



引文格式:李婉秋,郭秋英,章传银,等.利用独立成分分析法研究新疆地区陆地水储量及其地壳垂向变化[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):794-804.DOI:10.13203/j.whugis.20220573

Citation:LI Wanqiu, GUO Qiuying, ZHANG Chuanyin, et al. Terrestrial Water Storage and Crustal Vertical Variation in Xinjiang Region, China Using Independent Component Analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(5): 794-804. DOI:10.13203/j.whugis.20220573

利用独立成分分析法研究新疆地区陆地水储量及其地壳垂向变化

李婉秋¹ 郭秋英¹ 章传银² 王伟² 钟玉龙³ 李伟⁴ 徐鹏飞⁵

¹ 山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南, 250101

² 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

³ 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉, 430074

⁴ 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州, 730070

⁵ 山东理工大学建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博, 255000

摘要:中国新疆地区水文气候变化复杂,其水储量变化及其负荷形变特征的精确提取极为重要。采用卫星重力数据GRACE(gravity recovery and climate experiment)反演新疆地区2010—2014年陆地水储量变化,利用独立成分分析法(independent component analysis, ICA)分解时空模式,提取时空特征信号。在此基础上,反演陆地水负荷迁移引起的地壳垂向变化,引入重力位系数与负荷勒夫数一阶项改正,回加非潮汐大气与海洋信号,结合尺度因子法校正GRACE反演结果,引入全球降水气候计划月降水资料分析形变影响,将其与测区12座连续运行参考站形变位移进行定量比较,重点分析各测站陆地水负荷信号与全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)垂直位移的相关关系。结果表明,经ICA方法分解的新疆地区陆地水储量呈现多时间尺度特征,表现为明显的周年与长期变化;周年信号在西部帕米尔高原附近尤为显著;长期变化以逐年减少为主,在乌鲁木齐西部、天山一带信号较强;总体上,陆地水负荷垂直形变的时间序列波动幅度相对较小,幅值为 $-1.5\sim 1.5$ mm,与WGHM(WaterGAP global hydrology model)模型结果比较一致;形变时序与降水量变化除了存在明显的时间滞后之外,总体趋势相吻合;经非潮汐大气与海洋信号(non-tidal atmospheric and ocean model, GAC)改正后,GRACE结果与GNSS垂直位移的相关程度有所提升,各测站相关系数为0.63~0.91,加权均方根误差达16.18%~58.97%,相位延迟约为0.5~2个月。该研究方法可揭示新疆地区更为精细的水文信号特征,为区域参考框架精确维护提供重要技术支持。

关键词:独立成分分析法;GRACE;全球导航卫星系统;陆地水储量;地壳垂向变化

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-12

DOI:10.13203/j.whugis.20220573

文章编号:1671-8860(2024)05-0794-11

Terrestrial Water Storage and Crustal Vertical Variation in Xinjiang Region, China Using Independent Component Analysis

LI Wanqiu¹ GUO Qiuying¹ ZHANG Chuanyin² WANG Wei² ZHONG Yulong³
LI Wei⁴ XU Pengfei⁵

¹ School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

² Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China

³ School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

⁴ Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

⁵ School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

Abstract: Objectives: In recent years, the climate change in Xinjiang region, China is complex. It is of great significance to study the terrestrial water storage (TWS) and its load deformation for the accurate maintenance

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2022QD025);山东建筑大学博士科研基金(X20086Z0101)。

第一作者:李婉秋,博士,讲师,主要从事卫星重力与GNSS应用方面的研究。24106@sdjzu.edu.cn

通讯作者:郭秋英,博士,教授。qyguo@sdjzu.edu.cn

of the regional reference frame. **Methods:** The satellite gravity data GRACE (gravity recovery and climate experiment) was used to invert the changes of land water storage in Xinjiang region from 2010 to 2014, and the independent component analysis was used to decompose it into spatiotemporal models, and the spatial characteristics of multiple time scales were analyzed. On this basis, the correction on the first-order of gravity potential coefficient and load Love number is carried out, the correction of the non-tidal atmospheric and ocean model (GAC) from GRACE is introduced to obtain the vertical change of the crust caused by the migration of the land water load. The GRACE inversion results are corrected by scale factor method derived from WaterGAP global hydrology model (WGHM). The influence of deformation is analyzed by introducing monthly precipitation data from global precipitation climatology project. And the deformation displacements of the 13 continuously operating reference system stations in the survey area are quantitatively compared. The correlation between TWS load signal of each station and the annual vertical displacement of global navigation satellite system (GNSS) is analyzed. **Results:** The results show that TWS in Xinjiang region presents multi-time scale characteristics, with obvious annual variation and long-term trend. The annual change is particularly significant near the western Pamirs Plateau, and the trend term is reflected in the long-term decrease year by year. The signal is relatively strong in the western Urumqi and Tianshan Mountains. In general, the change of land water load causes the vertical displacement of the crust in the study area, and the time series shows a small fluctuation with an amplitude of $-1.5-1.5$ mm, which is consistent with the deformation results of WGHM model. In addition to the obvious time lag, the time series of TWS load deformation and precipitation change are consistent with the overall trend. After GAC correction, the consistency between GRACE results and GNSS vertical displacement was enhanced, and the correlation coefficient and weighted root mean square (WRMS) were significantly improved. The correlation coefficient of each station was 0.63–0.91, and WRMS was 16.18%–58.97%. **Conclusions:** The research method in this paper can reveal more detailed hydrological signal characteristics in Xinjiang region, and the research results can provide important technical support for accurate maintenance of regional reference frame.

Key words: independent component analysis (ICA); gravity recovery and climate experiment (GRACE); global navigation satellite system (GNSS); terrestrial water storage (TWS); crustal vertical deformation

水资源变化是国家经济和社会发展最关心的重点问题之一。陆地水量变化的特征提取与精确分析可服务于水资源利用、环境与灾害研究。研究陆地水储量及其负荷形变可有效揭示陆地水循环与地表过程耦合机理,有助于提高地球参考框架动态维持的精度和稳定性^[1]。

在重力卫星 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 发射之前,研究陆地水储量变化主要依赖于传统的水文观测站和陆地水文模型^[2]。GRACE 重力卫星作为探测质量变化的有效手段,在监测全球和区域水储量变化方面得到广泛应用。由于地表水循环、冰盖消融、地下水升降等现象的存在,导致地球质量局部迁移,从而引起地球重力场分布随之改变,同时引起地壳产生负荷形变。近些年,GRACE 重力卫星监测区域陆地水负荷形变的研究屡见不鲜,如华北地区^[1-2]、沙特中部^[3]、底格里斯群岛^[4]、南格陵兰岛^[5]、云南地区^[6]、澳大利亚大陆^[7]等。

