



引文格式:李昭,鲁杨,姜卫平,等.一种基于GRACE重力卫星的陆地水储量变化组合新模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1180-1191.DOI:10.13203/j.whugis20230201

Citation: LI Zhao, LU Yang, JIANG Weiping, et al. A New Combined Terrestrial Water Storage Change Model Based on GRACE Satellite Gravimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7):1180-1191.DOI:10.13203/j.whugis20230201

一种基于GRACE重力卫星的陆地水储量变化组合新模型

李昭^{1,2} 鲁杨¹ 姜卫平^{1,2} 陈渠森^{1,2} 陈华^{2,3}
叶世榕¹ 赖山东⁴

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

4 江西省自然资源测绘与监测院,江西 南昌,330009

摘要:利用重力卫星监测全球水储量变化,有助于应对全球气候变化、防灾减灾等挑战,具有重要的科学意义。国际上已发布了多个系列的重力恢复和气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)时变重力场模型,但是不同机构提供的模型之间存在差异,而且精度参差不齐。研究基于不同卫星重力场模型的陆地水储量变化(terrestrial water storage change, TWSC)组合新方法,有利于扬长避短,进一步提高TWSC的估计精度。采用方差分量估计、熵权法和变异系数法,针对5种GRACE时变重力场反演获得的TWSC开展组合研究。结果表明,3种TWSC组合新模型都能够显著减小不同时变重力场反演的TWSC之间的差异,而且信噪比与美国喷气动力实验室模型相比提高了约58%。组合前后全球TWSC趋势最大差异由0.011 cm/月下降到0.001 cm/月,最大水振幅差异由0.95 cm/月减小为0.21 cm/月,1°×1°空间分辨率下TWSC随经纬度方向变化的标准差差异同样由超过20 cm²降低到3 cm²以下。组合模型与水文模型的相关性较独立模型最高提升了约50%,由此证实了组合方法可以有效地抑制噪声,显著提高TWSC结果的精度,是一种稳定可靠的高精度时变重力场应用新模式,可以为陆地水储量反演等应用研究提供更可靠的数据支撑。

关键词:GRACE时变重力场;陆地水储量变化;组合新模型;GLDAS;MERRA-Land

中图分类号:P223

文献标识码:A

收稿日期:2023-06-04

DOI:10.13203/j.whugis20230201

文章编号:1671-8860(2023)07-1180-12

A New Combined Terrestrial Water Storage Change Model Based on GRACE Satellite Gravimetry

LI Zhao^{1,2} LU Yang¹ JIANG Weiping^{1,2} CHEN Qusen^{1,2} CHEN Hua^{2,3}
YE Shirong¹ LAI Shandong⁴

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Luoja Laboratory, Wuhan 430079, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 Jiangxi Natural Resources Surveying, Mapping and Monitoring Institute, Nanchang 330009, China

Abstract: Objectives: Satellite gravity field data can be used to monitor global terrestrial water storage changes and address common challenges such as climate change, disaster prevention and mitigation, etc. Several time-variable gravity models derived from gravity recovery and climate experiment (GRACE) mission have been released internationally. However, there are differences between those models provided by different institutions, and the accuracies are also uneven. The combination of terrestrial water storage

基金项目: 湖北珞珈实验室专项基金(220100020);国家自然科学基金(42174030, 42192531);湖北省科技创新人才及服务专项(2022EJD010)。

第一作者: 李昭,博士,教授,主要从事高精度卫星定位理论方法研究。 zhao.li@whu.edu.cn

change (TWSC) based on different satellite gravity field products would help to maximize the strengths and avoid weaknesses, so as to improve the accuracy of TWSC. **Methods:** Variance component estimation, entropy weight method (EWM) and coefficient of variation method are used to carry out the combination analysis on TWSC inverted from five GRACE satellite gravity field models. **Results:** The results show that all the three combined TWSC models can significantly reduce the discrepancies between time-variable gravity field inverted TWSC, and the signal-to-noise ratio has been improved by about 58% compared to Jet Propulsion Laboratory (JPL) model. The maximum difference in global TWSC trends before and after combination decreases from 0.011 cm/month to 0.001 cm/month, while the maximum amplitude difference decreases from 0.95 cm/month to 0.21 cm/month. At a spatial resolution of $1^\circ \times 1^\circ$, the difference in standard deviation of TWSC at latitude and longitude directions decreases from over 20 cm² to less than 3 cm². The correlation between the EWM combined TWSC model and hydrological model also improves by up to about 50% compared with that between the JPL independent model and hydrological model. **Conclusions:** The combined method can effectively suppress noise and significantly improve the accuracy of TWSC results, hence can perform as a new mode for high-precision time-variable gravity field applications to provide more reliable data support for terrestrial water storage inversions.

Key words: GRACE time-variable gravity field; terrestrial water storage change; combined new model; GLDAS; MERRA-land

2002 年发射升空的重力恢复与气候实验卫星 (gravity recovery and climate experiment, GRACE) 及后续计划 (GRACE follow-on, GRACE-FO) 能够连续、快速、大尺度地探测地表质量迁移造成的重力变化, 在全球、区域和流域尺度的陆地水储量 (terrestrial water storage, TWS) 时空变化特征、冰川消融等方面取得了重要进展^[1-8]。当前, 国际及国内许多权威机构都面向全球用户提供 GRACE 全球时变重力场模型, 如美国的德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, University of Texas, CSR)、喷气动力实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL), 德国地学研究中心 (Helmholtz Centre Potsdam German Research Centre for Geosciences, GFZ), 奥地利的格拉茨工业大学大地测量学研究所 (Institute of Geodesy at Graz University of Technology, ITSG), 中国的同济大学 (Tongji)、武汉大学、华中科技大学、西南交通大学等^[9-13]。

从理论上讲, 基于相同的 GRACE 观测数据, 采用不同重力场恢复方法应获得相同的地球重力场模型, 因其均基于牛顿运动方程建立。然而, 由于所采用的数据处理模型及策略各异, 各种方法具备不同的优势和劣势, 且不可避免包括各类误差、噪声的影响, 导致基于不同重力场模型反演的全球陆地水储量变化 (terrestrial water storage change, TWSC) 存在差异, 精度参差不齐^[14-15], 在应用上则表现为更优解或更差解。如 Wang 等^[16] 和 Bibi 等^[17] 发现根据不同机构的

GRACE 重力场产品估算海洋质量变化以及澜沧江流域水量变化时存在明显的差异。这说明基于不同 GRACE 重力场模型反演的 TWSC 在区域上表现各异, 不具备普适性, 用户需要根据自身需求及研究区域选择最优的产品进行 TWSC 反演。

