 的符合程度均有所提升^[13]。

GRACE 卫星是由美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和德国地学研究中心 (German Research Centre for Geosciences, GFZ) 联合研制的用 于探测地球重力场及其时变性的卫星,于 2002 年 3 月发射,2017 年 10 月终止运行;其后继 卫星 (GRACE Follow-On, GRACE-FO) 于 2018 年 5 月发射并运行至今。GRACE/GRACE-FO 采用极轨设计,可全天候观测全球重力场,通过分析在轨的两颗卫星之间的距离、速 度和加速度等数据,为全球重力场变化监测提供全新的方式¹¹⁴。GRACE/GRACE-FO 卫 星科学数据发布机构每月会提供地球重力场模型数据,其中的 GSM 数据给出描述地球重 力场的球谐系数 (spherical harmonics coefficients, SH),可用来计算大地水准面及其随时间的变化量,由于存在误差,GRACE/GRACE-FO 每月重力场模型数据在使用前需要进行低阶项的替换、滤波等预处理工作^{115]},但滤波可能会导致信号的泄漏和失真。近年来,GRACE/GRACE-FO 相关数据解算和处理机构还推出了 mascon 数据产品,以全球格网质量变化(等效水高)的形式来展示重力场的变化,数据已经事先进行了低阶项替换、冰后回 弹改正等处理,无需进行滤波等处理操作,可直接用于地表质量变化的分析研究^[16,17]。

通过对比 GNSS 观测时间序列与 GRACE/GRACE-FO 计算得到的地表负荷形变时间 序列,一方面可以验证 GRACE/GRACE-FO 数据的可靠性,另一方面也可以用来对非构 造形变进行更合理的分析和解释^[18,19]。在 GNSS 地表形变时间序列中,除地表质量变化引 起的负荷形变,由温度变化引起的基岩热弹性形变也是其中一种重要的信号^[20],尤其是 在周年(季节性)温度变化较明显的地区,其影响可能不容忽视。因此,为了更准确地分 析 GNSS 形变中的各种因素,除了考虑地表质量负荷变化效应,还需要顾及热膨胀效应的 影响。

在 GNSS 形变分析中,前人关于热膨胀效应的研究主要集中在垂直方向,且研究范围 侧重于全球或较大尺度区域,而对局部地区的研究相对较少。为了分析热膨胀效应对局部地 区 GNSS 观测站形变的影响,本文选取中国西南地区,采用基于球形模型的三维热弹性形 变计算方法^[10],利用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的全球温度变化数据、美国德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, CSR) 发布的 GRACE/GRACE-FO SH 产品和 mascon 产品,以及中 国大陆构造环境监测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 解 算的 GNSS 三维形变观测数据,旨在分析热膨胀效应改正前后,GNSS 形变时间序列与 GRACE/GRACE-FO 计算的三维形变的一致性变化,以便更好地分析和解释由温度变化引 起的热膨胀效应对 GNSS 数据的影响。

2 数据处理和地表形变计算

2.1 GNSS 数据

2期

本文采用的 GNSS 数据来自中国大陆构造环境监测网络(陆态网)^[21]。陆态网利用 GAMIT/GLOBK 软件,对 GNSS 观测数据进行解算以得到形变时间序列。根据地理位置 陆态网将全国的观测站分为 7 个子网,每个子网间有公共观测站。公共观测站与中国周边 的国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 观测站组成一个整体的大网,通过 IGS 站约束至国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。利用 GAMIT/GLOBK 处理得到观测站的单日松弛解,其为无基准解,通过全球分布的 ITRF 参 考框架点进行七参数相似变换,最终约束至 ITRF2008 框架下^[22]。

本文选取位于中国西南地区(经度为86°~109°,纬度为21°~34°)的陆态网观测站进 行分析。在使用陆态网的GNSS观测数据之前,进行了一系列预处理:首先,剔除观测质 量差和观测历元个数过少的观测站;其次,探测和改正由仪器更换和同震位移引起的跳变; 最后,采用三倍中误差准则剔除粗差。为了与GRACE/GRACE-FO数据扣除的数据基准 与采用的月时间跨度一致,对GNSS数据进行进一步处理:减去2004.0-2010.0期间的平 均值;根据GRACE/GRACE-FO提供的月跨度时间,判断处于该月时间内的GNSS日数 据数量,若达到该月时间对应天数的一半以上,按照等权平均转换为月数据。经过系列数据 处理过程,最终选取39个GNSS观测站,其坐标及时间跨度数据详见表1。

			1	• • • • • • • • • • •			
观测站	纬度	经度	时间跨度	观测站	纬度	经度	时间跨度
	$/(^{\circ})$	/(°)			$/(^{\circ})$	/(°)	
GZGY	26.5	106.7	2011-01-2021-00	XZCY	28.7	97.5	2010-07-2021-08
GZSC	26.6	104.9	2010-06 - 2021-08	XZYD	27.4	88.9	201206202105
LHAZ	29.7	91.1	2003-00-2019-00	YNCX	25.0	101.5	2011-01-2021-08
LUZH	28.9	105.4	2002-03-2021-00	YNHZ	26.4	103.3	2011-01-2021-08
SCBZ	31.8	106.7	2010-05-2021-00	YNJD	24.4	100.9	2010-05 - 2021-08
SCDF	31.0	101.1	2011-01-2019-01	YNLC	23.9	100.1	2010-06 - 2021-00
SCGZ	31.6	100.0	2011-01-2021-00	YNLJ	26.7	100.0	2010-06 - 2021-08
SCJL	29.0	101.5	201006202108	YNMJ	23.4	101.7	2010-05 - 2021-08
SCJU	28.2	104.5	2010-05-2021-08	YNML	24.4	103.4	2010-05 - 2020-00
SCMB	28.8	103.5	2010-05-2021-00	YNMZ	23.4	103.4	2010-05 - 2021-00
SCML	27.9	101.3	2011-01-2019-00	YNRL	24.0	97.8	201006202108
SCMN	28.3	102.2	2010-05-2021-08	YNSD	24.7	99.2	2011-01-2021-08
SCNC	31.0	105.9	2010-05-2019-00	YNSM	22.7	101.0	2010-05 - 2021-08
SCPZ	26.5	101.7	2011-00-2021-08	YNTH	24.1	102.8	2010-05 - 2021-08
SCSM	29.2	102.4	2010-09-2021-08	YNWS	23.4	104.2	2011-01-2020-00
SCSN	30.5	105.6	2010-05-2021-00	YNYA	25.7	101.3	2011-00-2019-00
SCSP	32.6	103.6	2011-02-2019-00	YNYL	25.9	99.4	2010-05 - 2019-00
SCXC	28.9	99.8	201006201900	YNYS	26.7	100.8	2010-05-2021-08
SCXD	28.3	102.4	2010-05-2021-08	YNZD	27.8	99.7	2011-01-2021-08
SCYX	28.7	102.5	2010-05-2019-00				

表 1 GNSS 观测站信息

2.2 GRACE/GRACE-FO 数据

本研究采用的 GRACE/GRACE-FO 数据均来自 CSR,包括 96 阶 GSM(SH)、180 阶 GAC 和 GAD 球谐系数数据产品 (ftp://rz-vm152.gfz-potsdam.de),以及 RL06.2 mascon 格 网等效水高数据 (http://www2.csr.utexas.edu)^[17]。

对于 CSR SH 数据,在使用前我们进行了一系列预处理。由于 GRACE/GRACE-FO 卫星无法观测到地心运动,因此采用 TN13 数据替换 C10、C11 和 S11 项;因为卫星自 身轨道设计的特点,GRACE/GRACE-FO 数据对低阶项不敏感,所以利用卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR)数据替换 C20、C30 项^[23];为减小南北方向条带误差和降 低高阶系数噪声,对数据进行去相关滤波和 300 km 高斯平滑滤波^[24,25];采用 CSR 提供的 AOD1B RL06 GAC 数据,进行非潮汐大气和海洋的改正;利用 Peltier 提供的数据进行冰 川均衡调整 (Glacial Isostatic Adjustment, GIA)改正^[26]。

