GRACE/GRACE-FO 反演全球海洋质量变化的后处理因子分析

韩文雅, 李伟伟*

（山东科技大学测绘与空间信息学院，山东 青岛 266590）

摘　要：时变重力场是反演海洋质量变化的重要手段，全面评估时变重力场后处理策略对于准确获取海洋质量变化十分必要。本文使用重力恢复与气候实验卫星（Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE）及其后续卫星（GRACE Follow-On, GRACE-FO）重力场数据反演全球平均海洋质量变化，主要评估数据后处理中 C_{20} 替换、冰川均衡调整、信号泄漏误差改正产生的影响，同时量化球谐系数不同截断阶数对反演海洋质量变化的贡献。结果表明：原始 C_{20} 的稳定性较差，其估计的海洋质量变化速率虚高，可采用戈达德航天中心提供的 C_{20} 替换；5 种 GIA 模型改正值差异明显，其中 Caron18 模型改正值较大；对于信号泄漏误差改正，海洋质量变化速率随缓冲区增大而增大，在距海岸线 300 km 范围内的海域信号泄漏严重，建议选择与海岸线距离至少为 300 km 的缓冲区；从截断阶数来看，截断阶数小于 30 时，估计的海洋质量变化速率和周年振幅相差较大，验证了低阶系数的重要性。而 40 阶的球谐系数累积趋势和周年振幅贡献率高达 98.56% 和 98.79%，可见高于 40 阶截断阶数的贡献率非常小。

关键词：GRACE/GRACE-FO；海洋质量变化；C_{20} 替换；GIA 改正；泄漏误差改正；阶数贡献

中图分类号：P31　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-6647（2025）03-0585-11

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20240302001

引用格式： 韩文雅, 李伟伟, 2025. GRACE/GRACE-FO 反演全球海洋质量变化的后处理因子分析[J]. 海洋科学进展, 43(3): 585-595. HAN W Y, LI W W, 2025. Post-processing factors analysis of global ocean mass inversion by GRACE/GRACE-FO[J]. Advances in Marine Science, 43(3): 585-595.

海平面变化是全球气候和环境变化的重要指标，海平面的持续上升是备受关注的全球热点问题（Church et al, 2011）。海平面变化由海洋质量变化和海水比容变化组成（Hamlington et al, 2020），而全球平均海平面上升的 2/3 是由海洋质量增加导致的，因此海洋质量变化是影响海平面变化的主导因素（徐天河等, 2022b）。精确估计海洋质量变化是海平面变化分析与预测的关键。海洋质量变化可借助卫星测高、海洋温盐、陆地降水量等海洋和水文数据进行间接估计，但由于所用模型和数据都存在很大的不确定性，估计的海洋质量变化精度较低（Cazenave et al, 2004）。自 2000 年重力恢复与气候实验卫星（Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE）成功发射，其观测的高精度、大尺度地球时变重力场信息可直接量化海洋质量变化（Tapley et al, 2019）。2018 年后续卫星（GRACE Follow-On, GRACE-FO）的成功接替，为量化海洋质量变化提供了连续性的数据支撑。