为了更大限度地发挥每种产品的优势, 削弱系统误差及噪声, 近年来国内外学者开展了组合重力场的研究。在国际上, Meyer 等^[18] 和 Peter 等^[19] 根据方差分量估计法评估的噪声水平针对不同机构提供的 GRACE 月重力场模型进行组合, 并在国际地球重力场模型中心 (International Centre for Global Earth Models, ICGEM) 发布了时变重力场综合服务 (combination service for time-variable gravity field solutions, COST-G), 结果表明, 90% 的组合产品质量与原始产品一样好甚至更好, 由此证实了多源产品组合可以提高结果的可靠性。在此基础上, 该研究团队利用 COST-G 与 CSR、ITSG 以及 GFZ 的重力场数据监测格陵兰岛流域水量变化的时间序列, 发现 COST-G 结果的噪声水平最低。在国内, 钟波等^[20] 和周浩等^[21] 利用 CHAMP (challenging mini-satellite payload for geophysical research and application)、GRACE 和 GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer) 等不同卫星重力计划的互补优势, 分别通过最小二乘联合平差法 (least squares joint adjustment, LSJA) 和最小二乘谱组合法 (least squares spectral combina-

tion, LSSC)实现了基于多类重力数据的高精度高分辨率地球重力场联合反演,但是目前尚无利用不同GRACE卫星重力场模型建立组合陆地水储量模型的研究。

除COST-G外,当前理论最完善、应用最广泛、精度最高的国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)同样基于组合方法建立。其中,作为建立ITRF输入数据源之一的GNSS坐标时间序列,是针对不同IGS分析中心(JPL、GFZ、麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)等)提供的产品,采用方差分量估计等方法进行技术内组合得到^[22-25],和COST-G的原理一致。这些成功的应用都证实了组合方法的必要性、可行性和有效性。因此,本文拟通过选取CSR、GFZ、JPL、ITSG及Tongji 5家权威机构提供的GRACE卫星重力场模型反演全球陆地水储量变化,采用方差分量估计(variance component estimation, VCE)、熵权法(entropy weight method, EWM)和变异系数法(coefficient of variation method, CVM)3种客观定权方法确定不同机构产品反演TWSC的权重,建立TWSC组合新模型,并利用全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)、现代研究和应用回顾性分析产品(land surface data product of the modern-

$$\Delta H(\theta, \varphi) = \frac{R\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \theta) \frac{2l+1}{1+k_l} W_{lm}(\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)) \quad (1)$$

式中, $\Delta H(\theta, \varphi)$ 为等效水高; R 为地球赤道半径; θ 和 φ 分别为待定点的余纬和经度; ρ_{ave} 为地球的平均密度, 取值为 5517 kg/m^3 ; ρ_w 为水密度; \bar{P}_{lm} 为归一化缩合勒让德函数; W_{lm} 为平滑函数; k_l 是 l 阶负荷勒夫数; ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 为无量纲地球重力场球谐系数的时变量或变化; l, m 分别表示 ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 的阶和次^[29-30]。

1.2 水文模型

1.2.1 GLDAS

美国国家宇航局提供的GLDAS包括两个版本:GLDAS-1和GLDAS-2,分别提供不同时空分辨率、不同模型下的数据产品,包括地表径流、气温、冠层水、蒸散发、土壤湿度、雪水当量、降水等,广泛应用于水文负载造成的地表位移变化研究、GRACE反演陆地水储量结果验证及地下水储量变化推演等科学应用^[31-32]。考虑GLDAS-2相比于GLDAS-1的优势,并且与GRACE产品保持相同的时空分辨率,本文选取空间分辨率为

era retrospective analysis for research and applications, MERRA-Land)两种水文模型评估其全球及区域应用效果。成果有助于扬长避短,降低相较于单个产品的噪声水平,更加充分地利用现有时变重力场产品,为水文应用提供更可靠的基础数据。

1 研究数据与处理方法

1.1 GRACE卫星重力场模型及陆地水储量变化反演

GRACE数据分为Level-0、Level-1A/1B及Level-2等級別。其中,Level-1B和Level-2是已知公开的数据,Level-0暂不对外公布^[26]。所有机构提供的GRACE产品都属于Level-2级别,根据Level-1B产品进行处理得到,主要包括GRACE卫星精密轨道数据、地球重力场球谐系数、GPS信号延迟/折射率数据^[27-28]。本文选取国际上应用最广泛的CSR、GFZ、JPL、ITSG及Tongji 5家权威机构提供的GRACE时变重力场模型反演全球TWSC,建立TWSC组合新模型。选取的重力场产品时间跨度为2003-01—2014-11,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为月。每个机构提供的产品都会存在个别月份数据缺失的现象,本文直接舍弃,不对其进行补充。利用GRACE时变重力场模型反演陆地水储量变化,计算公式为:

$1^\circ \times 1^\circ$ 、时间分辨率为月的GLDAS-2雪水当量及土壤湿度数据,时间跨度为2003-01—2014-11。

1.2.2 MERRA-Land

MERRA-Land采用了最先进的GEOS-5数据同化系统,着重于在不同时间尺度上对水文循环进行历史分析,提供了蒸散发、土壤湿度、雪水当量、降水等产品。本文采用MERRA-Land数据空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 的雪水当量及土壤水湿度数据,时间分辨率为月,时间跨度为2003-01—2014-11。

1.3 组合TWSC建模方法

本文采用VCE、EWM和CVM 3种方法,首先针对不同机构时变重力场模型反演获得的TWSC权阵进行确定,然后根据确定的权重矩阵对独立重力场模型反演的TWSC进行组合,建立组合TWSC新模型。

1.3.1 VCE

VCE首先对5种重力场模型反演的全球

TWSC 时间序列进行初始定权,采用最小二乘方法进行预平差;然后依据一定原则,利用平差得到的观测值改正数迭代观测量估值的方差,直至各重力场模型的单位权中误差相等^[33]。

对于 5 种模型的观测值,相应的误差方程为:

$$\begin{cases} V_1 = A_1 X - L_1 \\ V_2 = A_2 X - L_2 \\ \vdots \\ V_5 = A_5 X - L_5 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $A_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 为 $n_i \times m$ 的设计矩阵; L_i 为 $n_i \times 1$ 观测向量; X 为平差向量; V_i 为对应于 L_i 的残差向量; L_i 的先验权阵为 P_1, P_2, \dots, P_5 , 并且假设 L_i 和 $L_j (i \neq j, j=1, 2, \dots, 5)$ 独立。使得:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_5 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_1 & & & \\ & P_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

观测方程的法方程为:

$$N = A^T P A, N_i = A_i^T P_i A_i$$

方差分量估计值的计算式为:

$$A_i^T P_i A_i = n_i - 2\text{tr}(N^{-1} N_i) + \text{tr}(N^{-1} N_i)^2 \sigma_i^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^n \text{tr}(N^{-1} N_i N^{-1} N_j) \sigma_j^2 \quad (4)$$

式中, n_i 为第 i 类观测值的个数 ($i=1, 2, \dots, 5$); N_i 为对应的法矩阵; N^{-1} 为总法矩阵的逆; $\text{tr}()$ 为求迹过程。

权重计算式为:

$$w_i = \frac{A_i^T P_i A_i}{n_i - 2\text{tr}(N^{-1} N_i)} \quad (5)$$

1.3.2 EWM

EWM 的基本思路是根据指标变异性的大小确定客观权重。一般而言,若某个指标的熵值越小,表明该指标值的信息量越多,评价中所起的作用越大,其权重也就越大,反之则权重越小^[34]。