CSR mascon 数据本身就已经包含了相关的数据替换和误差改正。利用 TN-13a 数据对 地心运动项 degree-1 进行改正^[27,28];利用 SLR TN14 数据替换 GRACE/GRACE-FO 数据 的 C20 项,并对 GRACE-FO 数据的 C30 项进行替换^[23,29];基于 ICE-6G_D 模型改正 GIA 的影响^[26];为了用于海洋学相关的研究,已加回 AOD1B GAD 数据;为减小海陆信号泄漏

318

319

效应的影响,跨越海陆边界的 mascon 质量块被分成两部分来解算,同时为提高海陆边界 值的精度,最终以 0.25° 经纬度间隔发布了数据^[30]。CSR mascon 数据是相对于 2004.0-2010.0 之间平均值的异常值,为与其时间参考基准保持一致,对 CSR SH 数据同样减去该 时间段的平均值,得到每月的质量变化。

2.3 温度数据

本研究利用了 ECMWF 提供的地球表层温度 (skin temperature) 月平均数据 (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means), 其以 0.1° × 0.1° 格网形式发布,经过平滑得到 0.5° × 0.5° 的温度数据,时间跨度为 2010.0-2022.0,共12 a。

2.4 形变计算理论

根据负荷形变理论,地球表面的物质质量变化会引起观测站所在地壳发生负荷形变。考虑全球尺度下的物质质量变化,采用格林函数进行卷积积分,并经过相应的变换,可以得到利用 GRACE/GRACE-FO SH 数据计算地表三维负荷形变的方法^[2,18,31]:

$$e(\theta,\phi) = \frac{a}{\sin\theta} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{l} m \widetilde{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm}\cos(m\phi) + \Delta S_{lm}\sin(m\phi)] \frac{l_l}{1+k_l} \quad , \quad (1)$$

$$n(\theta,\phi) = -a\sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}\frac{\partial\widetilde{P}_{lm}(\cos\theta)}{\partial\theta}[\Delta C_{lm}\cos(m\phi) + \Delta S_{lm}\sin(m\phi)]\frac{l_l}{1+k_l} \quad , \qquad (2)$$

$$u(\theta,\phi) = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{l} \widetilde{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm}\cos(m\phi) + \Delta S_{lm}\sin(m\phi)] \frac{h_l}{1+k_l} \quad , \tag{3}$$

式中, $e(\theta, \phi)$ 、 $n(\theta, \phi)$ 、 $u(\theta, \phi)$ 分别表示地表某一点在东西、南北、垂直方向的负荷形变。 a 是地球半径, θ 是余纬, ϕ 是经度, ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 是 GRACE/GRACE-FO 发布的相对 于某一时间段平均值的无量纲的斯托克斯球谐系数, \tilde{P}_{lm} 是完全正规化的 l 阶 m 次勒让 德函数, h_l 、 l_l 、 k_l 是对应的阶负荷勒夫数。本研究采用基于 PREM 地球模型的负荷勒夫 数^[2]。采用 mascon 数据计算负荷形变时,首先利用 mascon 的全球格网等效水高数据,通 过积分计算出地表面密度变化对应的球谐系数,具体公式如下:

$$\Delta \hat{C}_{lm} = \frac{1}{a\rho_{\rm w}} \frac{1}{4\pi} \oint q(\theta', \phi') \widetilde{P}_{lm}(\cos \theta') \cos(m\phi') \mathrm{d}\sigma \quad , \tag{4}$$

$$\Delta \hat{S}_{lm} = \frac{1}{a\rho_{\rm w}} \frac{1}{4\pi} \oint q(\theta', \phi') \widetilde{P}_{lm}(\cos\theta) \sin(m\phi') \mathrm{d}\sigma \quad , \tag{5}$$

其中, θ' 是负荷点余纬, ϕ' 是负荷点经度, $q(\theta',\phi')$ 是负荷点的质量变化,即GRACE/GRACE-FO mascon 等效水高数据, ρ_w 是水的密度。

然后转为大地水准面变化的球谐系数:

$$\begin{cases} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{cases} = \frac{3\rho_{\rm w}}{\rho_{\rm e}} \frac{1+k_l}{2l+1} \begin{cases} \Delta \hat{C}_{lm} \\ \Delta \hat{S}_{lm} \end{cases} ,$$
 (6)

式中, $\rho_{\rm e}$ 是地球的平均密度。

对于海洋区域质量变化,由于 mascon 数据仅进行了部分恢复,为了与 GNSS 地表形变 观测包含的信号一致,本文通过扣除 GAD 并加回 GAC 数据的方法,将大气与海洋质量变 化信号包含在内。最后利用公式 (1)-(3) 计算由 GRACE/GRACE-FO mascon 获得的地表 三维负荷形变。

最后,通过式(7)求得由于地表温度变化引起的三维热弹性形变[10]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}(\theta,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^{n} [\hat{\boldsymbol{r}} U_{nm}(r) + V_{nm}(r) \nabla_1] Y_{nm}(\theta,\phi) \\ \nabla_1 = \hat{\boldsymbol{\theta}} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{\boldsymbol{\phi}} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \end{cases}$$
(7)

a是地球半径,当r = a时:

$$U_{nm}(a) = e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \beta T_{nm} \sqrt{\frac{\eta}{\omega}} \left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right) \left[1 + A_n(n+2-\Pi_n) + nB_n\right] \quad , \tag{8}$$

$$V_{nm}(a) = e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \beta T_{nm} \sqrt{\frac{\eta}{\omega}} \left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma}\right) \left[A_n + B_n\right] \quad , \tag{9}$$

式中, $U(\theta, \phi)$ 表示余纬为 θ , 经度为 ϕ 的点由于温度变化引起的总形变, $U_{nm}(a)$ 、 $V_{nm}(a)$ 分别代表径向(垂直方向)和水平方向的形变, \hat{r} 、 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{\phi}$ 分别代表径向、纬度方向(南北 方向)和经度方向(东西方向)的单位向量。 η 是热扩散系数, 取值为 1 × 10⁻⁶ m/s, ω 是 温度周年变化的角频率, 取值为 1 × 10⁻⁷/s, β 是热膨胀系数, 取值为 1.6 × 10⁻⁵/°C, σ 是 泊松比, 取值为 0.266 2, A_n 、 B_n 、 Π_n 是与 σ 有关的常数。值得注意的是, $-\frac{\pi}{4}$ 意味着由 于温度变化导致的形变与温度变化相位之间存在 $\frac{\pi}{4}$ 的相位延迟。

3 基岩热膨胀效应的影响和分析

3.1 基岩热膨胀效应对 GNSS 与 GRACE/GRACE-FO 三维形变符合程度的影响

本研究首先对基岩热膨胀效应引起的地表三维形变进行了定量估算。图1展示了中国西 南地区热弹性形变在U、E、N各方向的周年振幅和相位。在U方向,周年振幅的范围是 0.0~1.8 mm,呈现出川青藏交界区域振幅大、滇桂南部区域振幅小的空间分布特点,周年 相位分布在55.8°~238.2°之间,但除了广西南部的小部分区域外,U方向的热弹性形变大 都在八月份左右达到峰值^[12,13];而在E方向,周年振幅整体较小,范围仅为0.0~0.6 mm, 周年相位范围在44.2°~326.7°之间,E方向热弹性形变除西藏中部部分地区在三月份前 后达到形变峰值外,其他大部分地区则为七到九月份;至于N方向,周年振幅分布范围为 0.8~1.8 mm,在西藏东南部、川滇藏交界处和广西南部较大,周年相位在32.3°~55.1° 之间,N方向热弹性形变集中在二月份达到峰值^[12]。