关于 GRACE 监测地表形变的研究,有学者

发现 GRACE 监测的亚马逊流域水负荷垂直形变与全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)数据一致性较好。但是这种一致性并非适用所有水文条件,尤其是在水文信号薄弱区域其一致性较弱^[8]。van Dam 等^[9]指出这种不一致性主要归因于 GNSS 数据处理误差。Tregoning 等^[10]认为改进 GNSS 数据处理模型和方法,可提升其与 GRACE 监测结果的相关性。此外,也有部分学者将 GNSS 台站热膨胀效应考虑在内^[11]。Zhang 等^[13]利用尼泊尔地区 GRACE 与 GNSS 形变数据探讨了二者周年信号的相关性。从本质上讲,GRACE 与 GNSS 在空间分辨率上具有很大不同,这也是导致二者监测结果具有差异性的重要因素。可见,这些研究多数侧重于对区域信号的地球物理解释,而对于监测结果的时空特征精确提取与分析缺乏有效的信号分解过程。目前,用于信号分解的方法主要包括经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)、小波分析、奇异谱分析等。EOF 方法的数学机理涉

及到不相关与正交性假设,分解得到的信号成分存在不确定性,而小波分析方法主要受限于小波基的选取,奇异谱分析方法则适用于研究非线性时间序列。独立成分分析法(independent component analysis,ICA)作为一种有效的统计方法,在图像处理与特征提取、盲源信号分离以及GNSS多路径效应改正、地震数据分离识别等领域应用广泛。本文以中国新疆地区为例,将ICA方法用于提取GRACE反演的陆地水储量及其负荷垂直形变,目的是将新疆地区陆地水储量变化进行多时间尺度分析,挖掘更为精细的水文信号及形变特征,从而为区域高程基准框架的精确维持提供重要技术支持,对大地测量基准精化具有重要的现实意义。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

1)GRACE数据

本文选用2010—2015年GRACE RL06 Level-2月重力场模型反演研究区陆地水储量及其负荷垂直形变^[14-15],选用60阶大地水准面球谐模型(geoid spherical harmonic model,GSM)。该模型已扣除固体潮、海潮、极潮、非潮汐大气与海洋影响,以及太阳和月球等天体引起的重力扰动。数据可从美国空间研究中心(Center for Space Research,CSR)官网下载获取。针对重力场模型高阶噪声,本文采用 P_3M_{15} 去相关滤波结合扇形滤波进行降噪处理。此外,GSM数据一阶项采用Sweason结果代替^[16], C_{20} 值则采用CSR发布的TN11文件中对应的 C_{20} 替换^[17]。时间基准为所有月份均值,缺失数据由相邻月份数值线性插补^[18]。此外,还需对GRACE反演公式中的一阶负荷勒夫数进行转换。

2)GNSS数据

限于GNSS数据获取问题,本文仅采用新疆地区12座连续运行参考站(continuously operating reference system,CORS)有限的2010—2014年时段数据进行对比分析。数据处理主要利用GAMIT/GLOBK软件完成,通过求解各测站逐日GNSS观测数据,得到测站和卫星轨道的单日区域松弛解。然后对解算后的全部测站数据采用GLOBK软件平差处理,从而得到站点的三维坐标时间序列,所属框架为ITRF2014。使用IERS 2010协议,去除固体潮、潮汐海洋与大气信号。本文选取GNSS站点大地高时序与GRACE结果进行对比分析,回加非潮

汐大气与海洋信号(non-tidal atmospheric and ocean model,GAC)和GNSS比较的目的是保证二者在对比时具有相同的背景场,增强可对比性。GNSS坐标时序中包含非潮汐大气和海洋信号,而GRACE的GSM数据并未包含此信号,因此可对GRACE反演的形变结果回加GAC负荷影响^[5,13]。为了方便,选择对GRACE的GSM数据直接回加GAC负荷影响。在此之前应对GNSS日值序列进行降噪以及月平均,以此统一二者的时间分辨率。对于GNSS大地高序列的粗差与数据缺失问题,采用奇异谱分析方法分别处理。新疆地区12座CORS站名及对应概略坐标如表1所示,研究范围为72°E~98°E、32°N~50°N。

表1 新疆地区12个CORS站及其位置坐标

Tab.1 The Names and Location Coordinates of 12 CORS Stations in Xinjiang Region

测站名	概略坐标	测站名	概略坐标
XJBC	78.77°E,39.81°N	XJBE	86.85°E,47.69°N
XJDS	84.88°E,44.31°N	XJFY	89.53°E,46.99°N
XJHT	79.04°E,37.16°N	XJJJ	94.33°E,42.84°N
XJML	90.29°E,43.80°N	XJQH	90.97°E,46.15°N
XJSH	86.10°E,44.20°N	XJSS	90.25°E,42.89°N
XJTZ	83.65°E,38.96°N	XJWQ	80.99°E,44.96°N

3)全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system,GLDAS)数据

GLDAS全球水文模型由美国航天局联合国家环境预报中心建立,该模型反映了地球表面土壤水、冰雪、植被含水量等参数的月变化(下载网址为<https://mirador.gsfc.nasa.gov/>)。模型的空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间跨度与GRACE数据相同,包含4种地面模式,分别为Noah、VIC(the variable infiltration capacity)、CLM(the community land model)、Mosaic。鉴于Noah模式的GLDAS水文模型被广泛使用,本文采用V2.1的Noah陆地表面模型,以此计算土壤水、冰雪以及植被含水量等综合引起的研究区地表负荷垂直形变。

4) WaterGAP 全球水文模型(WaterGAP global hydrology model,WGHM)数据

WGHM数据属于月值全球陆地水文模型(2.2c),包含地表水与地下水等成分。该模型来自于德国法拉克福大学自然地理研究所,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,所研制的模型由月时序参数以及气候和地理数据综合构建^[19]。本文采用2011—2024年WGHM陆地表面模型计算陆地水储量

变化引起的研究区地表负荷垂直形变,对 GRACE 反演结果进行对比分析。

5) 全球降水气候计划(global precipitation climatology project, GPCP)数据

GPCP 数据来自于全球降水气候研究中心,数据集集成数十颗静止卫星和极轨卫星的微波和红外资料构建而成,通过全球多个实测台站数据进行校正,得到全球卫星降水产品。本文选用第 4 版本模型数据,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间跨度与 GRACE 数据相同,每月一值,下载网址为 <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html>。

1.2 研究方法

1.2.1 ICA 方法

本文利用 2010—2015 年 72 个月地球重力场模型反演新疆地区陆地水储量变化空间格网,可假设地球重力场模型个数为 N ,每个月结果空间格网点数量为 l ,格点数取决于采用的研究区数字高程模型空间分辨率,构建矩阵 M 为^[20-23]:

$$M_{l \times N} = [M_1 M_2 M_3 \cdots M_l] \quad (1)$$

式中, M_i 表示每个空间格点对应的 N 个月水储量变化时间序列。该矩阵用 EOF 分解为:

$$M_{l \times N} = PE^T \quad (2)$$

式中, E 表示矩阵 M 的特征向量,并进行归一化处理,保持与特征值大小顺序相同的方式进行空间信号降序排列; P 表示分解而成的主成分,即 N 个月时间序列数值大小。