EWM 首先对 5 种重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列进行无量纲化处理,得到归一化数值;然后根据信息论确定信息熵,计算各个指标的信息熵,通过信息熵确定各指标的熵值权重,计算式为:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^{113} x_{ij}} \quad (6)$$

$$h_j = -\frac{1}{\ln 113} \sum_{j=1}^{113} f_{ij} \cdot \ln f_{ij}$$

$$w_i = \frac{1 - h_i}{5 - \sum_{i=1}^5 h_i}$$

式中, x_{ij} 为第 $i (i=1, 2, \dots, 5)$ 个机构重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列中第 $j (j=1, 2, \dots, 113)$ 个月的数据; f_{ij} 为第 i 个机构重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列中第 j 个月的数据占该时间序列的比重; h_i 为时间序列中第 j 个月的信息熵; w_i 为根据模型获得的第 i 个 TWSC 熵值权重。

1.3.3 CVM

CVM 依据不同重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列在所有评价对象上的变化程度,来判断各个评价对象达到指标平均水平的难易程度,进而对其赋权。

参评样本为 5 组时变重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列,每个 TWSC 时间序列共有 113 个月作为指标, X_{ij} 为第 i 个机构重力场模型反演的全球 TWSC 时间序列中第 j 个月的数据,各机构指标的均值 X_i 和标准差 S_i 的计算式分别为:

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{113} \sum_{j=1}^{113} X_{ij} \\ S_i = \sqrt{\frac{1}{113} \sum_{j=1}^{113} (X_{ij} - X_i)^2} \end{cases} \quad (7)$$

各指标的变异系数 V_i 的计算式为:

$$V_i = \frac{S_i}{X_i} \quad (8)$$

对 V_i 作归一化处理,由此得到各指标的权重值 w_i 计算式为:

$$w_i = V_i / \sum_{i=1}^5 V_i \quad (9)$$

1.3.4 组合 TWSC 新模型

根据上述 3 种模型,分别确定基于 5 种时变重力场的 TWSC 权重矩阵,将每种产品的 TWSC 乘以相应的权重并进行累加,即可得到组合 TWSC 新模型,计算式为:

$$G = \sum_{i=1}^5 g_i \times w_i \quad (10)$$

式中, G 为组合新模型; g_i 为根据第 i 个机构提供的时变重力场模型反演获得的 TWSC。

2 结果分析与讨论

2.1 基于不同 GRACE 卫星重力场模型反演的 TWSC 差异

Boergens 等^[35]发现不同机构的 GRACE 重力

场产品采用相同的数据处理策略估算 TWSC 时存在明显的差异。为了量化其差异大小及空间分布特征,本文利用5家机构的重力场数据,按照式(1),采用统一的数据处理策略反演2003—2014年全球TWSC。由于本文的研究目的在于描述基于GRACE卫星重力场的独立TWSC模型及组合TWSC新模型随时间或经纬度的差异,因此仅着重于分析不同结果序列的长期变化趋势、周期及幅值的数值变化,而没有对其产生的原因及物理意义进行细致的研究和探讨。

图1为不同机构的GRACE重力场产品反演得到的全球月平均TWSC时间序列。总的来说,5家重力场产品反演的TWSC在变化趋势以及周期性上表现出很好的一致性,但是也存在着不同程度的差异。其中,CSR与ITSG间的变化趋势差异最大,达0.011 cm/月。不同模型之间的波峰与波谷也存在差异,最大差异处ITSG与GFZ的陆地水储量变化可达0.95 cm/月,如图1黑色虚线框所示,这种差异可能会直接影响水储量变化研究结果的精度。

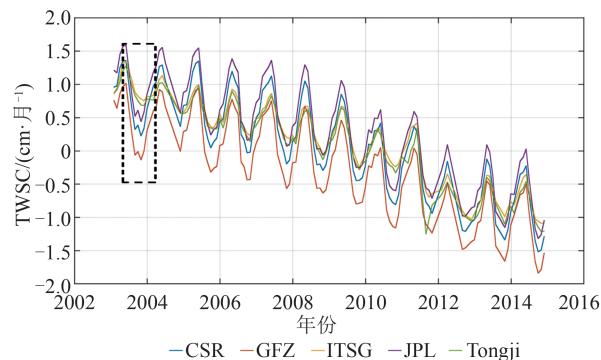


图1 基于GRACE卫星重力场反演得到的全球月平均TWSC时间序列

Fig. 1 Global Monthly Average TWSC Time Series Derived from GRACE Satellite Gravity Field

图2为基于GRACE卫星重力场产品反演获得的2003—2014年间TWSC在不同经度处随纬度变化的标准差(图2(a))以及在不同纬度处随经度变化的标准差(图2(b)),其中不同颜色线代表1~113个月的TWSC标准差,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。由图2可以看出,由于GRACE卫星重力场数据的空间分辨率较低,导致小尺度区域反演的TWSC精度较差。如图2中的黑色虚线框所示, JPL模型反演得到的TWSC模型在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ N、 $0^{\circ} \sim 34^{\circ}$ S、 $0^{\circ} \sim 150^{\circ}$ E、 45° W~ 90° W区域的显著差异消失了,最大差异由组合前超过 20 cm^2 降低到 3 cm^2 以下。该现象证实了组合TWSC新模型可以有效地抑制甚至消除噪声。需要说明的是,文献[36-37]表明JPL模型的精度和可靠性与其他机构模型的差异较小,在有些区域的性能甚至比其他模型更优。然而,图2却显示JPL模型与其他模型之间的差异显著,且相较于其他模型,在局部范围内反演TWSC的效果较差。这是由于本文的研究目的在于评估基于

达约 20 cm^2 ,表明在局部区域JPL反演TWSC的精度低于其他4家机构。由此看出,即使采用完全相同的反演方法,根据JPL或者其他几个机构的产品研究这些区域的陆地水储量变化,可能会得出截然不同的结论。为了消除这些差异,针对现有的重力场模型反演结果进行科学的组合,得到适用范围更广、精度更高的组合新模型十分必要,其结果可能为陆地水储量变化研究提供更可靠的研究资料。

2.2 基于GRACE重力卫星的组合TWSC新模型

为了研究组合方法的可行性,本文分别采用VCE、EWM、CVM对不同机构的GRACE卫星重力场数据反演的TWSC进行定权,建立组合TWSC新模型。图3显示了2003—2014年基于5种GRACE时变重力场模型获得的全球月平均组合TWSC时间序列。对比图1可以看出,3种组合TWSC新模型均能有效反映TWSC的周期性变化,各组合TWSC新模型的波峰、波谷以及变化趋势稳定性也得到了显著改善。其中,如图1和图3黑色虚线框所示,组合模型间的变化趋势最大差异由组合前CSR与ITSG之间的 $0.011 \text{ cm}/\text{月}$ 降低到组合后VCE与EWM之间的 $0.001 \text{ cm}/\text{月}$,最大TWSC振幅差异由组合前ITSG与GFZ之间的 $0.95 \text{ cm}/\text{月}$,减小到组合后EWM与VCE之间的 $0.211 \text{ cm}/\text{月}$ 。由此可见,组合TWSC新模型在大尺度范围上能够显著降低不同模型间的差异。