然而，使用重力卫星数据精确量化全球平均海洋质量变化具有一定的挑战性（Chen et al, 2021），

收稿日期：2024-03-02　　**网络首发日期：**2024-11-14

资助项目：国家自然科学青年基金项目（41904011）；山东省自然科学基金面上项目（ZR2024MD092）

作者简介：韩文雅（1998—），女，硕士研究生，主要从事时变重力场反演海洋质量变化方面研究. E-mail: 1992866700@qq.com

*** 通信作者：**李伟伟（1986—），女，讲师，博士，硕士生导师，主要从事时变重力场反演及其应用方面研究. E-mail: whereareou@126.com

（责任编辑　陈　靖）

主要在于 GRACE 数据反演时涉及多个后处理因子的选择和修正，具体包括地心运动改正、低阶项替换、全球平均大气质量改正、冰川均衡调整改正、高频误差处理、相关性误差处理、信号泄漏误差改正、反变气压校正等。目前已有学者针对不同后处理方式提出了相应的模型和方法，例如，针对改正地心运动，Swenson 等（2008）和 Sun 等（2016）提供了基于不同解算策略的一阶项；对于 C_{20} 替换，Cheng 等（2013）和 Loomis 等（2019）利用卫星激光测距（Satellite Laser Ranging, SLR）解算了不同的 C_{20} 系数；而泄漏误差的改正主要采用缓冲区法（Zhou et al, 2016）和正向建模法（Chen et al, 2015）。可见，后处理因子可选择不同的数据源和不同的处理策略。综合来看，后处理具有多样性和复杂性，这也造成了 GRACE 反演结果存在差异性和不确定性。汪秋昱等（2022）分析了不同滤波处理方法对海洋质量变化的影响，江敏等（2013）讨论了不同 GIA 模型对全球海洋质量变化的影响。刘书豪等（2023）通过对后处理方法和模型修正的组合，探讨了 GRACE 研究海洋质量变化的不确定度。

以上这些研究多聚焦某一后处理因子的影响，且缺少后处理因子的时空分析。此外，不同截断阶数对海平面变化的贡献目前尚未提及。基于此，本文全面评估了不同 C_{20} 系数、不同 GIA 模型、不同泄漏误差改正参数以及定量分析不同截断阶数对海洋质量变化的贡献，同时反演了近 20 年的海洋质量变化，从长时间尺度分析各因素对海洋质量变化的影响，为 GRACE 时变重力数据应用于海平面变化提供参考。

1 数据与处理方法

1.1 GRACE 及 GRACE-FO 时变重力场数据

本文使用美国德克萨斯大学空间研究中心（Center for Space Research, CSR）提供的 60 阶次 GRACE 及 GRACE-FO 月时变重力场球谐系数产品（RL06），时间跨度分别为 2002 年 4 月至 2017 年 6 月和 2018 年 6 月至 2022 年 12 月。该数据可以从国际全球地球模型中心（International Centre for Global Earth Models, ICGEM）网站（http://icgem.gfz-potsdam.de）下载。由于卫星测量故障、GRACE 卫星退役及 GRACE-FO 任务接替等，该时段内时变重力场模型数据缺失 35 个月（其中 GRACE 服务期缺失 22 个月、间断期 11 个月、GRACE-FO 阶段缺失 2 个月），对应的数据分布见图 1。由于解算重力场模型时扣除了固体潮、海潮、极潮、非潮汐大气和高频海洋信号，该数据反映的是地表及内部质量重新分布引起的时变重力信号（冯贵平等, 2018; Blazquez et al, 2018）。

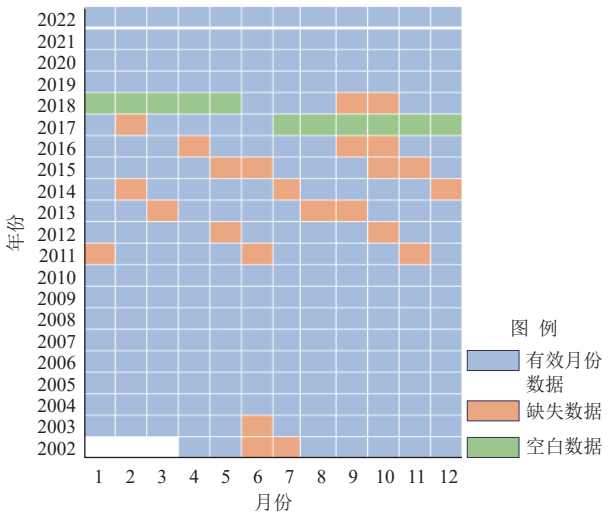


图 1 研究时间段内 GRACE 及 GRACE-FO 数据情况

Fig. 1 GRACE and GRACE-FO data status during the investigated period

1.2 GRACE/GRACE-FO 数据处理

利用式（1）反演确定等效水柱高 $\Delta h(\theta,\lambda)$ 表示的海洋质量变化（Wahr et al, 1998）：

$$\Delta h(\theta,\lambda)=\frac{a\rho_{\mathrm{e}}}{3\rho_{\mathrm{w}}}\sum_{l=0}^{60}\sum_{m=0}^{l}\frac{2l+1}{1+k_l}\left[\Delta C_{lm}\cos(m\lambda)+\Delta S_{lm}\sin(m\lambda)\right]P_{lm}(\cos\theta),\tag{1}$$