ICA 方法可理解为 EOF 法的扩展形式,能够将 EOF 法分解的时空信号尽可能变换成相互独立的成分。经矩阵变换可表示为:

$$M_{l \times N} = P_j R_j R_j^T E_j^T = U_{l \times j} S_{j \times N}^T \quad (3)$$

式中, U 表示源信号矩阵; S 表示混合矩阵; j 表示需要进行旋转变换的时空信号数量; R 表示正交旋转矩阵,由矩阵联合近似对角化方法求解。

1.2.2 GRACE 反演方法

GRACE 监测区域质量负荷变化引起的地壳垂直形变可依据地球弹性负荷形变理论,利用下式可定量表示为:

$$dr(\theta, \lambda) = \frac{3}{\rho_e} \sum_{n=0}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \frac{h'_n}{2n+1} \cdot P_{n,m}(\cos\theta) \cdot W_n \cdot W_m \cdot (\Delta C_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm} \cdot \sin(m\lambda)) \quad (4)$$

式中, $dr(\theta, \lambda)$ 为地面点 (θ, λ) 产生的垂直位移; $P_{n,m}(\cos\theta)$ 为完全规格化缔合勒让德函数; h'_n 为阶数为 n 的负荷勒夫数; ΔC_{nm} 、 ΔS_{nm} 为经去相关滤波但未进行扇形滤波处理的 GSM 重力位系数变化

值; W_n 、 W_m 为扇形滤波核函数^[24],本文选取组合滤波法去除条带。

为了定量评定 GRACE 与 GNSS 监测结果的相关关系,并验证 GRACE 反演结果的可靠性,采用相关系数、加权均方根(weighted root mean square, WRMS)、振幅与相位 4 种指标进行对比分析。其中, WRMS 可用如下公式定量计算^[10,13,25]:

$$WRMS_{\text{reduction}} = \frac{WRMS_{\text{GNSS}} - WRMS_{\text{GNSS} - \text{GRACE}}}{WRMS_{\text{GNSS}}} \quad (5)$$

式中, $WRMS_{\text{GNSS}}$ 表示 GNSS 垂向位移的加权均方根; $WRMS_{\text{GNSS} - \text{GRACE}}$ 表示从 GNSS 垂向位移中扣除 GRACE 结果之后的加权均方根; $WRMS_{\text{reduction}}$ 表示从不同 GNSS 测站垂直位移序列中扣除对应地面点的 GRACE 结果前后加权均方根的减小比例,也就是 GRACE 结果对于 GNSS 垂直位移的减小比值。

1.2.3 一阶负荷勒夫数转换

GRACE 与 GNSS 监测归属于两种不同的地球参考框架,前者为地球质心参考框架(center of mass of the earth system, CM),后者为固体地球外壳形状中心(center of figure of solid earth, CF)。为保证在相同的背景场下定量评估 GRACE 反演结果的可靠性,需要对二者参考框架进行转换与统一。替换一阶重力位系数与负荷勒夫数是转换的重要环节。GRACE 重力位系数一阶项前文已做处理,因此,本文重点给出 CM 转换为 CF 框架下的一阶负荷勒夫数转换过程。

Farrell^[26]对 CE 框架下的一阶负荷勒夫数 h'_1 、 l'_1 、 k'_1 定量表示为:

$$\begin{cases} [h'_1]_{\text{CE}} = -0.290 \\ [l'_1]_{\text{CE}} = 0.113 \\ [1 + k'_1]_{\text{CE}} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Blewitt^[27]利用地表负荷位移格林函数积分运算,得到 CF 框架下一阶负荷勒夫数相对固体地球 CE 框架的转换关系:

$$\begin{cases} [h'_1]_{\text{CF}} = \frac{2}{3} [h'_1 - l'_1]_{\text{CE}} \\ [l'_1]_{\text{CF}} = -\frac{1}{3} [h'_1 - l'_1]_{\text{CE}} \\ [1 + k'_1]_{\text{CF}} = \left[1 - \frac{1}{3} h'_1 - \frac{2}{3} l'_1 \right]_{\text{CE}} \end{cases} \quad (7)$$

因此,可进一步获得 CM 转换至 CF 框架的一阶负荷勒夫数转换公式:

$$\begin{cases} [h'_1]_{CF} = \frac{2}{3}[h'_1 - l'_1]_{CM} \\ [l'_1]_{CF} = -\frac{1}{3}[h'_1 - l'_1]_{CM} \\ [1 + k'_1]_{CF} = \left[-\frac{1}{3}h'_1 - \frac{2}{3}l'_1\right]_{CM} \end{cases} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 ICA方法分解结果与分析

以新疆地区作为研究区域,对GRACE反演的水储量变化数据进行分析,此时的数据已做中心化处理。如何选取主成分个数是ICA方法提取信号的关键环节。首先,利用中心化数据基于ICA方法原理构建自协方差矩阵;其次,对构建的自协方差矩阵进行对角化;再次,将特征值分解法得到的特征值由大到小排序,如图1所示;最后,根据各主成分占总能量百分比选取时空模式成分个数。可以发现,第1个特征值占比最高,第2~6个特征值占比分别为21.3%、8.7%、5.8%、4.0%、2.1%。前6个成分信号占比约为95.3%,即含有区域水储量变化95.3%左右的主要信息,可解释水储量变化情况,第7个之后的分量信号占比较小,可不予考虑。因此,

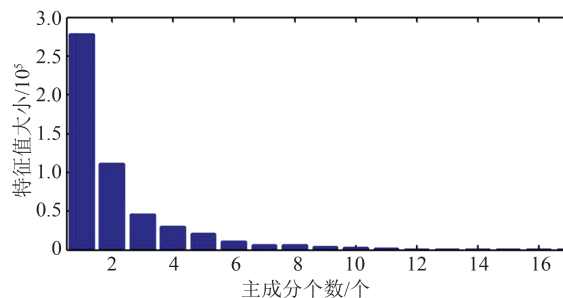


图1 ICA分解得到的前10个特征值

Fig. 1 The First 10 Eigenvalues Obtained by ICA Decomposition

本文仅对前6个时空模式成分进行特征分析。

利用ICA方法对GRACE反演的研究区陆地水储量变化进行模式分解,提取时空信号特征(已做归一化处理),分别如图2、图3所示,6个主成分时空模式图按照特征值占比由大到小排列。图2时间模式图单位无量纲,无实际物理意义,仅表示数值大小;图3空间模式图数值单位为mm。空间信号颜色有正负之分,大于零的数值表示该成分的新疆陆地水储量变化与图2对应成分趋势相同;小于零的数值则表示趋势相反。研究区实际的各成分水储量变化数值需通过对应的时空模式相乘得到。