本研究采用 GRACE/GRACE-FO 数据相对于 GNSS 数据的 RMS 减少率、周年振幅 减少率及相关系数,来评估两种数据的符合程度。



注:周年振幅 A 和周年相位 φ 按照 $A \cos[\omega(t - t_0) - \varphi]$ 定义得到,其中 t_0 是 2008.0,而 ω 是值为 2π (1周/年)的角频率。

图 1 中国西南地区热弹性形变在 U、E、N 这 3 个方向的周年振幅和相位

为了在地图上展示 GRACE/GRACE-FO 形变和 GNSS 形变一致性的绝对大小,以 CSR SH 数据计算的形变为例,其相对于经过热膨胀效应改正后的 GNSS 形变数据的 RMS 减少率、周年振幅减少率以及相关系数结果如图 2 所示。结果显示以下特点:两种数据在 U 方向的一致性相对较好,3 个参量普遍较大,特别在云南地区的观测站,其符合程度较为 显著,在四川地区则相对较差。E 方向的3 个参量结果有正有负,其值明显小于 U 方向, 表明两种数据在 U 方向的符合程度高于 E 方向,且在四川地区表现相对较好,但在云南西 部的结果不理想。然而,两种数据在 N 方向的结果显示出较大差异,且明显弱于 U 和 E 方向, RMS 减少率和周年振幅减少率在很多观测站的结果都小于零,尤其是在四川地区表 现不尽人意,仅在云南部分地区稍好。总体来看,在中国西南地区,尽管热膨胀效应在垂直 方向上比水平方向上显著,但是垂直方向的负荷形变同样更大且为 GNSS 形变的主要信号,



因此,经过热膨胀效应改正后3个参量的符合程度也更高;此外,上述3个参量的对比结 果与观测站的地域分布没有显示出明显的相关性。

注: a) 到 i) 分别为 GNSS 时间序列减去热弹性形变时间序列之后,在 U、E 和 N 这 3 个方向, CSR SH 数据相对于 GNSS 数据的 RMS 减少率、周年振幅减少率和相关系数。

图 2 GNSS 数据经过热膨胀效应改正后 3 个参量在不同方向的结果

为了更直观地展示基岩热膨胀效应对 GNSS 与 GRACE/GRACE-FO 符合程度的影响, 本文进一步比较了 GNSS 数据热膨胀效应改正前后 3 个参量的差别。因为 CSR SH 数据 与 CSR mascon 数据的结果相似,下面描述的观测站个数和比例同样以 CSR SH 数据的 结果为例。由图 3a)、b)、c) 可以看出,对于 U 方向,热膨胀效应对两种数据的符合程 度影响较小。虽然图中大部分圆圈都集中在红色实线附近,但只有 YNLC 观测站的周年 振幅减少率位于其之上, 8个观测站的 RMS 减少率和 9个观测站的相关系数有所增大, 分别占比 3%、21% 和 23%,表明经过热膨胀效应改正后,大多数观测站的 GNSS 形变和 GRACE/GRACE-FO 形变相符结果变差,但下降幅度较小。如图 3d)、e)、f)所示,对于 *E*方向,热膨胀效应的改正对两种数据的一致性带来一定的改善。大部分台站对应的圆圈 位于红色实线之上, RMS 减少率、周年振幅减少率和相关系数增大的观测站个数分别为 38、22、38, 对应的比例分别为97%、56%和97%,说明经过热膨胀效应改正后,大多数 观测站的 GNSS 形变与 GRACE/GRACE-FO 形变结果更加接近,符合程度有所提升。然 而,对于 N 方向,如图 3g)、h)、i) 所示,热膨胀效应的改正导致了两种数据一致性的明显 下降。大部分台站对应的点位于红色实线之下且偏离较多: 所有 39 个观测站的 RMS 减少 率和相关系数都变小,只有10个观测站的周年振幅减少率增大,占比26%;表明经过热膨 胀效应改正后, GNSS 和 GRACE/GRACE-FO 结果的符合程度被显著削弱。无论是热膨胀



效应改正之前或之后,GRACE/GRACE-FO的SH产品和mascon产品(分别以蓝色和绿色表示)的结果差异都较小,说明两种数据产品在描述地表形变方面具有较好的一致性。

注: a) 到 i) 分别代表在 U、E、N 这 3 个方向, CSR SH 和 CSR mascon 数据相对于 GNSS 数据的 RMS 减少率、周年振幅减少率和相关系数。横坐标代表的是 GNSS 数据热膨胀效应改正前的参量结果, 纵坐标代表 的是改正后的结果, 每个圆圈代表一个观测站的结果。蓝色和绿色圆圈分别代表的是 CSR SH 和 CSR mascon 数据的结果。红色代表的是参考直线 y = x, 如果圆圈在该直线以上,表明 GNSS 数据在热膨胀效应改正之后, GRACE/GRACE-FO 数据与 GNSS 数据一致性变好,反之变差。

图 3 GNSS 数据在热膨胀效应改正前后 3 个参量在不同方向的结果对比

表 2 展示了代表 GRACE/GRACE-FO 计算的形变与 GNSS 形变一致性的 3 个参数, 在热膨胀效应改正前后的变化。在 U 方向, CSR SH 和 CSR mascon 产品的 RMS 减少率 和相关系数都略有减小,而周年振幅减少率有 6% 左右的下降;整体来看, CSR SH 产品在 U 方向与 GNSS 数据的符合程度略好于 CSR mascon 产品的结果。在 E 方向, CSR SH 和 CSR mascon 产品的 *RMS* 减少率、周年振幅减少率和相关系数都有所增大,分别有约 2%、 6% 和 0.03 的提升; CSR mascon 产品和 GNSS 数据的一致性略好于 CSR SH 产品的结果。 在 *N* 方向, CSR SH 和 CSR mascon 产品与 GNSS 形变的一致性都明显变差,*RMS* 减少 率和相关系数大约分别下降了 3% 和 0.2,而周年振幅减少率减小超过 150%; CSR SH 和 CSR mascon 数据与 GNSS 数据的一致性差异较小。

	热膨胀效应	RMS)	减少率平均值/(%)	周年振幅》	咸少率平均值/(%)	相关系	数平均值
方向	是否改正	SH	mascon	SH	mascon	SH	mascon
IT	否	31.2	30.8	59.8	57.7	0.731	0.726
U	是	30.3	29.9	53.0	51.9	0.724	0.720
F	否	2.1	3.6	15.0	14.6	0.187	0.251
L	是	3.1	4.7	20.7	22.1	0.221	0.286
λī	否	6.7	6.5	17.5	16.8	0.362	0.357
ĨN	是	-2.9	-3.6	-158.4	-174.9	0.157	0.154

表 2 热膨胀效应改正前后 U、E、N 方向各系数平均值比较

3.2 基岩热膨胀效应对负荷形变周年信号分析的影响

在该研究区域,地表负荷形变和热弹性形变主要表现为周年信号。接下来,将从周年信 号的角度对上述结果进行分析。

表 3 显示,对 39 个观测站进行热膨胀效应改正后,在 U 方向,只有 SCBZ 观测站的 周年振幅略微减小;而周年相位除 XZCY 观测站外,其余都减小。在 E 方向,只有 9 个观 测站的周年振幅变小,其余观测站都变大;18 个观测站的相位变小,其余观测站的相位变 大。在 N 方向,只有 XZCY 观测站的周年振幅增大,其余观测站的周年振幅全部减小;有 15 个观测站的相位变大,其余观测站的相位都减小。以上结果表明 GNSS 数据经过热膨胀 效应改正之后,绝大部分观测站在 U 方向的周年振幅会增大,而周年相位有所减小;大多 数观测站在 E 方向的周年振幅也略有所增大,周年相位的变化因观测站而异;而绝大部分 观测站在 N 方向周年振幅都明显减小,多数观测站的周年相位会变小。从上面的结果可以 看出,在小尺度区域,GNSS 形变在扣除热弹性形变之后,其周年振幅不一定有所减小。这 是因为 GNSS 数据包含多种信号,在非构造信号中,热膨胀效应引起的热弹性形变和负荷 形变的相位有可能有较大差异,导致两种因素的叠加形变可能会变得更小。热膨胀效应改正 前后的 GNSS 数据,其周年振幅和相位与 GRACE/GRACE-FO 结果的差异,可通过矢量 进行更直观的对比。