式中：θ、λ 分别为余纬和经度；a 为地球平均半径；ρ_{e} 为地球平均密度（取 5 517 kg/m^3）；ρ_{w} 为水密

度(取 1 000 kg/m^3)；l、m 分别为阶数和次数；k_l为 l 阶负荷勒夫数；ΔC_{lm}和ΔS_{lm}表示每月球谐系数扣除所有月份球谐系数平均值以移除重力场背景变化；$P_{lm}(\cos\theta)$为完全归一化勒让德函数。

本文使用 GRACE/GRACE-FO 重力数据反演全球海洋质量变化采取的后处理主要包括：①回加 GAD 数据，同时扣除海洋上平均大气质量(Uebbing et al, 2019)；②采用 Sun 等(2016)提供的地心运动变化模型恢复 GRACE/GRACE-FO 数据缺失的一阶项；③使用 SLR 数据解算的 C_{20} 替换 GRACE/GRACE-FO 数据中精度较低的 C_{20} 项(Velicogna et al, 2013)；④由于 GRACE-FO 的 C_{30} 系数包含较大噪声，自 2018 年 10 月开始使用戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)提供的 C_{30} 进行替换(Loomis et al, 2020)；⑤基于 GIA 模型改正 GIA 影响(Vishwakarma et al, 2022)；⑥采用 P4M6 去相关(Chen et al, 2008)和 300 km 高斯滤波(冯伟等, 2014)消除重力场模型中的条带误差和高阶噪声误差；⑦为避免泄漏改正方法本身带来误差，采用较为直接的“缓冲区”(Buffer Zone，表示与海岸线距离不同的海洋区域)方法修正陆地信号泄漏(徐天河等, 2022a)。计算空间分辨率为 1°×1°的海洋区域格网质量变化，对其进行面积加权得到全球平均海洋质量变化时间序列。为保持序列的连续性，采用奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)方法插值填补 35 个缺失月份的海洋质量变化(Yi et al, 2021)。

2　结果分析

2.1　低阶 C_{20} 系数的影响

因卫星轨道设计等因素导致 GRACE 解算的地球重力场 C_{20} 系数存在较大误差，通常考虑使用 SLR 数据解算的 C_{20} 进行替换(King et al, 2012)。然而不同机构采用的数据处理策略不同，造成 C_{20} 存在差异，进行 C_{20} 替换后估计的海洋质量变化也受影响。图 2 为扣除相同大气海洋等背景场信息的 C_{20} 系数距平值后的序列分布，包括原始 C_{20}(CSR_RL06 C_{20})、CSR 解算的 CSR_SLR C_{20}(Cheng et al, 2018)、TN11E_SLR C_{20}(Cheng et al, 2023)和 GSFC 解算的 TN14_GSFC_SLR C_{20}(Loomis et al, 2020)。可以看出，CSR_RL06 C_{20} 系数的波动幅度明显大于 SLR C_{20} 系数的波动幅度，尤其在 GRACE 数据质量较差的 2017 年(Chen et al, 2019)。由此说明 SLR C_{20} 比 GRACE/GRACE-FO C_{20} 的稳定性强，这主要是因为 SLR 为空间分辨率高的高轨卫星，其能更准确监测地球扁率及其变化(穆大鹏等, 2018)，且 GRACE/GRACE-FO 更易受潮汐混叠误差影响(Chen et al, 2010, 2016)。而 3 种 SLR C_{20} 的变化较一致，相比之下，TN14_GSFC_SLR C_{20} 系数的波动幅度最小。