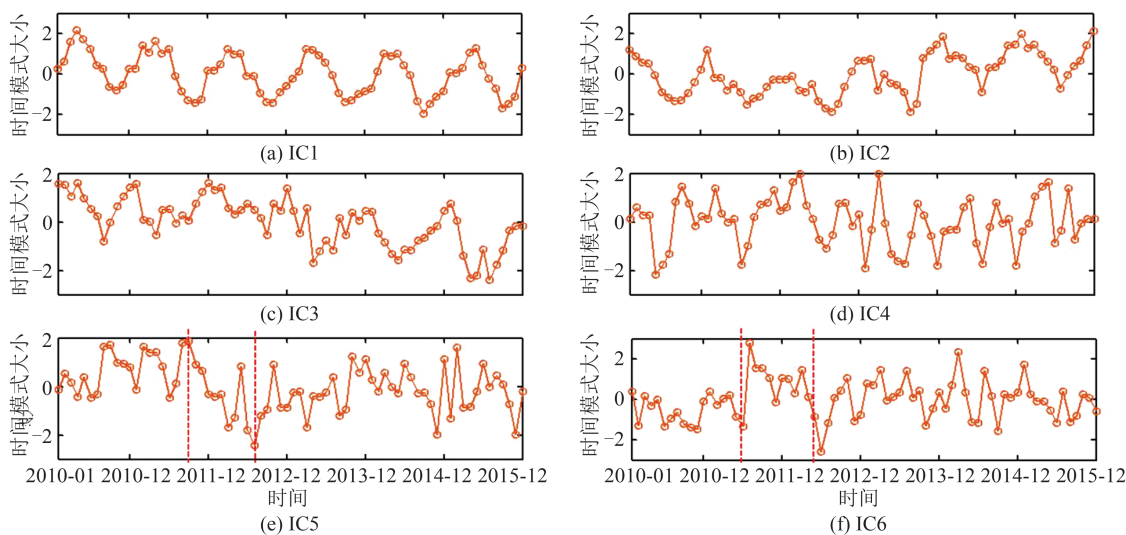


图2 ICA分解的新疆陆地水储量变化成分时间模式

Fig. 2 Time Pattern of Terrestrial Water Storage Change Components in Xinjiang Region Decomposed by ICA

从图2可以发现,ICA方法分解的新疆地区陆地水储量前两个成分均含有明显的年周期变化;IC3混叠了长期趋势与半年周期信号;IC4体现为半年周期变化;IC5、IC6则含明显的年际变化信号。从图3可以发现,IC1表示的年周期信号呈现明显的阶梯状分布,在研究区西部帕米尔高原附近信号相对较强;IC2表示的周年信号在西南部塔里木盆地

较为明显。从IC3趋势项还可以发现,在研究时段内,乌鲁木齐西部、天山山脉一带的水储量在逐年递减;IC4表示的半年周期信号空间分布均匀;从IC5表示的年际信号看出,研究区北部准噶尔盆地的水储量在2011-09—2012-07期间,局部时段虽有小幅回升,但总体上水储量呈现明显减少的趋势;相同时段内帕米尔高原附近水储量也明显增多。

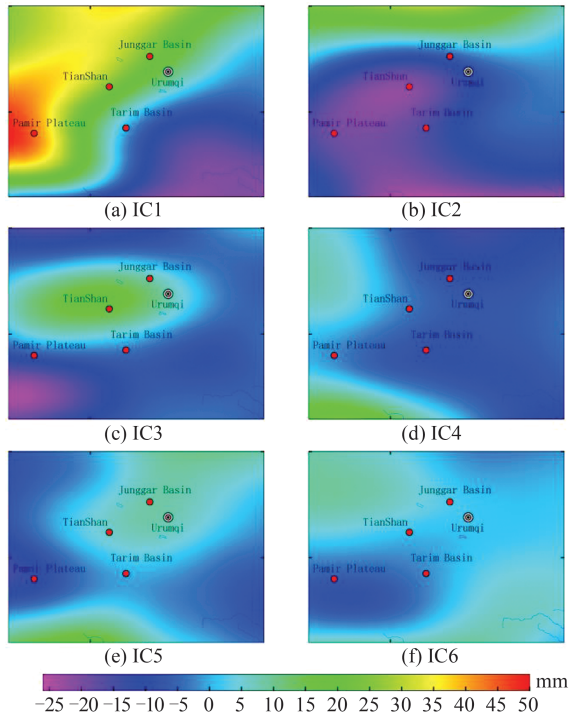


图3 ICA分解的新疆陆地水储量变化成分空间模式

Fig. 3 Spatial Pattern of Terrestrial Water Storage Change Components in Xinjiang Region Decomposed by ICA

2.2 陆地水负荷垂直形变特征分析

2.2.1 尺度因子法校正结果分析

鉴于卫星重力数据的滤波影响,本文采用尺度因子法校正 GRACE 反演的研究区陆地水负荷

形变结果,从而减弱滤波产生的泄露误差,具体过程为:(1)按照与 GRACE 位系数相同阶次对全球水文模型作球谐展开至 60 阶次,依据式(4)计算研究区 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 空间分辨率格网点的地表负荷垂直形变;(2)对格网点形变结果进行区域空间平均得到研究区整体的时间序列;(3)采用步骤(1)得到的球谐系数进行组合滤波,再次计算相同分辨率的形变结果;(4)将滤波后的格网点形变结果进行区域空间平均得到研究区整体的时间序列;(5)针对滤波前后得到的两种形变结果时间序列,基于最小二乘原理解算尺度因子,经计算尺度因子 $k=0.98$,以此校正 GRACE 反演的区域陆地水负荷垂直形变结果。

为了减少 GRACE 滤波产生的泄露误差影响,采用尺度因子法进行校正。WGHM 模型包含地表水与地下水等成分,与 GRACE 结果更为接近。因此,可利用 WGHM 模型滤波前后得到的形变尺度因子校正 GRACE 反演结果。GRACE 与 WGHM 二者形变时间序列如图 4 所示,红色与蓝色曲线分别表示 GRACE、WGHM 结果。本文同时将 GLDAS 模型按照与 GRACE 相同处理过程,计算 GLDAS 模型得到的陆地水负荷垂直形变,如图 4 中绿色曲线所示。需要说明的是,此时的 GRACE 结果已作尺度因子校正,但未进行 GAC 改正。