图4以矢量的形式,展示了中国西南地区的39个GNSS观测站,利用GRACE/GRACE-FO数据以及GNSS数据进行拟合,得到在U、E、N这3个方向形变的周年振幅和相位。通过对比GNSS/GNSS-Thermal和CSRSH/CSRmascon矢量的大小和方向,可分析出热膨胀效应的影响。由图4a)可知,原始GNSS数据拟合得出的周年信号(红色箭头),在该区域空间上一致性较好,即相邻的观测站的周年信号变化不大。经过热膨胀效应改正之后的结果(蓝色箭头),相对于原始GNSS数据结果,热膨胀效应对周年信号结

		表	3 热臆	影胀效应改	t 正前后列	见测站周年	⊑振幅和相位	(此处相位	范围是 −180° ~	180°) 比较		
			周年振	幅/mm					周年相位	()/;		
		7	I	لتا لتا	V	· ·	\overline{U}	-	E		Į	Λ
观测站	以前	改后	改前	改后	改前	改后	改前	改后	改前	改后	改前	改后
GZGY	$3.1 {\pm} 0.7$	$3.7 {\pm} 0.7$	$0.4 {\pm} 0.1$	$0.3 {\pm} 0.1$	2.0 ± 0.3	$0.8{\pm}0.3$	91.5 ± 0.6	81.7 ± 3.5	$137.4 {\pm} 0.6$	111.2 ± 0.4	43.5 ± 2.6	41.9 ± 2.6
GZSC	4.6 ± 0.5	5.0 ± 0.5	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.9 ± 0.2	0.8 ± 0.2	106.5 ± 4.0	98.3 ± 2.1	46.0 ± 0.4	$38.0 {\pm} 0.4$	40.8 ± 1.0	$32.5 {\pm} 0.9$
LHAZ	6.0 ± 0.4	7.1 ± 0.4	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.2	$2.1{\pm}0.2$	$0.7{\pm}0.2$	61.6 ± 3.4	58.8 ± 3.6	$13.7 {\pm} 0.3$	$8.6{\pm}0.2$	43.5 ± 1.4	$42.8{\pm}1.4$
LUZH	3.7 ± 0.6	$4.4{\pm}0.6$	0.5 ± 0.2	0.8 ± 0.2	1.5 ± 0.2	$0.4{\pm}0.2$	91.1 ± 0.4	81.8 ± 2.8	$45.8{\pm}1.6$	$39.4{\pm}1.5$	$37.9{\pm}1.5$	$23.4{\pm}1.1$
SCBZ	3.2 ± 0.5	3.1 ± 0.5	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2	145.3 ± 6.9	$126.3 {\pm} 7.0$	$83.1 {\pm} 0.3$	67.9 ± 0.8	46.5 ± 1.1	$76.4{\pm}0.5$
SCDF	6.9 ± 0.7	8.0 ± 0.7	$1.1{\pm}0.5$	$1.4{\pm}0.5$	1.1 ± 0.2	$0.5{\pm}0.2$	$58.9{\pm}13.1$	$56.5{\pm}13.6$	48.8 ± 6.3	$48.6 {\pm} 6.3$	$59.5{\pm}1.6$	176.8 ± 0.2
SCGZ	5.2 ± 0.4	6.6 ± 0.4	0.7 ± 0.2	$0.7{\pm}0.2$	$1.5{\pm}0.2$	$0.3{\pm}0.2$	61.6 ± 3.9	57.2 ± 4.3	-44.1 ± 0.7	$-18.5{\pm}0.4$	$32.0{\pm}1.6$	-6.3 ± 0.4
SCJL	$6.6 {\pm} 0.7$	$7.5 {\pm} 0.7$	1.5 ± 0.2	$1.7 {\pm} 0.2$	$2.1{\pm}0.2$	$0.8{\pm}0.2$	$89.8 {\pm} 0.1$	84.1 ± 3.2	11.3 ± 0.6	$17.1 {\pm} 0.9$	48.0 ± 0.7	$52.2 {\pm} 0.7$
SCJU	4.3 ± 0.4	$4.7 {\pm} 0.4$	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.2	2.3 ± 0.3	1.2 ± 0.3	109.9 ± 3.6	$99.5 {\pm} 1.8$	$25.5{\pm}1.2$	$25.3{\pm}1.2$	39.3 ± 2.9	$34.4{\pm}2.8$
SCMB	6.0 ± 0.5	$6.7{\pm}0.5$	1.0 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.4	$0.6{\pm}0.4$	$84.4{\pm}1.5$	$79.1 {\pm} 3.0$	$36.2{\pm}2.3$	$36.0{\pm}2.3$	74.5 ± 2.0	140.4 ± 3.9
SCML	9.6 ± 0.9	$10.2{\pm}0.9$	$1.6{\pm}0.2$	$1.7{\pm}0.2$	$1.9{\pm}0.3$	$0.8{\pm}0.3$	$78.4{\pm}10.0$	$75.5{\pm}12.3$	-11.2 ± 0.7	$-5.1{\pm}0.3$	$33.6{\pm}1.7$	$5.0{\pm}0.3$
SCMN	6.4 ± 0.6	6.9 ± 0.6	0.8 ± 0.1	$1.0 {\pm} 0.1$	$1.4{\pm}0.2$	$0.1{\pm}0.2$	$92.6 {\pm} 0.9$	$87.0{\pm}1.1$	21.4 ± 0.4	$26.6{\pm}0.4$	51.5 ± 1.4	$91.4{\pm}0.1$
SCNC	$3.6 {\pm} 0.5$	$3.6{\pm}0.5$	0.4 ± 0.1	$0.7{\pm}0.1$	$1.7{\pm}0.3$	$0.6{\pm}0.3$	$137.2 {\pm} 7.4$	$121.3{\pm}6.5$	$5.1{\pm}0.1$	$15.1{\pm}0.2$	42.6 ± 2.1	46.3 ± 2.1
SCPZ	6.4 ± 0.6	6.6 ± 0.6	0.5 ± 0.1	$0.5 {\pm} 0.1$	$1.9{\pm}0.2$	$0.9{\pm}0.2$	102.7 ± 4.9	$96.6 {\pm} 2.6$	$-35.9{\pm}0.5$	$-19.2{\pm}0.3$	$26.2{\pm}1.3$	$-8.1 {\pm} 0.5$
SCSM	7.0 ± 0.5	7.9 ± 0.5	1.0 ± 0.2	$1.1{\pm}0.2$	1.3 ± 0.2	$0.2{\pm}0.2$	$79.7{\pm}2.9$	75.1 ± 4.1	-15.2 ± 0.6	$-1.5{\pm}0.1$	$37.9{\pm}1.5$	-64.0 ± 1.2
SCSN	3.8 ± 0.5	$3.8{\pm}0.5$	1.1 ± 0.2	$1.4{\pm}0.2$	1.1 ± 0.3	$0.4{\pm}0.3$	$138.3 {\pm} 6.2$	$123.1 {\pm} 5.7$	$18.8 {\pm} 0.5$	$20.9{\pm}0.5$	$59.6{\pm}1.9$	145.8 ± 2.0
SCSP	3.5 ± 0.5	5.0 ± 0.5	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.2	$1.9{\pm}0.2$	1.0 ± 0.2	$59.6 {\pm} 6.4$	$55.0{\pm}0.9$	$42.8{\pm}1.5$	$42.4{\pm}1.5$	$65.6 {\pm} 0.7$	$95.3 {\pm} 0.2$
SCXC	7.3±0.8	$8.4{\pm}0.8$	0.7 ± 0.3	$0.7{\pm}0.3$	1.1 ± 0.3	$0.3{\pm}0.3$	65.2 ± 12.7	$62.8{\pm}13.6$	-49.3 ± 2.6	$-15.8{\pm}1.4$	40.8±3.4 -	-115.9 ± 2.7
SCXD	$6.5 {\pm} 0.6$	$7.0 {\pm} 0.6$	0.2 ± 0.2	$0.3 {\pm} 0.2$	$1.4{\pm}0.2$	$0.1{\pm}0.2$	$89.1 {\pm} 0.3$	$83.9{\pm}1.9$	$-15.1{\pm}0.7$	$13.7 {\pm} 0.6$	49.4 ± 0.8	$72.2 {\pm} 0.5$
SCYX	5.2 ± 0.7	5.9 ± 0.7	1.2 ± 0.2	1.3 ± 0.2	$1.7{\pm}0.2$	$0.5{\pm}0.2$	$83.9{\pm}2.7$	$77.6 {\pm} 5.3$	$-20.1{\pm}1.1$	$-11.3{\pm}0.7$	$35.6{\pm}1.6$	$6.3 {\pm} 0.4$
XZCY	9.2 ± 0.9	$10.6{\pm}0.9$	$2.6{\pm}0.4$	$2.6{\pm}0.4$	$0.7{\pm}0.2$	$0.9{\pm}0.2$	50.2 ± 22.7	51.3 ± 22.5	$-19.8{\pm}2.5$	$-19.1{\pm}2.4$	26.8±0.8 -	-120.5 ± 0.9
XZYD	$8.4 {\pm} 0.8$	9.0 ± 0.8	2.2 ± 2.1	2.2 ± 2.1	$1.5{\pm}0.3$	$0.1{\pm}0.3$	$74.0 {\pm} 9.7$	$72.1{\pm}10.7$	-120.9 ± 104.7	-117.4 ± 97.0	52.0±3.3 -	-121.8 ± 3.0
YNCX	6.5 ± 0.8	$6.5{\pm}0.8$	0.2 ± 0.2	$0.3 {\pm} 0.2$	1.9 ± 0.3	$0.7{\pm}0.3$	$114.4{\pm}15.6$	109.0 ± 12.7	101.9 ± 0.3	$80.2 {\pm} 0.2$	40.8 ± 2.2	$33.8{\pm}2.0$
ZHNY	$9.0 {\pm} 0.8$	9.3 ± 0.8	0.5 ± 0.2	$0.6{\pm}0.2$	$1.5{\pm}0.2$	$0.7{\pm}0.2$	100.8 ± 7.0	$96.7 {\pm} 4.4$	32.8 ± 0.8	$27.5{\pm}0.7$	21.3 ± 1.1	$-28.4{\pm}1.4$
YNJD	8.2 ± 0.9	$8.3 {\pm} 0.9$	1.3 ± 0.4	1.3 ± 0.4	2.1 ± 0.3	$0.9{\pm}0.3$	105.3 ± 12.0	101.7 ± 9.3	$87.0 {\pm} 0.5$	$83.8{\pm}1.1$	50.5 ± 1.9	$57.3 {\pm} 1.7$