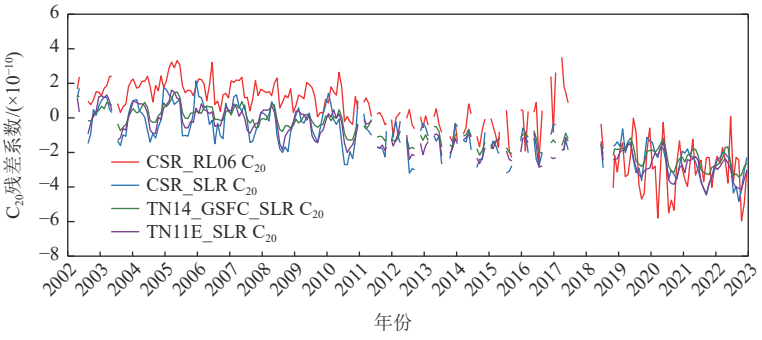


图 2　C_{20} 系数扣除均值后的序列

Fig. 2　C_{20} coefficients residuals after deducting the mean value

从上述 C_{20} 系数反演并使用 SSA 方法填补后的海洋质量变化序列(图 3)可以看出，4 个序列均呈现上升趋势，2017 年前 CSR_RL06 C_{20} 与 SLR C_{20} 序列的变化基本一致，但在 2017 年和 2019 年出现

显著差异，主要是由于 GRACE 卫星后期发生故障（Chang et al, 2022）及 GRACE-FO 卫星不稳定造成的（Chen et al, 2020）。为了定量分析不同 C_{20} 系数对估计全球海洋质量变化的影响，基于最小二乘原理通过式（2）对序列拟合：

$$f(t)=a_0+a_1(t-t_0)+a_2\cos[2\pi(t-t_0)]+a_3\sin[2\pi(t-t_0)]+a_4\cos[4\pi(t-t_0)]+a_5\sin[4\pi(t-t_0)]+\varepsilon_t, \quad (2)$$

式中：t_0为参考时间，选取研究时段内的第一个月（2002 年 4 月）；a_0为常数项；a_1为趋势项；a_2和a_3为海洋质量变化的周年系数；a_4和a_5为半周年系数；ε_t为误差项。

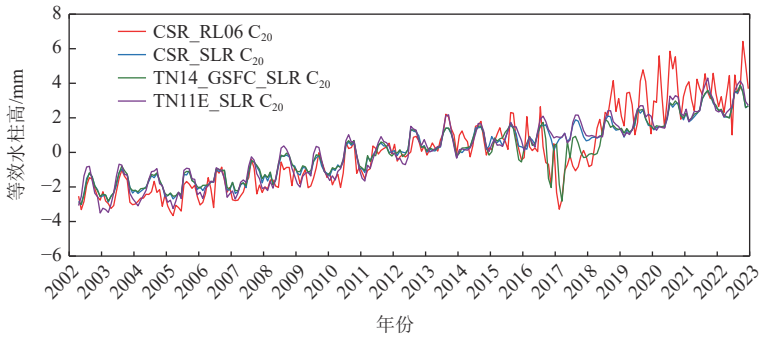


图 3 奇异谱分析方法填补后的 C_{20} 海洋质量变化序列

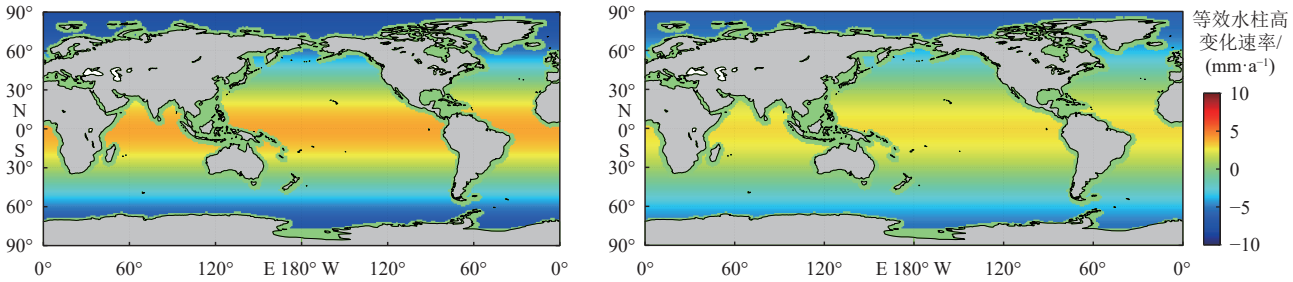
Fig. 3 C_{20} ocean mass change series after filling SSA