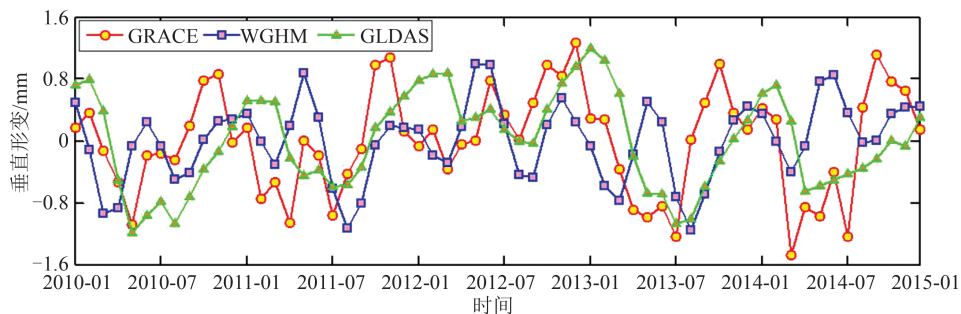


图4 尺度因子校正后的新疆地区陆地水负荷垂直形变

Fig. 4 Vertical Deformation from Terrestrial Water Load in Xinjiang Region from GRACE After Scale Factor Correction

从图 4 可以看出,GRACE 监测的研究区整体陆地水负荷变化引起地壳产生明显的抬升与下降,但幅值变化相对较小,振幅在 ± 1.5 mm 范围内。WGHM 模型结果与 GRACE 监测结果除了在 2013 年 4 月、2014 年 2 月、6 月和 9 月差异较大之外,其余时段二者总体变化趋势比较吻合。GLDAS 模型结果整体趋势也与 GRACE 反演结果相一致,但在个别月份,GLDAS 结果峰值和前后月份幅值变化高于 GRACE,这可能与 GLDAS 模型在构建过程中缺少该区域部分时段的实测

同化数据有关,导致 GLDAS 模型在研究区部分时段可能存在较大的不确定性。因此,本文利用 WGHM 模型得到的尺度因子 $k=0.98$ 减小 GRACE 滤波产生的泄露误差影响。

2.2.2 降水影响分析

为了更全面地验证 GRACE 形变结果对于 GNSS 的贡献,采用 GPCP 全球月值降水数据分析 GRACE 监测的研究区陆地水负荷垂直形变与降水之间的关系。图 5 给出了经过空间平均后研究区整体降水与形变时序,其中 GPCP 全球降水模型数据

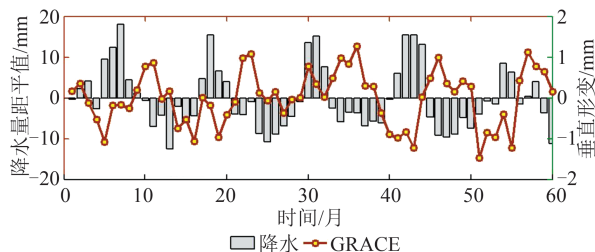


图5 GRACE监测的新疆地区陆地水负荷垂直形变与月降水量时间序列

Fig. 5 Time Series of Vertical Deformation from Terrestrial Water Load Depending on GRACE and Monthly Precipitation in Xinjiang Region

已作中心化处理,得到月降水量距平值。

从图5可以看出,降水量增多,陆地水负荷变化引起地壳产生向上回弹的趋势;降水量减少,地壳受陆地水负荷影响呈现向下沉降的趋势。

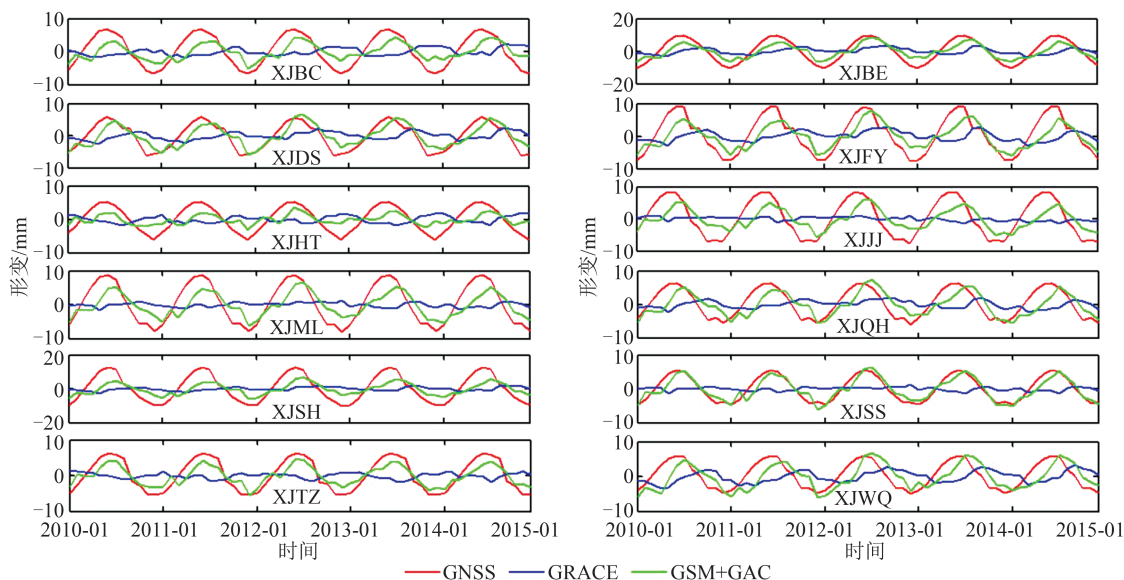


图6 GRACE监测结果回加GAC改正前后形变时序与GNSS垂向位移比较

Fig. 6 Comparison of Deformation Sequence and GNSS Elevation Coordinate Sequence Before and After GAC Correction in GRACE Monitoring Results

本文对GRACE GSM结果施加GAC改正前后,分别计算相应的相关系数与WRMS减小比值,如表2所示。为了更加直观地表达GRACE监测结果与GNSS垂直位移之间的相关关系,对表2数据以图像形式展示,如图7所示。

综合图6、图7与表2可以看出,GRACE监测的新疆地区陆地水负荷垂直形变占GNSS垂向位移序列贡献率较低,相关系数多数为负相关。而施加GAC改正后,GRACE监测结果与GNSS垂直位移的相关性明显提升,相关系数增加至0.63~0.91;WRMS减小比值增加至16.18%~58.97%。可见,回加GAC可有效改善GRACE

总体上GRACE监测的陆地水负荷形变时序与降水趋势相吻合,但相比降水存在2~3个月左右的时间滞后。地壳的这种变化可能与降水入渗到地下引起地表产生不同方向的形变位移有关,具体原因有待进一步研究。