2 期

(续表)		Λ	改后	4.2 ± 0.4	122.2 ± 2.4	$2.2 {\pm} 0.1$	-7.0 ± 0.7	71.7 ± 1.1	$1.7 {\pm} 0.1$	$2.1{\pm}0.1$	$-3.5 {\pm} 0.4$	-4.5 ± 0.2	108.2 ± 2.5	$37.9{\pm}1.2$	$95.1{\pm}0.7$	96.8 ± 0.3	-32.5 ± 2.7
		I	改前	$34.6{\pm}2.5$	$80.5 {\pm} 0.9$	$22.9{\pm}1.3$	$25.7\!\pm\!2.3$	$53.6{\pm}1.8$	$27.0{\pm}1.1$	$41.1{\pm}0.9$	$21.2{\pm}2.4$	$24.9{\pm}0.8$	$89.0 {\pm} 0.1$	$43.9{\pm}1.2$	67.5 ± 2.6	$73.1{\pm}0.7$	21.3 ± 2.0
	(_)/		改后	-20.4 ± 9.9	$37.0{\pm}0.6$	$6.0 {\pm} 0.2$	-8.3 ± 0.5	$99.9{\pm}1.1$	$59.7{\pm}1.1$	-26.8 ± 0.6	$41.6{\pm}2.5$	$57.8 {\pm} 0.7$	112.8 ± 2.8	48.3 ± 1.4	$-30.4{\pm}1.0$	$-12.6{\pm}0.3$	-32.5 ± 2.8
	周年相位	E	改前	$-23.9{\pm}11.3$	$29.4{\pm}0.5$	9.6 ± 0.3	-9.6 ± 0.6	104.1 ± 1.5	$63.4{\pm}1.0$	$-30.6{\pm}0.7$	49.1 ± 2.5	$63.9{\pm}0.6$	115.1 ± 3.0	$46.9{\pm}1.4$	$-39.7{\pm}1.1$	$-31.3 {\pm} 0.6$	-45.5 ± 3.1
		1	I	以后	113.2 ± 18.4	$80.5 {\pm} 4.1$	101.7 ± 7.3	89.2 ± 0.3	69.9 ± 12.1	$96.1{\pm}3.2$	96.2 ± 3.5	105.5 ± 11.8	101.5 ± 3.8	81.6 ± 3.9	84.1 ± 3.9	87.2 ± 3.1	$88.4 {\pm} 0.6$
		1	改前	$116.6 {\pm} 20.4$	$84.6{\pm}2.4$	104.8 ± 9.1	95.5 ± 2.3	$72.8{\pm}10.6$	98.5 ± 4.5	$99.2{\pm}5.2$	108.3 ± 13.7	106.5 ± 5.3	$86.0{\pm}1.9$	88.3 ± 1.1	$90.5 {\pm} 0.6$	92.2 ± 0.8	83.0±6.0
		V	改后	$0.4{\pm}0.3$	1.0 ± 0.3	1.1 ± 0.3	0.7 ± 0.3	$0.8{\pm}0.3$	1.0 ± 0.2	$0.2 {\pm} 0.2$	$1.0 {\pm} 0.4$	$0.8 {\pm} 0.2$	2.5 ± 0.4	$0.5{\pm}0.2$	$0.9{\pm}0.4$	1.3 ± 0.2	0.8 ± 0.3
			改前	1.5 ± 0.3	1.9 ± 0.3	$2.1{\pm}0.3$	1.6 ± 0.3	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.2	$1.4{\pm}0.2$	1.9 ± 0.4	1.7 ± 0.2	3.1 ± 0.4	$1.7{\pm}0.2$	2.0 ± 0.4	$2.4{\pm}0.2$	1.7 ± 0.3
	唔/mm	5	改后	1.0 ± 0.7	1.2 ± 0.1	$0.4{\pm}0.2$	$1.3\!\pm\!0.3$	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.2	$0.8{\pm}0.2$	$0.7{\pm}0.3$	$0.7 {\pm} 0.2$	3.1 ± 0.4	1.2 ± 0.2	$0.4{\pm}0.2$	0.6 ± 0.2	1.3 ± 0.3
	周年振响	F	以前	$0.9 {\pm} 0.7$	$1.1 {\pm} 0.1$	$0.3 {\pm} 0.2$	$1.2\!\pm\!0.3$	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.2	$0.8{\pm}0.2$	0.6 ± 0.3	$0.7{\pm}0.2$	3.2 ± 0.4	$1.1{\pm}0.2$	$0.5 {\pm} 0.2$	0.6 ± 0.2	1.4 ± 0.3
		L	改后	$8.3{\pm}0.9$	7.9 ± 0.7	$8.3{\pm}0.8$	5.4 ± 0.7	$6.7{\pm}0.8$	10.0 ± 0.7	9.5 ± 0.8	$8.8{\pm}0.9$	$6.5{\pm}0.6$	$6.1{\pm}0.7$	$7.6 {\pm} 0.8$	$8.6{\pm}1.1$	$9.6{\pm}0.6$	7.1 ± 0.9
		\overline{U}	改前	8.3 ± 0.9	7.4 ± 0.7	$8.2{\pm}0.8$	5.2 ± 0.7	$6.4{\pm}0.8$	$9.8{\pm}0.7$	9.3 ± 0.8	$8.7{\pm}0.9$	$6.4{\pm}0.6$	5.8 ± 0.7	7.3 ± 0.8	$8.2{\pm}1.1$	$9.3 {\pm} 0.6$	6.4 ± 0.9
			观测站	YNLC	VNLJ	YNMJ	YNML	YNMZ	YNRL	YNSD	WSNY	HTNY	NWNS	YNYA	YNYL	XNYS	YNZD