分析不同 C_{20} 反演的海洋质量变化线性趋势、周年和半周年系数（表 1）（95% 的置信区间）可知，采用 GRACE 自身的 C_{20} 反演的趋势为（0.32±0.02）mm/a，明显大于 SLR C_{20} 反演结果。从空间分布上来看，采用 GRACE 自身的 C_{20} 反演结果在低纬度地区的速率值更大、在高纬度地区数值更小（图 4）。与 Chen 等（2018）和 Wang 等（2022）的结论一致，都表明当保留 GRACE C_{20} 系数时，反演的全球海洋质量变化速率偏高。而采用不同 SLR C_{20} 反演确定的趋势较为一致，其中趋势值最小的数据源为 TN14_GSFC_SLR C_{20}。考虑到与 C_{30} 替换时数据源的一致性，建议选择 TN14_GSFC_SLR C_{20} 进行替换。

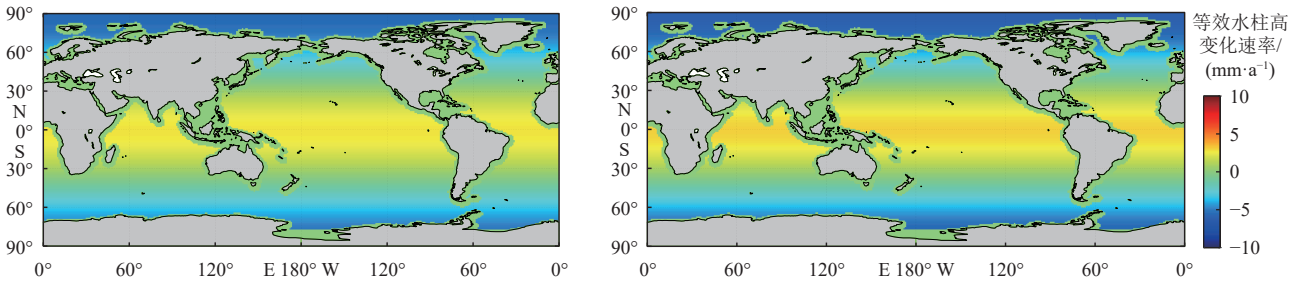
表 1 仅 C_{20} 数据反演的海洋质量变化序列信号

Table 1 Ocean mass signal inversed from C_{20}-only

数据源	变化趋势/(mm·a^{-1})	周年振幅/mm	周年相位/(°)	半周年振幅/mm	半周年相位/(°)
CSR_RL06	0.32±0.02	0.58±0.19	317.5±12.4	0.29±0.19	162.3±38.7
CSR_SLR	0.25±0.01	0.60±0.06	319.2±4.4	0.23±0.06	186.0±13.9
TN14_GSFC_SLR	0.24±0.01	0.63±0.11	324.1±9.5	0.25±0.11	204.1±24.5
TN11E_SLR	0.27±0.01	0.86±0.07	320.5±4.0	0.24±0.07	191.9±15.9



(a) CSR_RL06 C_{20} (b) CSR_SLR C_{20}



(c) TN14 GSFC_SLR C_{20}　　(d) TN11E_SLR C_{20}

图 4　仅 C_{20} 系数反演的海洋质量变化速率空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of ocean mass change rates inversed with C_{20}-only coefficients

2.2　冰川均衡调整的影响

通过不同冰模型和地球模型建立的 GIA 模型所获得的海洋质量变化改正值存在差异，并且后处理方法也会对其产生影响。比较 5 种 GIA 模型在不同滤波半径(表 2)和缓冲区(表 3)的改正值，包括 Caron18(Caron et al, 2018)、Geruo13(Geruo et al, 2013)、ICE-5G(VM2_L90)(Peltier, 2004)、ICE-6G_C(VM5a)(Peltier et al, 2015)和 ICE-6G_D(VM5a)(Peltier et al, 2018)，从中明显发现，不同 GIA 模型在同一滤波半径/缓冲区的改正值不同，同一种 GIA 模型在不同滤波半径/缓冲区时的改正值也有差异。其中随着高斯滤波半径的增加(0、300、500 km)，GIA 模型改正值逐渐减小，说明较大的滤波半径会导致 GIA 信号泄漏。对于不同缓冲区(距海岸线 0～500 km)，随着其与海岸线距离的增加，GIA 模型改正值先增大后减小，当距离为 300 km 时，改正值最大。比如 Caron18 模型在距离为 0 km 和 300 km 的缓冲区的改正值分别约为−1.06 mm/a 和−1.35 mm/a，相差−0.29 mm/a。无论采用哪种策略，5 种模型中 Caron18 模型的海洋质量变化改正值均为最大。考虑到 Caron18 模型是由多个模型进行加权平均集成得到的(Horwath et al, 2022)，可信度更高，所以在计算海洋质量变化时，可优先选用 Caron18 模型和与海岸线距离为 300 km 的缓冲区，同时为避免引入误差，GIA 模型的滤波半径应与 GRACE 的一致。