2.2.3 与GNSS垂直形变比较分析

为了验证GRACE监测结果的可靠性以及陆地水负荷形变对于GNSS垂直形变的相关关系,限于获取的GNSS数据尺度为5 a,选取GRACE与GNSS共同时段进行比较分析。

为了联合GNSS与GRACE数据分析研究区陆地水负荷垂直形变特征,在GRACE的GSM数据基础上施加GAC改正,如图6中绿色曲线所示,红色与蓝色曲线分别表示GNSS垂直位移月变化(已做降噪处理)以及GRACE的GSM结果。

监测结果与GNSS形变资料的一致性。由此说明,新疆地区陆地水负荷变化引起的地表垂直形变量较小,变化幅值明显小于非潮汐大气负荷形变影响。根据周伯焯等^[28]的研究结果,研究区海洋负荷影响也可忽略不计,同时验证了GRACE监测结果的可靠性。

鉴于ICA分解结果,本文侧重分析能量占比最高的周年信号。GRACE与GNSS监测的周年信号均利用ICA方法分解得到。周年信号的振幅与相位通过正余弦函数,利用最小二乘拟合方式求解。二者周年信号与统计结果分别如图8和表3所示,图8中红色曲线表示GNSS垂直位移

周年变化,蓝色曲线表示回加 GAC 后 GRACE 结果周年变化。

为了直观地表达 GRACE 监测结果与 GNSS 垂直位移之间的相位关系,对表 3 中的相位差以空间分布图形式展示,如图 9 所示,圆圈代表各测站位置,颜色代表各测站对应的相位差大小,单位为 d。

从图 8 和表 3 可以发现,GRACE 监测的新疆地区各测站负荷垂直位移存在明显的周年变化,周年振幅为 2.01 ± 0.06 mm 至 6.02 ± 0.05 mm,小于对应 GNSS 测站周年幅值,可能是由于 GNSS 垂直形变位移中除陆地水、非潮汐大气与海洋信号之外,还包括地震、火山、构造运动等因素影响。从表 3 和图 9 的相位差统计结果可看出,GRACE 相比 GNSS 监测总体上存在不同程度的相位延迟,除 XJTZ 测站,其余测站时间滞后长达约 0.5~2 个月。天山以南相位基本一致,准噶尔盆地相位差较大,可能与 CORS 位置处的地下基岩、表面土层疏松,以及 CORS 站对于地面和建筑物稳定性敏感程度有关。是否所有的站都适

合用于计算地壳的垂直形变还有待进一步研究。

表 2 GRACE 监测的新疆地区地表负荷垂直形变与 GNSS 垂向位移之间的相关性指标

Tab. 2 Correlation Index Between Load Vertical Deformation Derived from GRACE and GNSS

测站	陆地水负荷形变		陆地水+非潮汐大气 海洋负荷形变	
	相关系数	WRMS 减小比值/%	相关系数	WRMS 减小比值/%
XJBC	-0.68	-17.83	0.76	30.09
XJBE	0.27	3.63	0.90	46.34
XJDS	-0.24	-10.56	0.81	41.12
XJFY	0.01	-3.42	0.81	39.31
XJHT	-0.79	-22.79	0.70	22.09
XJJI	-0.10	-1.56	0.73	29.31
XJML	-0.42	-5.37	0.79	35.20
XJQH	-0.30	-11.21	0.68	25.80
XJSH	-0.36	-5.58	0.79	29.02
XJSS	-0.39	-6.88	0.91	58.97
XJTZ	-0.60	-11.82	0.92	49.25
XJWQ	-0.36	-23.10	0.63	16.18

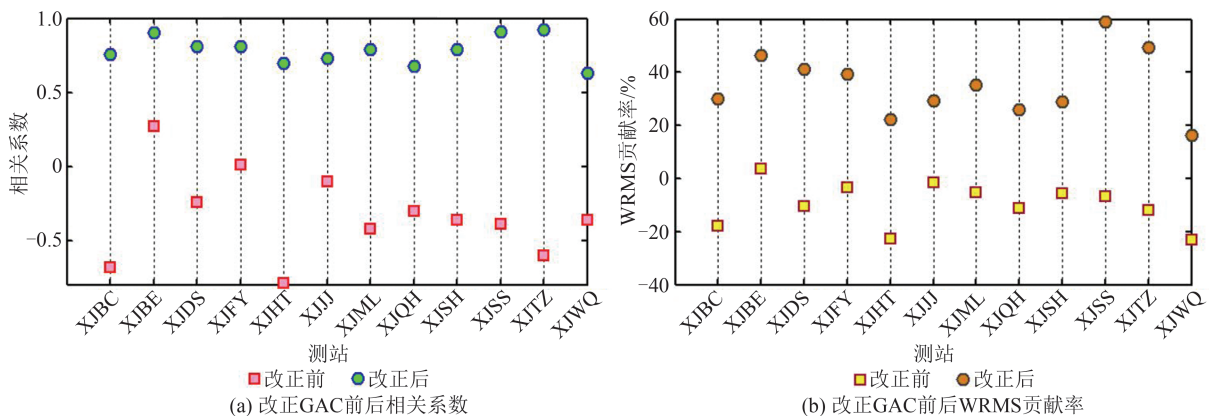


图 7 GAC 改正前后 GRACE 结果与 GNSS 垂直形变的相关系数与 WRMS 减小比值

Fig. 7 Correlation Coefficient and WRMS Decrease Rate Between GRACE Results and GNSS Vertical Deformation Before and After GAC Correction

2.2.4 讨论

目前计算地表负荷形变的方法主要有格林函数法与球谐函数法,Rao 和 Sun^[29]指出,直接用 GRACE 球谐函数法推导的负载难以准确校正 GPS 垂直形变,以青藏高原为测试区,提出了一种基于全球水文数据,并采用格林函数法计算负载的有效方法。该方法依赖水文数据的可靠性。然而,利用式(5)计算 GRACE 形变对 GNSS 时序贡献率大小是多数研究常用的方法^[29]。鉴于本文研究区为新疆地区,仍采用该式计算 WRMS。计划在下一步研究中引入 Rao 方法,深入探讨所提方法在研究区的适用性。

3 结 语

本文利用 ICA 方法提取 GRACE RL06 数据反演的 2010—2014 年新疆地区陆地水储量及其负荷垂直形变特征。采用 WGHM 模型尺度因子法减小 GRACE 滤波影响。通过相关系数与 WRMS 减小比值评估 GRACE 结果与 GNSS 垂直位移之间的定量关系,引入降水数据,综合验证 GRACE 反演结果的可靠性。为保证二者监测结果具有相同背景场,对 GRACE 结果施加一阶位系数与负荷勒夫数以及 GAC 改正。在此基础上,定量分析 ICA 方法分解的 GRACE 与 GNSS