果影响较小(红色和蓝色箭头仅存在微小差异),但仍表现出系统性的变化规律,即大部分观测站的矢量长度略有增加,且沿着顺时针方向转动,意味着在进行热膨胀效应改正之后,西南地区大部分观测站在U方向的周年振幅增大,周年相位减小。CSR SH(绿色箭头)和CSR mascon(黑色箭头)的周年振幅和相位结果相对接近,因为CSR mascon进行了数据恢复等处理,所以其周年振幅较大,两者的平均值分别为5.7 mm和6.5 mm,但都小于GNSS的结果,其平均值为6.6 mm;这是由于GRACE/GRACE-FO只能监测到质量分布变化的因子,而GNSS还包含其他信号。另一方面,GNSS的周年相位平均值为92.3°,相对而言,CSR SH和CSR mascon的相位明显更大,平均值分别为112.0°和112.2°;这意味着GRACE/GRACE-FO数据求得的形变达到峰值的时间更晚。在经过热膨胀效应改正之后,GNSS数据拟合得到的平均周年振幅和相位分别为7.1 mm和86.8°,与GRACE/GRACE-FO数据求得的结果相比,其差距变得更大,所以一致性也变差。

图 4b) 展示了 *E* 方向的比较结果。相比于 *U* 方向,由原始 GNSS 数据拟合得出的周 年信号(红色箭头),其空间一致性较差,即部分相邻观测站的周年信号差别较大,并且 周年振幅明显较小。经过热膨胀效应改正之后的结果(蓝色箭头),相对于原始 GNSS 数 据结果,周年信号改变不大,结果没有表现出明显的系统性变化规律,不同观测站矢量的 长度和方向变化较小且不一致。CSR SH(绿色箭头)和 CSR mascon(黑色箭头)求得的 *E* 方向周年振幅平均值分别为 0.4 mm 和 0.5 mm,明显小于 GNSS 数据对应的 1.0 mm。 不同于 *U* 方向,*E* 方向的相位有的滞后于 GNSS,有的早于 GNSS,但从整体上看,两种 GRACE/GRACE-FO 数据求得的 *E* 方向相位的平均值分别为 43.6°和 42.2°,而 GNSS 数 据结果为 18.6°,即形变达到峰值的平均时间,同样落后于 GNSS。经过热膨胀效应改正 后,GNSS 数据的周年振幅和相位的平均值分别为 1.1 mm 和 21.2°;这意味着周年振幅与 GRACE/GRACE-FO 的差距略有增大,但周年相位变得更加接近。

图 4c) 展示了 N 方向的结果。类似于 U 方向,原始 GNSS 数据拟合得到的周年信号结果(红色箭头)也表现出空间一致性,即相邻观测站的周年信号接近。然而,经过热膨胀效应改正后的结果(蓝色箭头),与原始 GNSS 数据结果相比,发生了显著的变化,表现出系统性的变化规律,即周年振幅明显减小,且大多数观测站相位也同样减小。与 U 和 E 方向类似,CSR SH (绿色箭头)和 CSR mascon (黑色箭头)计算拟合得到的结果,其周年振幅平均值都为 1.0 mm,明显小于原始 GNSS 数据的结果,其平均值为 1.7 mm。相位方面,两者平均值均滞后于 GNSS,分别为 95.1°和 95.5°,而 GNSS 的平均相位为 44.3°。经过热膨胀效应改正后,GNSS 数据拟合得到的周年振幅和相位平均值分别为 0.7 mm 和 30.9°。尽管周年振幅值与 GRACE/GRACE-FO 较接近,但周年相位差距明显增大。

N 方向周年信号的变化远比 *U* 和 *E* 方向剧烈,是因为冬季南半球温度高,北半球温度 低,受到温度梯度的影响,地表南北方向的运动表现为向北移动,所以其相位大约分布在冬 季^[13]。而中国西南地区的 GNSS 观测站受局部质量变化影响,*N* 方向的负荷形变相位同样 也是在冬季前后,所以两种因素叠加会使得总形变更大,且 *N* 方向的热弹性形变在西南地 区相对较大,是 GNSS 形变的主要因素,所以 GNSS 在扣除热膨胀效应之后,变化明显。

表 4 展示了研究区域内的观测站三维形变时间序列的平均周年振幅和相位,包括 GNSS



注: a)、b)、c) 分别为 U、E、N 方向周年振幅、相位对比。红色矢量代表的是由 GNSS 数据直接拟合得到的周年振幅和相位,蓝色矢量代表的是由 GNSS 数据减去对应的热弹性形变时间序列之后拟合得到的周年振幅和相位,绿色矢量和黑色矢量分别代表的是由 CSR SH 数据和 CSR mascon 数据计算并拟合得到的周年振幅和相位。矢量的长短表示周年振幅的大小,矢量的方向表示时间序列周年变化达到极大值时所在的月份,向右表示 12 月底,向上表示 3 月底,逆时针依次增大,周年振幅和相位的具体计算见图 1 描述。



原始形变、基岩热弹性形变、热膨胀效应改正后的 GNSS 形变以及由 CSR SH 和 CSR mascon 数据计算得到的形变。表4显示,GNSS 数据在热膨胀效应改正前,U 方向 GNSS 周年振幅明显大于热弹性形变周年振幅,且前者的相位超前了 120° 左右;E 方向 GNSS 周年振幅也远大于热弹性形变周年振幅,前者相位和后者相差 190° 左右,即接近相反;而 N 方向 GNSS 周年振幅与热弹性形变周年振幅差别并不大,且相位基本相同。在热膨胀效应改正后,U 方向的 GNSS 周年振幅略有增大,周年相位略有减小,与 GRACE/GRACE-FO 的结果差值也略微变大。而E 方向的 GNSS 周年振幅和相位都略有增大,但周年相位精度较差,与 GRACE/GRACE-FO 的周年振幅差距增大,周年相位则更接近。而N 方向的GNSS 周年振幅和相位都明显变小,尽管周年振幅与 GRACE/GRACE-FO 的结果更接近,但周年相位差值明显变大。