表 2　不同高斯滤波半径下 GIA 模型全球海洋质量变化速率改正值

Table 2　Global ocean mass change rate with GIA corrected at different Gaussian filter radius　mm·a^{-1}

数据源	高斯滤波半径		
	0 km	300 km	500 km
Caron18	−1.06	−0.96	−0.87
Geruo13	−0.98	−0.88	−0.80
ICE-5G	−1.05	−0.95	−0.86
ICE-6G_C	−1.00	−0.86	−0.76
ICE-6G_D	−0.88	−0.76	−0.68

表 3　与海岸线距离不同时 GIA 模型全球海洋质量变化速率改正值

Table 3　Global ocean mass change rate of GIA model with different distances from the coastline　mm·a^{-1}

数据源	缓冲区与海岸线距离		
	0 km	300 km	500 km
Caron18	−1.06	−1.35	−1.34
Geruo13	−0.98	−1.18	−1.09
ICE-5G	−1.05	−1.30	−1.20
ICE-6G_C	−1.00	−1.25	−1.14
ICE-6G_D	−0.88	−1.07	−0.99

2.3　信号泄漏改正的影响

为了量化不同缓冲区对全球海洋质量变化的影响，基于 GRACE/GRACE-FO 数据在未进行泄漏改正(0 km)和分别采用与海岸线不同距离(100、200、300、400、500 km)的缓冲区改正的情况下，

进行估算，得到 2002 年 4 月至 2022 年 12 月海洋质量变化时间序列(图 5)。其他后处理因子见 1.2 节，其中 C_{20} 系数采用 TN14_GSFC_SLR C_{20}、GIA 改正采用 Caron18 模型。从中可以看出，不同序列变化基本一致，且随与海岸线之间距离的增大，变化速率和周期振幅均呈现增大趋势。分析采用不同缓冲区修正时周年、半周年系数以及趋势估值(表 4)可知，当与海岸线的距离从 0 外扩至 300 km 时，海洋质量变化速率增加了 0.79 mm/a(61.24%)、周年振幅增加了 1.81 mm(22.29%)，而从 300 增至 500 km 时，其增速较缓慢，仅增加了 0.16 mm/a(7.69%)和 0.47 mm(4.73%)。对比分析可知，300 km 内陆海信号泄漏比较严重。泄漏改正前后的差值序列(图 6)表现出较强的趋势和周期振荡，表明不进行泄漏改正会造成趋势和周期信号的低估。因此，反演海洋质量变化时必须进行泄漏改正，且至少选择与海岸线相距 300 km 的缓冲区。