图4为3种基于GRACE时变重力场的组合TWSC新模型2003—2014年全球TWSC在不同经度处随纬度变化的标准差(图4(a))以及在不同纬度处随经度变化的标准差(图4(b)),其中不同颜色线代表1~113个月的TWSC标准差,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。对比图4和图2可以看出,3种组合TWSC新模型在纬度与经度上的标准差变化都趋于稳定,且图2黑色虚线框显示的JPL模型在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ N、 $0^{\circ} \sim 34^{\circ}$ S、 $0^{\circ} \sim 150^{\circ}$ E、 45° W~ 90° W区域的显著差异消失了,最大差异由组合前超过 20 cm^2 降低到 3 cm^2 以下。该现象证实了组合TWSC新模型可以有效地抑制甚至消除噪声。需要说明的是,文献[36-37]表明JPL模型的精度和可靠性与其他机构模型的差异较小,在有些区域的性能甚至比其他模型更优。然而,图2却显示JPL模型与其他模型之间的差异显著,且相较于其他模型,在局部范围内反演TWSC的效果较差。这是由于本文的研究目的在于评估基于

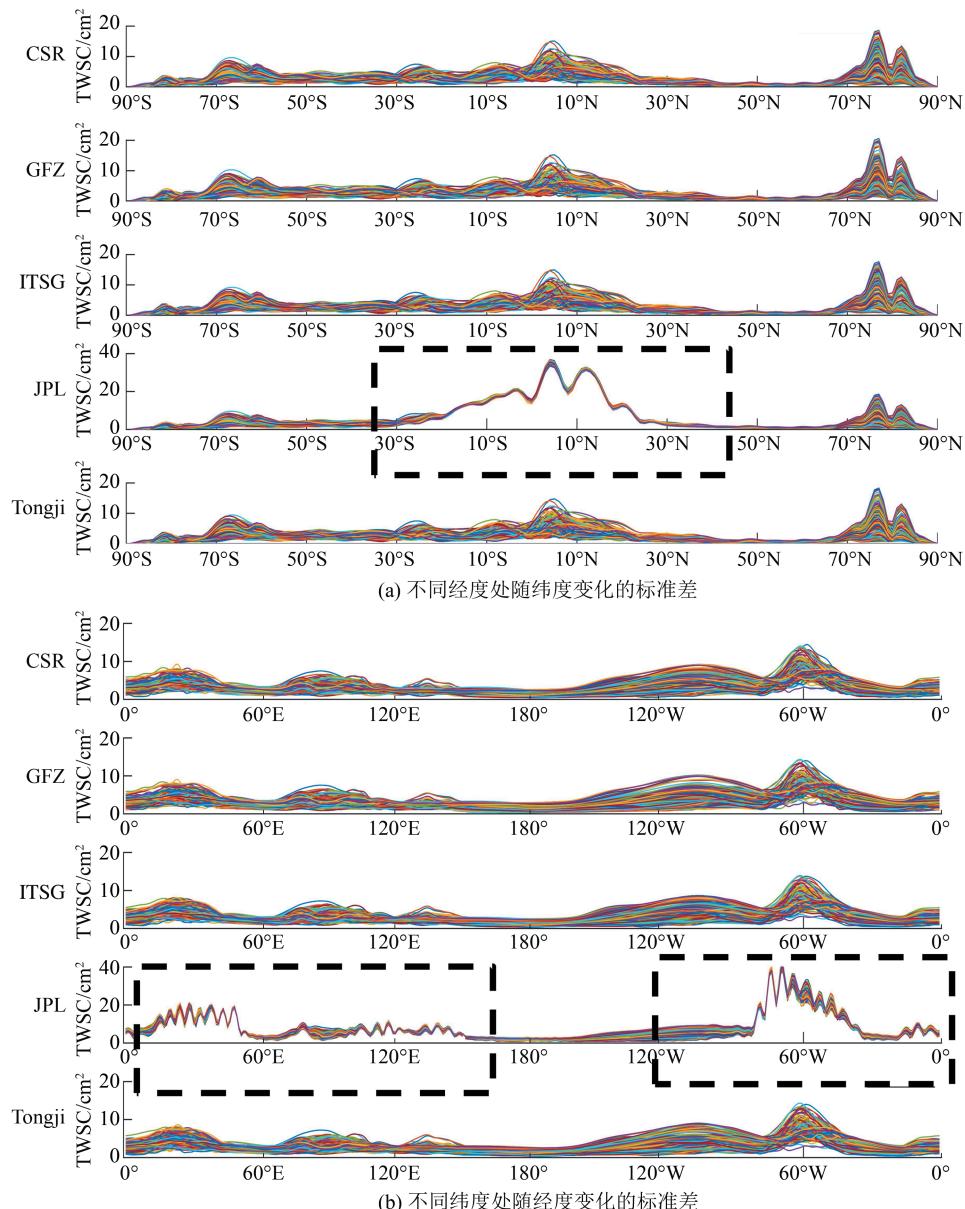


图 2 基于 GRACE 卫星重力场产品反演获得 2003—2014 年间全球 TWSC 的标准差

Fig. 2 Standard Deviation of Global TWSC Derived from GRACE Satellite Gravity Field Products from 2003 to 2014

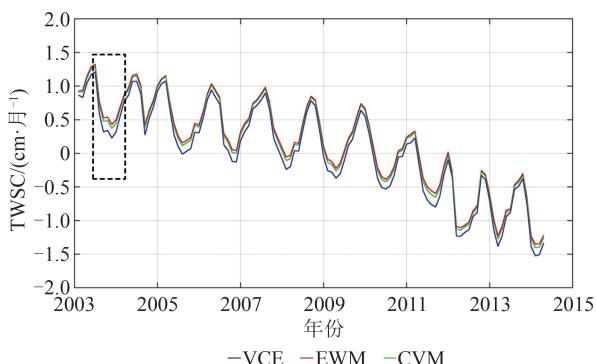


图 3 基于 GRACE 重力卫星的全球月平均组合 TWSC 时间序列

Fig. 3 Global Monthly Averaged Combined TWSC Time Series Derived from GRACE Satellite Gravity Field Models

GRACE 卫星重力的水文模型组合方法的可行性,因此针对组合前所有独立重力场模型都采用了相同的数据处理策略,如 300 km 的高斯滤波、去相关滤波 P4M15 等。鞠晓蕾等^[38]和郭飞霄等^[39]的研究表明,采用相同的处理方法获得的结果差异源于不同机构模型本身的差异,消除这些差异需要采用相应的数据处理策略,针对 JPL 模型 P5M11 去条带误差的效果比较好。由此可以推测,JPL 与其他模型反演获得的 TWSC 差异较大,可能是由于本文针对所有独立模型采用同种滤波方法,且该滤波方法不适用于 JPL 模型造成的。基于卫星重力场的组合 TWSC 新模型可以降低对滤波方法的依赖,并且有效地消除不同机构产品之间由于条带误差或数据处理模型及策