粉捉	l	J		Ε	Ν	Ν			
女人1/凸	平均周年	平均周年	平均周年	平均周年	平均周年	平均周年			
	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)			
GNSS	$6.6{\pm}0.7$	$92.3{\pm}8.3$	$1.0 {\pm} 0.4$	$18.6{\pm}17.0$	$1.7{\pm}0.3$	$44.3 {\pm} 1.8$			
热弹性形变	0.8	216.3	0.2	210.0	1.2	45.1			
GNSS(热膨胀 效应改正后)	$7.1 {\pm} 0.7$	86.8 ± 8.1	$1.1 {\pm} 0.4$	21.2 ± 15.7	$0.7 {\pm} 0.3$	$30.9 {\pm} 1.6$			
CSR SH	$5.7 {\pm} 0.2$	$112.0{\pm}1.1$	$0.4{\pm}0.1$	$43.6{\pm}0.1$	$1.0{\pm}0.1$	$95.1{\pm}0.0$			
CSR mascon	$6.5 {\pm} 0.2$	$112.2{\pm}1.3$	$0.5{\pm}0.1$	$42.2 {\pm} 0.1$	$1.0 {\pm} 0.1$	$95.5{\pm}0.0$			

表 4 不同数据的周年振幅和周年相位平均值

为了详细研究热膨胀效应的影响,选取*U、E、N*方向各一个观测站作为代表,进行更深入的分析。

图 5a) 展示了 SCSP 观测站 U 方向的形变时间序列。GNSS 时间序列(黑色折线)和 热弹性形变时间序列(绿色折线)的周年振幅分别为 3.5 mm 和 1.5 mm,相位分别为 59.6° 和 224.1°。将两者相减得到的时间序列(青色折线),其周年振幅明显增大,为 5.0 mm,而 相位略有减小,为 55.0°,这个结果也可以从图 4a)中观测得到。CSR SH 数据(蓝色折线) 和 CSR mascon 数据(红色折线)拟合得到的周年振幅分别为 3.1 mm 和 4.0 mm。可以看 出,GNSS 原始数据拟合得到的周年振幅小于 CSR mascon 的结果,而经过热膨胀效应改 正后,GNSS 数据的结果比 CSR SH 和 CSR mascon 的都大。同时,CSR mascon 相对于 GNSS 的周年振幅减少率也都从负值变成正值。此外,CSR SH 和 CSR mascon 的*RMS* 减 少率也都得到了提升,但相关系数都略有下降,表明经过热膨胀效应改正后,GNSS 形变与 GRACE/GRACE-FO 形变的符合程度,与采用的 GRACE/GRACE-FO 数据种类和选择的 比较参量有一定关系,因此在评估热膨胀效应的影响时,需要同时考虑这些因素。

根据魏娜等人^[12]的计算,北半球 U 方向热弹性形变峰值在夏季附近,谭伟杰等人^[13]计 算的中国大陆热弹性形变的相位是在七八月份,而对于中国西南地区观测站的 U 方向 热弹性形变,本文计算得到的相位平均值为 216.3°,与其结论相符。但魏娜等人计算得



注: a) SCSP 观测站的 U 方向形变时间序列; b) SCNC 观测站的 E 方向形变时间序列; c) LHAZ 观测站的 N 方向形变时间序列。黑色的折线表示的是原始的 GNSS 数据,青色的折线表示的是 GNSS 经过热膨胀效应 改正之后的数据,绿色的折线表示的是观测站所在位置对应的热弹性形变的时间序列,蓝色和红色的折线表示的 则是由 CSR SH 和 CSR mascon 数据推导出来的负荷形变时间序列。



到的北半球负荷形变也是在夏季达到峰值,因此负荷形变和热弹性形变的叠加形变更 大,与之相同,谭伟杰等人计算的中国大陆 GRACE 和热弹性形变叠加的周年振幅平均 值,也要比单独利用 GRACE 计算的形变振幅平均值要大,约大了 0.6 mm。然而,本文 利用 GRACE/GRACE-FO 数据计算得到的中国西南地区负荷形变相位平均值为 112.0° 左 右,其与热弹性形变达到峰值的相位差了 104° 左右,两者综合的形变反而小于单独利用 GRACE/GRACE-FO 数据得到的结果,与魏娜和谭伟杰的结论不符,主要原因还是西南地 区相对于整个北半球和中国大陆的大尺度范围,其受局部因素影响较大。值得注意的是,用 于安装 GNSS 观测站天线的水泥墩或金属杆,同样也会受到热膨胀效应的影响,进而引起 垂直方向的形变,本文与魏娜、谭伟杰的计算都暂未考虑其影响。GNSS 形变同时包含负荷 形变和热弹性形变的影响,而西南地区 U 方向的 GNSS 形变的影响,因此,在扣 除热膨胀效应的影响之后,中国西南地区 U 方向的 GNSS 形变的周年振幅反而会有所增大, 相位会减小,从图 5a)也能观测到这一点。这就导致周年振幅减少率下降,但考虑到热弹性 形变相对于 U 方向的形变较小,所以整体影响不大,RMS 减少率和相关系数也只是略微 减小。这些结果说明热膨胀效应对于中国西南地区 U 方向的 GNSS 形变结果的影响较小, 其主要受负荷形变的影响。

图 5b) 展示了 SCNC 观测站 E 方向的形变时间序列。原始 GNSS 时间序列(黑色折线)的周年振幅和相位分别为 0.4 mm 和 5.1°,而热弹性形变时间序列(绿色折线)的周年振幅和相位分别为 0.3 mm 和 209.2°,可以观测到两者的相位差别较大,在扣除热膨胀效应 之后,GNSS 形变时间序列(青色折线)的周年振幅和相位都有所增大,分别变为 0.7 mm 和 15.1°。CSR SH(蓝色折线)和 CSR mascon(红色折线)数据的周年振幅都为 0.4 mm, 与原始 GNSS 数据的结果大小相同,而相位分别为 34.8°和 54.1°。因此,经过热膨胀效应 改正后的 GNSS 数据的周年振幅值要大于 GRACE/GRACE-FO 的结果,并且周年相位也 更加接近。尽管周年振幅减少率略有减小,但是 RMS 减少率和相关系数有所提升。

图 5c) 展示的是 LHAZ 观测站 N 方向的形变时间序列。与U 和 E 方向不同,GNSS (黑色折线)与热弹性形变(绿色折线)的周年振幅和相位都更加接近,两者的周年振幅分别为 2.1 mm 和 1.4 mm,相位分别为 43.5°和 43.9°。经过热膨胀效应改正后,GNSS 数据 (青色折线)的周年振幅明显减小,周年相位略微减小,分别变为 0.7 mm 和 42.8°。CSR SH (蓝色折线)和 CSR mascon (红色折线)的周年振幅分别为 1.3 mm 和 1.5 mm,周年相位 分别为 87.4°和 81.3°,因此,这两个 GRACE/GRACE-FO 数据的周年振幅要大于热膨胀效 应改正之后的 GNSS 数据的结果,而且相位差距也都变得更大,所以 GRACE/GRACE-FO 数据相对于 GNSS 数据的周年振幅减少率、*RMS*减少率和相关系数都明显减小。

4 总结与展望

热弹性形变是地表形变周年信号中的一个重要组成部分。前人的研究主要侧重于垂直 方向,并采用半无限空间的热弹性形变模型。本文基于 Fang 等人^[10]提出的地心静止约束条 件下球形空间的地表三维热弹性形变理论,针对地表周年形变较大的中国西南区域,定量计 算热膨胀效应对该区域地表三维形变的贡献,并分析研究其对负荷形变的影响。