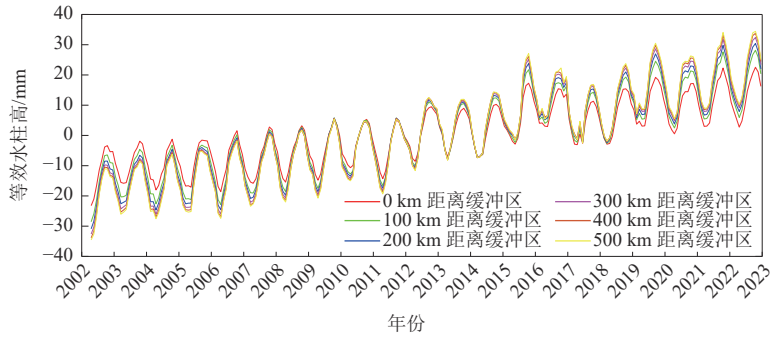


图 5 不同缓冲区改正后的全球海洋质量变化序列

Fig. 5 Global ocean mass after leakage correction at different Buffer Zones

表 4 不同缓冲区改正后海洋质量变化序列信号

Table 4 Ocean mass signal from different Buffer Zones corrected

与海岸线的距离/km	趋势/(mm·a^{-1})	周年振幅/mm	周年相位/(°)	半周年振幅/mm	半周年相位/(°)
0	1.29±0.04	8.12±0.37	276.8±2.6	0.34±0.37	242.1±62.0
100	1.71±0.05	9.30±0.44	279.6±2.7	0.45±0.44	231.6±61.8
200	1.92±0.06	9.63±0.47	281.4±2.8	0.45±0.47	234.0±62.7
300	2.08±0.06	9.93±0.50	281.7±2.9	0.47±0.50	230.3±69.6
400	2.18±0.06	10.20±0.52	281.8±2.9	0.51±0.52	227.9±80.4
500	2.24±0.06	10.40±0.53	281.4±3.0	0.56±0.53	229.0±68.0

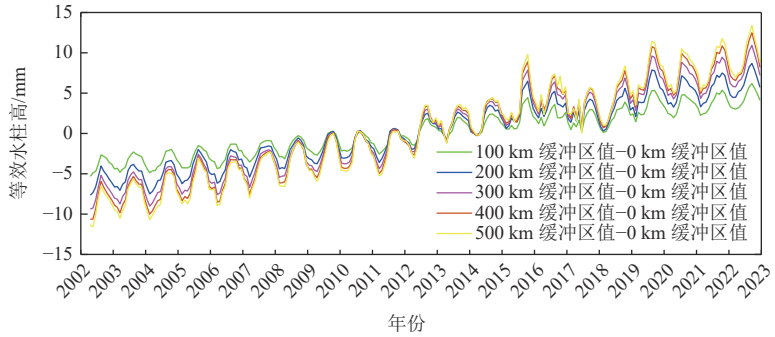


图 6 泄漏改正前后(5 种不同缓冲区)全球海洋质量变化序列差异

Fig. 6 Differences of global ocean mass changes before and after leakage correction (five Buffer Zones)

2.4　不同阶球谐系数的贡献率

截断阶数越高的 GRACE 球谐系数含有更多的重力场细节信息，量化不同截断阶数的质量变化可以获取其对海洋质量变化的贡献。本节将 GRACE/GRACE-FO 球谐系数分别截断到 20、30、40、50、60 阶，其他后处理因子方法和修正见 1.2 节，具体使用 TN14_GSFC_SLR C_{20} 进行 C_{20} 替换、Caron18 模型改正 GIA 影响以及在 300 km 缓冲区进行信号泄漏改正，获得海洋质量变化序列(图 7)，可见当截断阶数为 40 阶时序列已趋近于 60 阶反演序列。分析序列中趋势、周年振幅及贡献率(表 5)可知，当截断阶数从 20 阶开始每增加 10 阶，趋势分别增加了约 0.11、0.02、0.02、0.01 mm/a；当截断阶数小于 30 时，估计的海洋质量变化速率相差较大，反映了低阶系数的重要性；截断阶数为 40 阶时，趋势贡献率可达 98.56%，40 阶之后的贡献率仅有 1.44%。同时，随截断阶数递增，周年振幅也呈现类似的变化，30 阶与 20 阶的振幅相差最大，约为 0.13 mm，40 阶的振幅贡献率也高达 98.79%。因此从趋势和周年信号的贡献率来看，可以认为 40 阶的重力场能够满足海洋质量反演的精度。

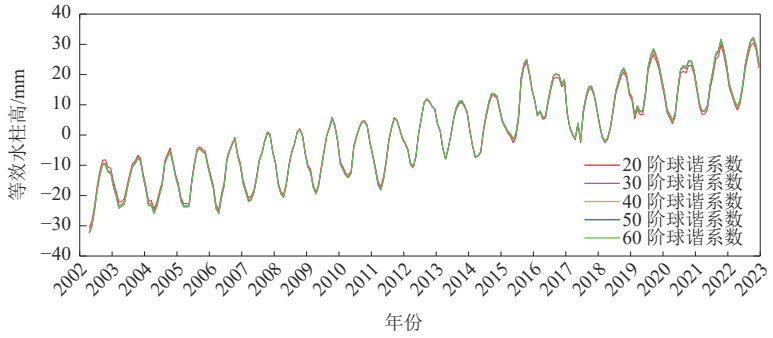


图 7　不同阶球谐系数反演的全球海洋质量变化序列(距海岸线 300 km 的缓冲区)