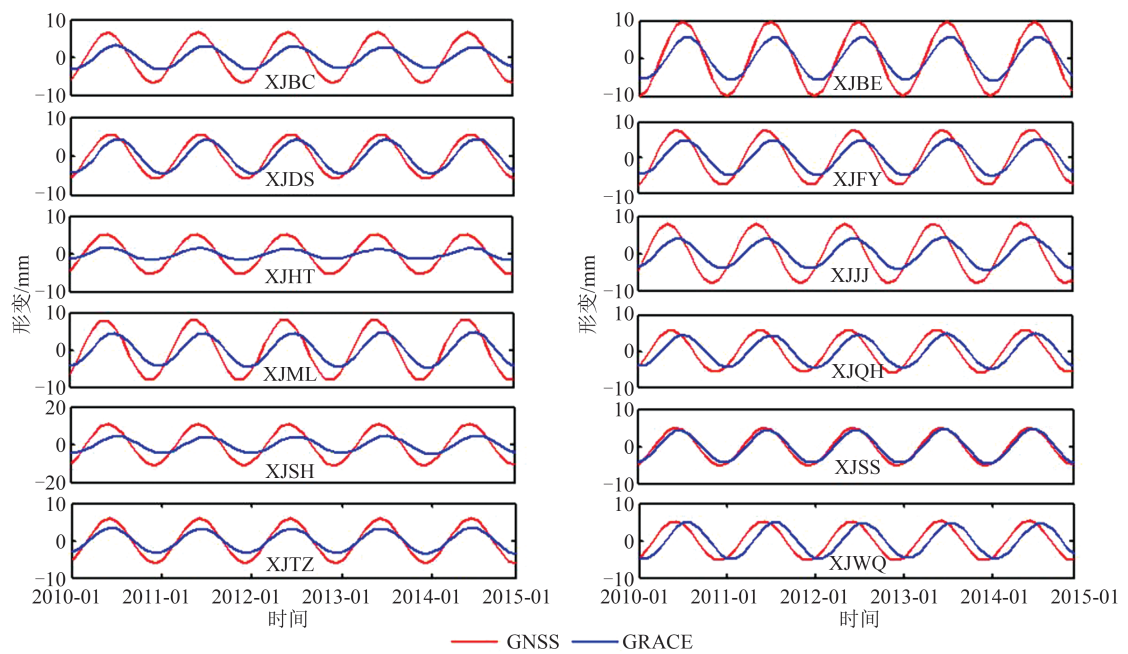


图8 GRACE监测结果与GNSS垂直形变周年变化

Fig. 8 Annual Variation of Load Vertical Deformation from GRACE and GNSS Elevation Series

表3 GRACE监测新疆地区地表负荷垂直形变与GNSS垂直位移周年变化的振幅与相位

Tab. 3 Annual Amplitude and Phase Between GRACE with GAC Correction and GNSS Vertical Time Series

测站	GRACE		GNSS		GRACE-GNSS
	周年振幅/mm	周年相位/d	周年振幅/mm	周年相位/d	相位差/d
XJBC	3.53 ± 0.05	-124 ± 2	6.71 ± 0.01	-89 ± 1	35 ± 3
XJBE	6.02 ± 0.05	-138 ± 1	9.87 ± 0.01	-119 ± 1	19 ± 0
XJDS	5.08 ± 0.03	-130 ± 1	5.74 ± 0.01	-99 ± 1	31 ± 0
XJFY	5.32 ± 0.06	-132 ± 2	7.85 ± 0.03	-102 ± 1	30 ± 1
XJHT	2.01 ± 0.06	-95 ± 5	5.36 ± 0.01	-84 ± 1	11 ± 4
XJJJ	4.30 ± 0.05	-104 ± 2	8.08 ± 0.03	-63 ± 1	41 ± 1
XJML	4.72 ± 0.06	-116 ± 2	8.26 ± 0.02	-80 ± 1	36 ± 1
XJQH	4.67 ± 0.06	-126 ± 2	5.98 ± 0.02	-78 ± 1	48 ± 1
XJSH	4.70 ± 0.04	-127 ± 1	11.04 ± 0.03	-91 ± 1	36 ± 0
XJSS	4.79 ± 0.05	-112 ± 1	5.11 ± 0.01	-96 ± 1	16 ± 0
XJTZ	3.73 ± 0.03	-98 ± 1	6.07 ± 0.02	-91 ± 1	7 ± 0
XJWQ	5.01 ± 0.04	-138 ± 1	5.32 ± 0.01	-88 ± 1	50 ± 0

结果周年信号特征。研究结果如下：

- 1)新疆地区陆地水储量变化具有明显的周年特征,空间信号呈现阶梯状分布;同时包含较强的长期亏损信号,这种亏损信号在乌鲁木齐西部、天山一带尤为显著。
- 2)该地区陆地水负荷对地壳垂直形变影响其幅值在 $-1.5\sim1.5$ mm,除个别月份外,总体变化趋势与GLDAS形变结果比较一致;对GSM数据回加GAC之后,可显著提升GRACE结果与GNSS垂直位移的一致性,相关系数由 $-0.79\sim0.27$ 增加至 $0.63\sim0.91$,WRMS由 $-23.10\%\sim3.63\%$ 增加至 $16.18\%\sim58.97\%$ 。GRACE监测

- 的陆地水负荷垂直形变与降水量变化趋势整体比较一致,但存在明显的时间滞后。
- 3)相比GAC负荷影响,新疆地区陆地水负荷垂直形变量相对较小;经过GAC改正后,GRACE监测的形变结果周年振幅与GNSS比较接近,同时存在约0.5~2个月的相位延迟,说明GNSS形变数据能够有效验证GRACE反演结果。本文方法与结果可为区域垂直参考框架的精确维护提供有力的技术支撑。
- 致谢:感谢德国法拉克福大学自然地理研究所提供的WGHM 2.2c全球陆地水储量模型。

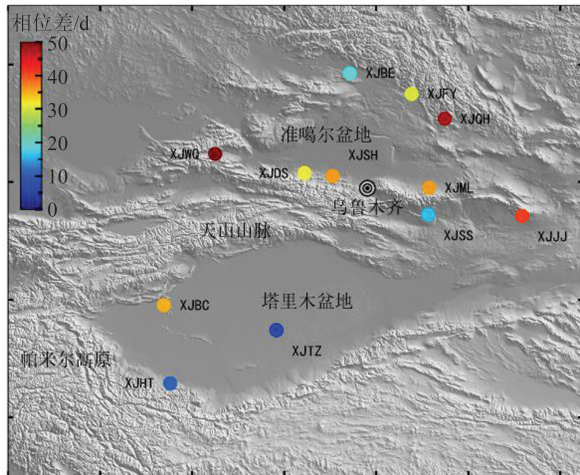


图9 GRACE监测与GNSS垂直位移的相位差
Fig. 9 Phase Difference Between GRACE Monitoring Results and GNSS Vertical Displacement Results