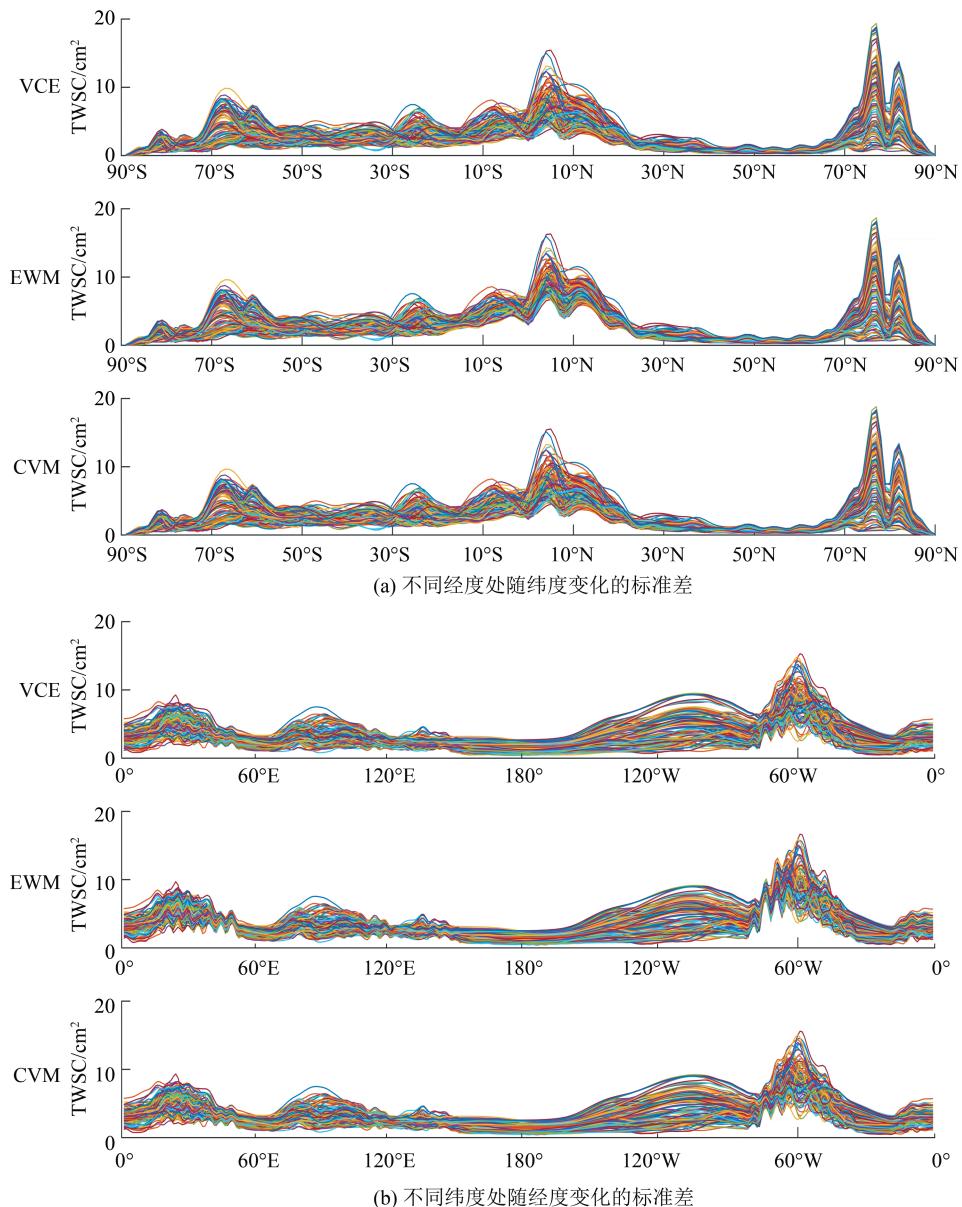


图4 3种基于GRACE时变重力场的组合TWSC新模型2003—2014年间全球TWSC的标准差

Fig. 4 Standard Deviation of Global TWSC for Three Combined TWSC Models Derived from GRACE Satellite Gravity Fields from 2003 to 2014

略造成的差异,能够在不同尺度范围内为使用者提供更加准确的陆地水储量反演结果。

图5描述了根据3种基于GRACE时变重力场的组合TWSC新模型2003—2014年间全球TWSC速率空间分布。由图5可以看出,3种组合TWSC新模型具有非常好的一致性。与原始重力场模型反演结果相比,海洋与陆地的界限更加明显,条带噪声等系统误差对TWSC的影响显著降低,进一步证实了组合TWSC新模型能够抑制条带噪声的结论。

在图5中,本文选取国内外5处热点研究区域进行分析,其中A为中国华北地区,B为中国西北地区,C为亚马逊流域,D为中国长江流域,E

为格陵兰岛。3种组合TWSC新模型在中国华北地区(区域A)的TWSC表现为下降趋势,速率分别为0.052 9 cm/月(VCE)、0.052 4 cm/月(EWM)、0.053 0 cm/月(CVM);在亚马逊流域(区域C)与中国长江流域(区域D)的TWSC都表现为上升趋势,速率分别为0.048 1 cm/月和0.037 1 cm/月(VCE)、0.048 3 cm/月和0.036 9 cm/月(EWM)、0.048 4 cm/月和0.036 7 cm/月(CVM),与文献[26, 40-43]的结论一致;在中国西北地区(区域B)的TWSC呈现下降趋势,速率分别为0.014 2 cm/月(VCE)、0.015 6 cm/月(EWM)、0.015 7 cm/月(CVM),与文献[44]的研究成果一致;在格陵兰岛地区(区域E)的

TWSC 同样呈现下降趋势,速率分别为 0.111 3 cm/月 (VCE)、0.110 7 cm/月 (EWM)、0.110 9 cm/月 (CVM),与文献[45-46]的研究成果一致。综上可知,组合 TWSC 新模型具有较强的适用性,能够为用户研究不同区域的陆地水储量变化提供可靠的数据支持。