选择位于中国西南地区的 39 个陆态网观测站,计算并拟合了 U、E、N 方向的热弹性 形变在对应观测站位置的时间序列。结果显示,其周年振幅平均值分别为 0.8 mm、0.2 mm、 1.2 mm,周年相位平均值分别为 216.3°、210.0°、45.1°;同时,对 GNSS 在 U、E、N 方 向的观测数据进行拟合,得到的周年振幅平均值分别为 6.6 mm、1.0 mm、1.7 mm,周年 相位平均值分别为 92.3°、18.6°、44.3°。可以看出,在周年振幅方面,U 方向和 E 方向的 GNSS 总形变明显大于热弹性形变,而在 N 方向两者则相差不大;在周年相位方面,U 方 向和 E 方向的 GNSS 总形变与热弹性形变相位差较大,而 N 方向相位较为接近。

将 GNSS 时间序列减去相应的热弹性形变时间序列,并再次进行拟合,得到热膨胀效应改正后 U、E、N 方向的周年振幅平均值分别为 7.1 mm、1.1 mm、0.7 mm,周年相位平均值分别为 86.8°、21.2°、30.9°。拟合结果表明,在减去热弹性形变时间序列后,U 方向和 E 方向的周年振幅略微增大,N 方向的振幅明显减小。值得注意的是,U 方向结果与先前研究结果存在不一致^[12,13],之前的结果显示北半球负荷形变和热弹性形变相位接近,两者为 叠加效应,然而本研究结果表明,在中国西南地区,两者存在较大的相位差异。上述结论表明不同区域的热膨胀效应及负荷效应可能存在显著差异,在分析热膨胀效应对不同方向的 负荷形变影响时应格外注意。

此外,为评估热膨胀效应的影响,分别计算了 GNSS 形变数据在扣除热膨胀效应前后,由 CSR SH 和 CSR mascon 数据计算的负荷形变时间序列相对于 GNSS 的 3 个参量,即 RMS 减少率、周年振幅减少率、相关系数,经过热膨胀效应改正后:

(1) 在 U 方向, CSR SH 结果的平均值分别减小 0.9%、 6.8%、 0.007; 而 CSR mascon 的结果分别减小 0.9%、 5.8%、 0.006。

(2) 在 *E* 方向, CSR SH 结果的平均值分别增大了 1.0%、5.7%、0.034; 而 CSR mascon 的结果分别增大了 0.9%、7.5%、0.035。

(3) 在 N 方向, CSR SH 结果的平均值分别减小 9.6%、175.9%、0.205; 而 CSR mascon 的结果分别减小 10.1%、191.7%、0.203。

3 个参量的对比结果表明, GNSS 形变经过热膨胀效应改正后, GRACE/GRACE-FO 形变和 GNSS 形变在 U 方向的一致性略微下降, E 方向的一致性有一定的提升, 而 N 方 向的符合程度则明显减弱。导致该结果的原因有 2 个: (1) 相较垂直方向, 水平方向整体周 年信号弱, 其噪声水平大于热膨胀效应的幅度, 同时, 数据本身可能还包含其他地球物理信 号 (如孔隙弹性形变、构造运动等); (2) 本文应用的热弹性形变模型为全球模型, 其在区 域的计算精度可能存在不足。目前, 本文定量计算的水平方向热弹性形变, 尚无其他有效 理论模型进行对比验证, 其在局部准确度方面还有待进一步优化。此外, 本文忽略了 GNSS 基座的热膨胀效应, 其对垂直方向的形变影响留待后续工作讨论。

致谢

本研究得到中国科学院上海天文台超级计算平台支持。

参考文献:

- [1] 胡友健, 梁新美, 许成功. 测绘科学, 2006, 5: 155
- [2] Farrell W E. Reviews of Geophysics, 1972, 10(3): 711
- [3] Yan H, Chen W, Zhu Y, et al. Geophys Res Lett, 2009, 36(13): 1
- [4] 许雪晴, 方明, 董大南, 等. 天文学进展, 2020, 38(2): 209
- [5] Berger J. JGR, 1975, 80(2): 274
- [6] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. JGR, 2002, 107(B4): ETG 9-1
- [7] 闫昊明, 陈武, 朱耀仲, 等. 地球物理学报, 2010, 53(4): 825
- [8] 姜卫平, 王锴华, 邓连生, 等. 测绘学报, 2015, 44(5): 473
- [9] 贾路路, 王阅兵, 连尉平, 等. 测绘学报, 2018, 47(7): 899
- [10] Fang M, Dong D, Hager B H. Geophysical Journal International, 2014, 196: 194
- [11] Xu X, Dong D, Fang M, et al. GPS Solutions, 2017, 21(3): 1265
- [12] 魏娜, 施闯, 刘经南. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3080
- [13] 谭伟杰, 许雪晴, 董大南, 等. 测绘学报, 2017, 46(9): 1080
- [14] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. Science, 2006, 305(5683): 503
- [15] Wahr J, Swenson S, Velicogna I. JGR, 2006, 33(6): 1
- [16] Rowlands D D, Luthcke S B, Klosko S M, et al. Geophys Res Lett, 2005, 32(4): 1
- [17] Save H, Bettadpur S, Tapley B D. JGR, 2016, 121(10): 7547
- [18] Van Dam T, Wahr J, Lavallée D. JGR, 2007, 112(B3): 1
- [19] Tregoning P, Watson C, Ramillien G, et al. Geophys Res Lett, 2009, 36(15): 1
- [20] Tsai V C. JGR, 2011, 116(B4): 1
- [21] 王敏, 沈正康, 董大南. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1045
- [22] Wang W, Zhao B, Wang Q, et al. Advances in Space Research, 2012, 49: 943
- [23] Loomis B D, Rachlin K E, Wiese D N, et al. Geophys Res Lett, 2020,47(3): 1
- [24] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 266: 140
- [25] Swenson S, Wahr J. Geophys Res Lett, 2006, 33(8): 1
- [26] Peltier W R, Argus D F, Drummond R. JGR, 2018, 123(2): 2019
- [27] Sun Y, Riva R, Ditmar P. JGR, 2016, 121(11): 8352
- $\left[28\right]$ Swenson S, Chambers D, Wahr J. JGR, 2008, 113 (B8): 1
- [29] Loomis B D, Rachlin K E, Luthcke S B. Geophys Res Lett, 2019, 46(12): 6149
- [30] 张岚, 孙文科. 地球与行星物理论评, 2022, 53(01): 35
- [31] Kusche J, Schrama E J O. JGR, 2005, 110(B9): 1

WANG Peng-fei^{1,2}, WANG Song-yun³, LI Jin^{1,2}, QI Zhao-xiang^{1,2}

 (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Center for Space Research, University of Texas at Austin, Austin 78759, USA)

Abstract: The annual signals in the Global Navigation Satellite System (GNSS) surface deformation time series include not only load deformation but also thermal expansion caused by the change of Earth's surficial temperature. Using a global three-dimensional thermoelastic deformation model, the thermal expansion effects of 39 crustal movement observation network of China (CMONOC) stations in the U, E, and N directions in southwestern China are estimated. Then the consistency between GNSS time series (before and after correcting thermal expansion effects) and load deformation derived from satellite gravity observations is analyzed, by comparing GNSS results with the calculations from Gravity Recovery and Climate Experience (GRACE) and GRACE Follow-On (GRACE-FO). After correcting for thermal expansion effects, the results indicate that the correspondence between the vertical component (U direction) of GNSS and the GRACE/GRACE-FO results is slightly weakened. On the horizontal component, the consistence in the E direction improves to some extent, but there exists a significant decrease in the N direction. The results presented in this paper in the southwest region are inconsistent with existing global or large-scale regional studies, indicating that the accuracy of estimating thermal expansion effects in different regions by using global thermoelastic deformation models needs to be further evaluated, and its impact on three-dimensional surface deformation is also worth further in-depth research.

Key words: thermal expansion; load deformation; GNSS; GRACE; GRACE-FO