参 考 文 献

- [1] Wang Jielong, Yang Ling, Chen Yi, et al. Prediction of Watershed Groundwater Storage Based on Seasonal Adjustment and NAR Neural Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1796-1804. (王杰龙, 杨玲, 陈义, 等. 结合季节调整和NAR神经网络的流域地下水储量预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1796-1804.)
- [2] Ran Jiangjun, Yan Zhengwen, Wu Yunlong, et al. Research Status and Future Perspectives in Next Generation Gravity Mission[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 841-857. (冉将军, 闫政文, 吴云龙, 等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 841-857.)
- [3] Othman A, Abotalib A Z. Land Subsidence Triggered by Groundwater Withdrawal Under Hyper-Arid Conditions: Case Study from Central Saudi Arabia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(7): 243.
- [4] Rateb A, Kuo C Y. Quantifying Vertical Deformation in the Tigris-Euphrates Basin Due to the Groundwater Abstraction: Insights from GRACE and Sentinel-1 Satellites[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1658.
- [5] Wang S Y, Chen J L, Wilson C R, et al. Reconciling GRACE and GPS Estimates of Long-Term Load Deformation in Southern Greenland[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 212(2): 1302-1313.
- [6] Zhan W, Li F, Hao W, et al. Regional Characteristics and Influencing Factors of Seasonal Vertical Crustal Motions in Yunnan, China[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(3): 1295-1304.
- [7] Han S C. Elastic Deformation of the Australian Continent Induced by Seasonal Water Cycles and the 2010-2011 LaNiña Determined Using GPS and GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(6): 2763-2772.
- [8] Sheng Chuanzhen, Gan Weijun, Liang Shiming, et al. Identification and Elimination of Non-tectonic Crustal Deformation Caused by Land Water from GPS Time Series in the Western Yunnan Province Based on GRACE Observation[J]. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(1): 42-52. (盛传贞, 甘卫军, 梁诗明, 等. 滇西地区GPS时间序列中陆地水负荷形变干扰的GRACE分辨与剔除[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 42-52.)
- [9] van Dam T V, Wahr J, Lavallée D. A Comparison of Annual Vertical Crustal Displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2007, 112(B3): 1426-1435.
- [10] Tregoning P, Watson C, Ranmillien G, et al. Detecting Hydrologic Deformation Using GRACE and GPS[J]. *Geophysics Research Letter*, 2009b, 36(5): L1540.
- [11] Yan Haoming, Chen Wu, Zhu Yaozhong, et al. Thermal Effects on Vertical Displacement of GPS Stations in China[J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(4): 825-832. (闫昊明, 陈武, 朱耀仲, 等. 温度变化对我国GPS台站垂直位移的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 825-832.)
- [12] Tan Weijie, Xu Xueqing, Dong Danan, et al. Thermoeelastic Seasonal Deformation in Chinese Mainland[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(9): 1080-1087. (谭伟杰, 许雪晴, 董大南, 等. 温度变化对中国大陆三维周年位移的影响[J]. 测绘学报, 2017, 46(9): 1080-1087.)
- [13] Zhang T, Shen W B, Pan Y, et al. Study of Seasonal and Long-Term Vertical Deformation in Nepal Based on GPS and GRACE Observations[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(5): 120-121.
- [14] Liu Renli, Li Jiancheng, Jiang Weiping, et al. Comparing Vertical Surface Displacements Using GRACE and GPS over Shanxi Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 426-430. (刘任莉, 李建成, 姜卫平, 等. 联合GRACE与GPS比较山西省垂向地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(4): 426-430.)
- [15] Zhong Yulong, Zhong Min, Feng Wei, et al. Evaluation of the Evapotranspiration in the West Liaoh

- River Basin Based on GRACE Satellite and in Situ Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 173-178. (钟玉龙, 钟敏, 冯伟, 等. 联合 GRACE 重力卫星与实测资料估计西辽河流域蒸散发量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 173-178.)
- [16] Landerer F. Monthly Estimates of Degree-1 (Geocenter) Gravity Coefficients, *Generated from GRACE (04/2002-06/2017) and GRACE-FO (06/2018 Onward) RL06 Solutions*, GRACE Technical Note 13, the GRACE Project, NASA Jet Propulsion Laboratory, 2019.
- [17] Cheng M, Ries J. The Unexpected Signal in GRACE Estimates of C_{20} [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(8): 897-914.
- [18] Guo J, Mu D, Liu X, et al. Water Storage Changes over the Tibetan Plateau Revealed by GRACE Mission[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(2): 463-476.
- [19] Liu Renli, She Dunxian, Li Min, et al. Using Satellite Observations to Assess Applicability of GLDAS and WGHM Hydrological Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1596-1604. (刘任莉, 余敦先, 李敏, 等. 利用卫星观测数据评估 GLDAS 与 WGHM 水文模型的适用性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1596-1604.)
- [20] Wang Haibo, You Wei, Fan Dongming, et al. Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 93-103. (王海波, 游为, 范东明, 等. 利用 ICA 方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 93-103.)
- [21] Boergens E, Rangelova E, Sideris M G, et al. Assessment of the Capabilities of the Temporal and Spatiotemporal ICA Method for Geophysical Signal Separation in GRACE Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(5): 4429-4447.
- [22] Forootan E, Schumacher M, Mehrnegar N, et al. An Iterative ICA-based Reconstruction Method to Produce Consistent Time-Variable Total Water Storage Fields Using GRACE and Swarm Satellite Data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1639.
- [23] Shi T, Fukuda Y, Doi K, et al. Extraction of GRACE/GRACE-FO Observed Mass Change Patterns Across Antarctica via Independent Component Analysis (ICA) [J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 229(3): 1914-1926.
- [24] Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, et al. An Effective Filtering for GRACE Time-Variable Gravity: Fan Filter [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17311.
- [25] Pan Y, Shen W B, Ding H, et al. The Quasi-Biennial Vertical Oscillations at Global GPS Stations: Identification by Ensemble Empirical Mode Decomposition [J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 26096-26114.
- [26] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads [J]. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(3): 761-797.
- [27] Blewitt G. Self-Consistency in Reference Frames, Geocenter Definition, and Surface Loading of the Solid Earth [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B2): 2013-2023.
- [28] Zhou Boye, Jiang Weiping, Li Zhao. Effects of Non-Tidal Ocean Loading on IGS Stations in Coastal Areas [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(11): 1008-1013. (周伯焯, 姜卫平, 李昭. 非潮汐海洋负载效应对近海岸 IGS 测站坐标时间序列的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(11): 1008-1013.)
- [29] Rao W, Sun W. Uplift of the Tibetan Plateau: How to Accurately Compute the Hydrological Load Effect? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 127: e2021JB022475.