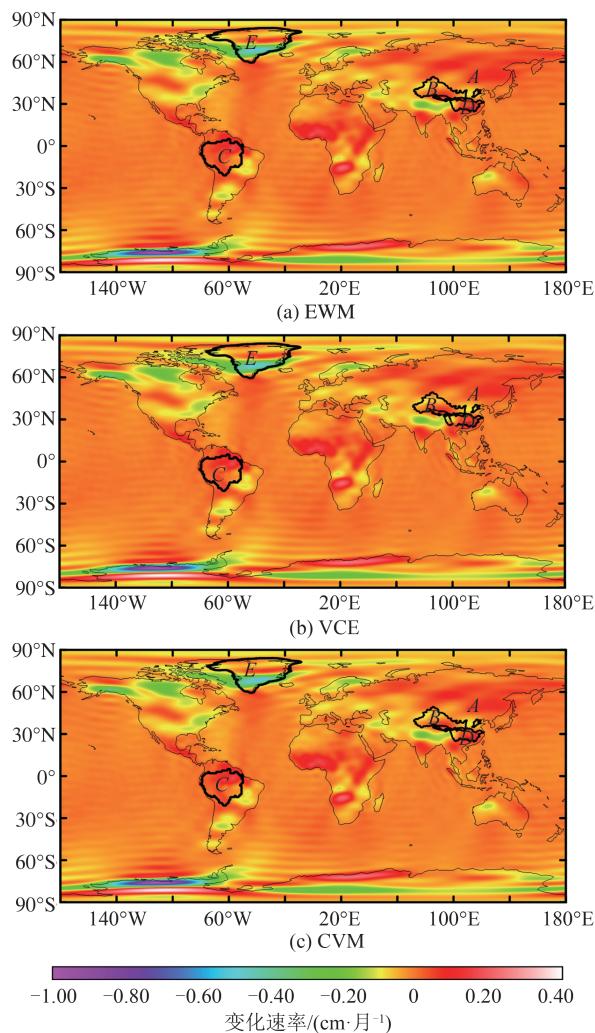


图 5 3 种基于卫星重力场的组合 TWSC 新模型全球 TWSC 速率空间分布

Fig. 5 Global Spatial Distribution of TWSC Velocities for Three Combined TWSC Models Derived from Satellite Gravity Fields

2.3 组合 TWSC 新模型精度评估

2.3.1 基于 GRACE 重力场的组合前后 TWSC 与水文模型对比分析

上述研究证实了组合 TWSC 新模型能够抑制噪声,在不同尺度上相对原始模型都有很好的改进,而且具有较强的全球适用性。为了评估其外符合精度,本文选取 GLDAS 与 MERRA-Land 两种水文模型数据反演全球 TWSC,并与利用 GRACE 卫星重力建立的组合前后 TWSC 模型

进行对比分析。由于 GLDAS 模型缺失 60°S~90°S 的数据,为了保证数据的一致性,组合前后 TWSC 模型也扣除了 60°S~90°S 的数据。需要注意的是,GRACE 反演获得的是包括地表水、土壤水、地下水等在内的全部陆地水储量变化,与本文采用的 GLDAS-2 及 MERRA-Land 水文模型反映的不是同一种信号源,本质上属于整体与部分的关系。利用两者之间的相关性可以作为评估 TWSC 模型有效性的标准,但是其绝对数值没有参考意义,即组合 TWSC 新模型与水文模型之间的相关系数提高,可以认为基于重力场模型的组合 TWSC 新模型较独立模型更优,但并不能说明该模型的绝对精度。

基于 GRACE 时变重力场的组合前后 TWSC 与两种水文模型 2003—2014 年全球月平均 TWSC 如图 6 所示,其相关性如表 1 所示。由图 6 可以看出,基于时变重力场模型与两种水文模型反演的全球 TWSC 在周期性上有较好的一致性,并且波峰与波谷出现的时刻也非常一致。尽管如此,组合前后的结果仍然具有较为明显的差异。如图 6 黑色虚线框所示,3 种基于时变重力场模型的组合 TWSC 新模型较原始模型的一致性显著提高,而且与水文模型的反演结果更为接近。就相关性而言,CSR、GFZ 与两种水文模型之间的相关性最高 (0.8),ITSG、Tongji 次之 (0.7),JPL 最差 (0.4),与图 2 分析结论一致,即 JPL 反演的 TWSC 与其他模型存在较大差异。采用本文方法得到的 3 种基于重力场模型的组合 TWSC 新模型与水文模型之间的相关性较 JPL 显著提高,而且十分接近 (0.7~0.8)。因此,笔者认为,基于 GRACE 时变重力场的组合 TWSC 新模型不仅可以显著提高 TWSC 结果的精度,而且具有较强的稳定性,能够为用户提供更优的全球应用数据。

2.3.2 组合前后 TWSC 模型信噪比分析

由于 GRACE 测量误差在陆地和海洋上大致处于同一水平,陆地水量变化信号强于海洋,本文根据 Chen 等^[30]提出的根据陆地与海洋信噪比最大为准则,计算反演结果的信噪比值,计算式为:

$$R_r = \frac{R(T_l + E)}{R(T_o + E)} \quad (11)$$

式中, R 表示均方根误差 (root mean square, RMS); T_l 、 T_o 分别为重力场模型反演的陆地、海洋区域的陆地水储量变化; E 为通过文献[47]的

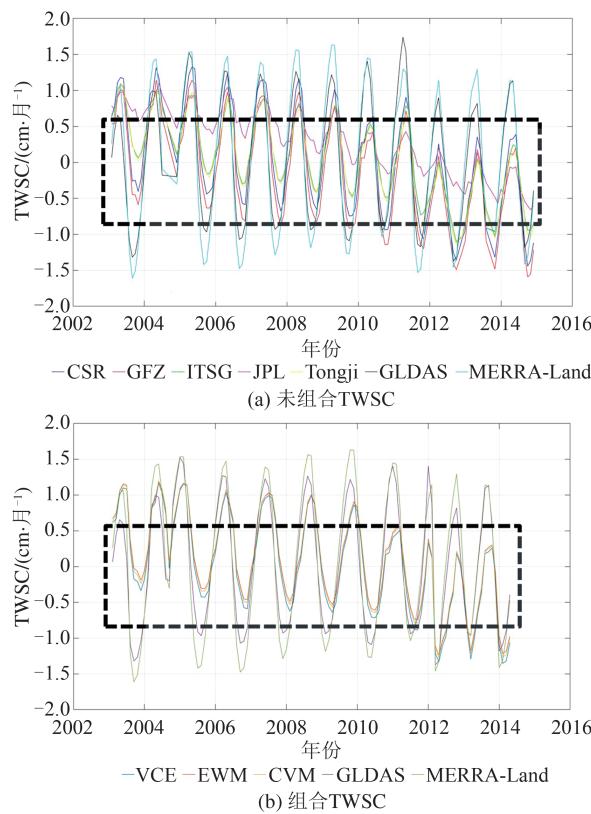


图6 基于GRACE时变重力场的组合前后TWSC与水文模型2003—2014年全球月平均时间序列

Fig. 6 Monthly Mean Time Series of Global Individual and Combined TWSC Obtained from GRACE Satellite Gravitational Field Models Together with Hydrological Models from 2003 to 2014

表1 基于GRACE时变重力场的组合前后TWSC模型与水文模型的相关系数

Tab. 1 Correlation Coefficient Between Hydrological Models and TWSC Derived from GRACE Satellite Gravity Field Models

模型产品	GLDAS	MERRA-Land
CSR	0.8	0.8
GFZ	0.8	0.8
ITSG	0.7	0.7
JPL	0.4	0.4
Tongji	0.7	0.7
EWM	0.8	0.8
CVM	0.8	0.7
VCE	0.8	0.7

方法估算获得的GRACE测量误差; R_r 为模型结果的信噪比值。

为了对各独立模型及组合模型的噪声水平进行分析,本文计算了基于卫星重力场的组合前后全球区域TWSC模型信噪比值以及海洋区域TWSC的RMS,结果如表2所示。由表2可以看

出,组合前的信噪比值存在明显差异,最大为GFZ的(约3.32)、最小为JPL的(1.83),VCE、CVM及EWM组合模型的信噪比(约2.89)较JPL(1.83)模型的提高了约58%。JPL模型的噪声明显高于其他模型,而组合模型噪声水平相同(约为0.04),较JPL模型的削弱了50%,由此进一步证实了TWSC组合方法不仅能够最大程度地保留独立模型的有效信号,而且能够消除模型间的显著差异。从目前的RMS结果来看,组合模型与CSR、GFZ等独立产品反演获得的TWSC相比表现并非最优,用户可以直接选择CSR、GFZ产品进行应用。笔者推测,这是由于目前采用的组合方法比较粗略导致的,如针对所有GRACE模型采用统一的数据处理策略以获取TWSC,但是并未考虑各GRACE模型自身的特点。后续研究中笔者将针对组合方法进行完善,以期能够为用户提供一种最优的选择。

表2 基于卫星重力场的组合前后全球区域TWSC模型信噪比值以及海洋区域RMS

Tab. 2 Signal-to-Noise Ratio of Individual and Combined TWSC Derived from GRACE Satellite Gravity Field Models in Global Region, as Well as RMS of TWSC in Oceanic Region

模型	信噪比	海洋区域RMS/(cm·a⁻¹)
CSR	2.93	0.04
GFZ	3.32	0.03
ITSG	2.90	0.04
JPL	1.83	0.08
Tongji	2.87	0.04
EWM	2.89	0.04
CVM	2.89	0.04
VCE	2.89	0.04

3 结语

随着卫星重力计划的实施和观测数据的积累,国际及国内许多权威机构都面向全球用户提供了GRACE全球卫星重力场模型。然而,由于不同机构采用的重力场恢复方法各异,各有优劣势,而且所采用的数据处理模型及策略也不尽相同,导致现有的GRACE时变重力场模型之间存在差异,精度参差不齐,应用于全球及区域TWSC研究时不具备普适性。本文分别采用VCE、EWM和CVM3种方法,利用CSR、GFZ、JPL、ITSG及Tongji5家机构提供的GRACE时变重力场产品建立了TWSC组合的新模型。研究结果表明,基于GRACE时变重力场的组合前

后 TWSC 全球平均速率差异由 0.011 cm/月下降为 0.001 cm/月, 最大水柱高差异由 0.95 cm 减小为 0.21 cm, $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率尺度下, 随经纬度方向变化的标准差差异由超过 20 cm^2 (JPL) 降低到 3 cm^2 以下。而且, 3 种组合 TWSC 新模型均能够准确地捕捉 TWSC 信号, 在跨度较大的局部区域, 例如中国华北、西北地区以及亚马逊流域, 都有较好的应用效果, 证实了组合 TWSC 新模型可以扬长避短, 有效地抑制甚至消除噪声, 具备较强的全球适用性, 能够在不同尺度范围内为使用者提供更加准确的陆地水储量反演结果。

通过与 GLDAS、MERRA-Land 两种水文模型反演获得的全球 TWSC 对比发现, 3 种组合 TWSC 新模型与水文模型之间的相关性十分接近 ($0.7 \sim 0.8$), 较 JPL 模型 (0.4) 的显著提高, 并且 3 种组合 TWSC 新模型信噪比较 JPL 模型的提高了约 58%, 进一步证实了 TWSC 组合新模型能够减小模型的噪声影响, 基于不同机构时变重力场的组合 TWSC 新模型是一种稳定可靠的高精度卫星重力场应用新模式, 可以为 TWSC 反演等应用研究提供更可靠的基础数据支撑。在后续研究中, 笔者将引入降雨量、GPS 站点时间序列产品等其他数据, 进一步评估基于卫星重力场的组合 TWSC 新模型的精度及应用效果。

参 考 文 献

- [1] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30205–30229.
- [2] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-Vari- able Gravity from GRACE: First Results [J]. *Geo- physical Research Letters*, 2004, 31(11): L11501.
- [3] Rodell M, Famiglietti J S. Detectability of Vari- ations in Continental Water Storage from Satellite Ob- servations of the Time Dependent Gravity Field [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35 (9) : 2705– 2723.
- [4] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth Sys- tem [J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503–505.
- [5] Güntner A. Improvement of Global Hydrological Models Using GRACE Data [J]. *Surveys in Geo- physics*, 2008, 29(4): 375–397.
- [6] Yeh P J F, Swenson S C, Famiglietti J S, et al. Remote Sensing of Groundwater Storage Changes in Illinois Using the Gravity Recovery and Climate Ex- periment (GRACE) [J]. *Water Resources Re- search*, 2006, 42(12): W05374.
- [7] Li Wudong, Guo Jinyun, Chang Xiaotao, et al. Terrestrial Water Storage Changes in the Tianshan Mountains of Xinjiang Measured by GRACE During 2003—2013 [J]. *Geomatics and Information Sci- ence of Wuhan University*, 2017, 42 (7) : 1021– 1026. (李武东, 郭金运, 常晓涛, 等. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003—2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42(7): 1021–1026.)
- [8] Guo Feixiao, Sun Zhongmiao, Ren Feilong, et al. Analysis of Global Water Storage Variation Based on GRACE Time-Vari- able Gravity During 2003— 2013 [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34 (4) : 1298–1302. (郭飞霄, 孙中苗, 任飞龙, 等. 基于 GRACE 时变重力场的 2003—2013 年全球陆地水储量变化分析 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1298–1302.)
- [9] Bettadpur S. Gravity Recovery and Climate Experi- ment UTCSR Level-2 Processing Standards Docu- ment [R]. Austin, USA: University of Texas, 2012.
- [10] Yuan D. JPL Level-2 Processing Standards Docu- ment for Level-2 Product Release 06 [R]. Califor- nia, USA: California Institute of Technology, 2018.
- [11] Chen Q J, Shen Y Z, Chen W, et al. An Optimized Short-Arc Approach: Methodology and Application to Develop Refined Time Series of Tongji- Grace2018 GRACE Monthly Solutions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124 (6): 6010–6038.
- [12] Zhou T, Wen X H, Feng Q, et al. Bayesian Model Averaging Ensemble Approach for Multi-time- ahead Groundwater Level Prediction Combining the GRACE, GLEAM, and GLDAS Data in Arid Areas [J]. *Remote Sensing*, 2022, 15(1): 188.
- [13] Yu B, You W, Fan D M, et al. A Comparison of GRACE Temporal Gravity Field Models Recovered with Different Processing Details [J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 227(2): 1392–1417.
- [14] Jean Y, Meyer U, Jäggi A. Combination of GRACE Monthly Gravity Field Solutions from Dif- ferent Processing Strategies [J]. *Journal of Geode- sy*, 2018, 92(11): 1313–1328.
- [15] Jäggi A, Weigelt M, Flechtner F, et al. European Gravity Service for Improved Emergency Manage- ment (EGSIEM): From Concept to Implementation [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 218

- (3): 1572-1590.
- [16] Wang F W, Shen Y Z, Chen Q J, et al. Reduced Disclosure of Global Sea-level Budget with Updated Tongji-Grace2018 Solution [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 17667.
- [17] Bibi S, Song Q H, Zhang Y P, et al. Effects of Climate Change on Terrestrial Water Storage and Basin Discharge in the Lancang River Basin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 37: 100896.
- [18] Meyer U, Jean Y, Kvas A, et al. Combination of GRACE Monthly Gravity Fields on the Normal Equation Level [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93 (9): 1645-1658.
- [19] Peter H, Meyer U, Lasser M, et al. COST-G Gravity Field Models for Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiting Satellites [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(12): 4155-4168.
- [20] Zhong Bo, Luo Zhicai, Li Jiancheng, et al. Spectral Combination Method for Recovering the Earth's Gravity Field from High-Low SST and SGG Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 735-742. (钟波, 罗志才, 李建成, 等. 联合高低卫-卫跟踪和卫星重力梯度数据恢复地球重力场的谱组合法 [J]. 测绘学报, 2012, 41 (5): 735-742.)
- [21] Zhou Hao, Luo Zhicai, Zhong Bo, et al. MPI Parallel Algorithm in Satellite Gravity Field Model Inversion on the Basis of Least Square Method [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(8): 833-839. (周浩, 罗志才, 钟波, 等. 利用最小二乘直接法反演卫星重力场模型的MPI并行算法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(8): 833-839.)
- [22] Rebischung P, Garayt B. Recent Results from the IGS Terrestrial Frame Combinations [M]//Reference Frames for Applications in Geosciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 69-74.
- [23] Altamimi Z, Sillard P, Boucher C. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B10): ETG2-1.
- [24] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, et al. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (B9): B09401.
- [25] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 457-473.
- [26] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2005 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by GRACE and Estimated by Climate Models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (B5): B05404.
- [27] Ramillien G, Lombard A, Cazenave A, et al. Interannual Variations of the Mass Balance of the Antarctica and Greenland Ice Sheets from GRACE [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 53 (3): 198-208.
- [28] Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, et al. Analysis of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE and GLDAS [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): W02433.
- [29] Han D Z, Wahr J. The Viscoelastic Relaxation of a Realistically Stratified Earth, and a Further Analysis of Postglacial Rebound [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 120(2): 287-311.
- [30] Chen J L, Wilson C R, Seo K W. Optimized Smoothing of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-Varying Gravity Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B6): B06408.
- [31] Li Xia, Gao Yanhong, Wang Wanzhao, et al. Climate Change and Applicability of GLDAS in the Headwater of the Yellow River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 531-540. (李霞, 高艳红, 王婉昭, 等. 黄河源区气候变化与GLDAS数据适用性评估 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 531-540.)
- [32] Rodell M, Chen J L, Kato H, et al. Estimating Groundwater Storage Changes in the Mississippi River Basin (USA) Using GRACE [J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(1): 159-166.
- [33] Zhang Qin, Zhang Juqing, Yue Dongjie, et al. Advanced Theory and Application of Surveying Data [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011. (张勤, 张菊清, 岳东杰, 等. 近代测量数据处理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2011.)
- [34] Zhang J J, Song Y, Xi F Z. Application of Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Method in Water Burst Evaluation of Coal Seam Floor [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(11): 200-203.
- [35] Boergens E, Kvas A, Eicker A, et al. Uncertainties of GRACE-based Terrestrial Water Storage Anomalies for Arbitrary Averaging Regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(2): B022081.
- [36] Kvas A, Behzadpour S, Ellmer M, et al. ITSG-

- Grace2018: Overview and Evaluation of a New GRACE-Only Gravity Field Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9332-9344.
- [37] Luo Zhicai, Zhong Bo, Zhou Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1713-1727. (罗志才, 钟波, 周浩, 等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1713-1727.)
- [38] Ju Xiaolei, Shen Yunzhong, Zhang Zizhan. Antarctic Ice Mass Change Analysis Based on GRACE RL05 Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 2918-2927. (鞠晓蕾, 沈云中, 张子占. 基于 GRACE 卫星 RL05 数据的南极冰盖质量变化分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2918-2927.)
- [39] Guo Feixiao, Sun Zhongmiao, Wang Feifei, et al. Review of GRACE Satellites Time-variable Gravity Filtering Methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 1783-1788. (郭飞霄, 孙中苗, 汪菲菲, 等. GRACE 卫星时变重力场滤波方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 1783-1788.)
- [40] Zhou Zhibo, Liu Jie, Yang Chao, et al. The Variation of Terrestrial Water Storage in North China Based on GRACE Gravity Satellite [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2020, 18(5): 66-73. (周志博, 刘杰, 杨超, 等. GRACE 重力卫星探究我国华北地区陆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 66-73.)
- [41] Feng Wei, Lemoine J M, Zhong Min, et al. Terrestrial Water Storage Changes in the Amazon Basin Measured by GRACE During 2002—2010[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 814-821. (冯伟, Jean-Michel LEMOINE, 钟敏, 等. 利用重力卫星 GRACE 监测亚马孙流域 2002—2010 年的陆地水变化[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 814-821.)
- [42] Wang Wei, Li Weiwei, Wang Fengwei. Terrestrial Water Storage Variations in Yangtze River Basin Based on Tongji-Grace 2018 Temporal Gravity Field Model [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(10): 110-115. (王微, 李伟伟, 王奉伟. 利用 GRACE 模型反演长江流域陆地水储量的变化[J]. 人民长江, 2020, 51(10): 110-115.)
- [43] Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, et al. Gainers and Losers of Surface and Terrestrial Water Resources in China During 1989—2016 [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3471.
- [44] Xu Zijun, Yin Lihe, Hu Fusheng, et al. Spatial and Temporal Variations of Terrestrial Water Storage in Northwest China During 2002—2015 [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 16(4): 314-320. (徐子君, 尹立河, 胡伏生, 等. 2002—2015 年西北地区陆地水储量时空变化特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(4): 314-320.)
- [45] Shepherd A, Ivins E, Rignot E, et al. Mass Balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018 [J]. *Nature*, 2020, 579(7798): 233-239.
- [46] Gao Yu, Wang Zhengtao, Li Fupeng, et al. The Spatio-temporal Feature of Greenland Mass Changes as Determined by GRACE, Swarm, and GRACE-FO [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(7): 2405-2416. (高瑀, 王正涛, 李夫鹏, 等. 联合 GRACE、Swarm、GRACE-FO 卫星观测确定格陵兰岛冰盖质量时空变化特征[J]. 地球物理学报, 2021, 64(7): 2405-2416.)
- [47] Wahr J, Swenson S, Velicogna I. Accuracy of GRACE Mass Estimates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6): L06401.