Fig. 7　The global ocean mass change series (300 km Buffer Zone) inversed with different degrees spherical harmonic coefficients

表 5　不同阶球谐系数反演的海洋质量变化趋势、振幅及贡献率

Table 5　Linear trends, annual amplitudes and their contributions derived from ocean mass inversed with different degrees spherical harmonic coefficients

截断阶数	趋势/(mm·a^{-1})	趋势贡献率/%	周年振幅/mm	周年振幅贡献率/%
20 阶	1.92±0.06	92.31	9.59±0.48	96.58
30 阶	2.03±0.06	97.60	9.72±0.50	97.89
40 阶	2.05±0.06	98.56	9.81±0.50	98.79
50 阶	2.07±0.06	99.52	9.87±0.50	99.40
60 阶	2.08±0.06	100	9.93±0.50	100

3　结　论

GRACE 和 GRACE-FO 月时变重力场数据反演全球海洋质量变化时的数据后处理因子主要集中于低阶替换(一阶项、C_{20}、C_{30})、GIA 改正、滤波等造成的泄漏误差和截断阶数的影响。本文未考

虑组合影响，重点对单一因子进行评估验证，讨论了 4 种 C_{20}、5 种 GIA 模型、6 种不同缓冲区对计算全球海洋质量变化的影响，并且量化了不同截断阶数对海洋质量变化的贡献，得到以下主要结论。

1)虽然 3 种 SLR C_{20} 解算时采用的 SLR 卫星数目不同，且解算策略不一致，但时域和空域上的反演结果相差不大。而相对于 SLR C_{20}，重力卫星解算的 C_{20} 稳定性较差且估计的海洋质量变化速率明显更高。结合 C_{30} 数据源的一致性和 C_{20} 残差序列的波动幅度，建议选 TN14_GSFC_SLR C_{20} 进行替换。

2)不同 GIA 模型及其后处理方法(滤波半径和缓冲区大小)均会影响 GIA 改正值。滤波半径逐渐增大会使 GIA 信号产生泄漏，而不同缓冲区引起的 GIA 模型改正值有明显差异，采用与海岸线距离为 300 km 的缓冲区时 GIA 改正值最大。5 种 GIA 模型中，Caron18 模型的海洋质量变化改正值较大且集合多种模型构建而成，所以建议选用 Caron18 模型、与海岸线相距 300 km 的缓冲区、与 GRACE 相同的滤波半径进行 GIA 改正。

3)随缓冲区与海岸线距离的延伸，GRACE 和 GRACE-FO 估计的海洋质量变化速率逐渐增大。若不进行泄漏改正，会造成海洋质量信号(包括趋势和周期)的严重低估。当与海岸线的距离小于 300 km 时，海洋质量变化速率和周年振幅均有较大差异，说明 300 km 内信号泄漏严重，应采用与海岸线距离至少为 300 km 的缓冲区进行泄漏改正。

4)量化不同截断阶数对反演的海洋质量变化贡献率时发现，当截断阶数低于 30 时，海洋质量变化速率与周年振幅均差异较大，证明其贡献不可忽视。40 阶的累积趋势和振幅贡献率可分别高达 98.56% 和 98.79%，验证 40 阶可以反映 98% 的信号，能够满足海洋质量反演的精度需求。

综上所述，GRACE 时变重力数据反演海洋质量变化时，后处理方法的选择会导致结果产生差异，进而影响反演精度。本文目前重点分析了后处理中单一因子对反演的影响，后续将进一步考虑组合因子的影响，并结合海洋闭合度展开研究。同时，除全球海洋区域的应用研究之外，GRACE 在局部海域开展高精度质量反演时还需综合考虑更多后处理因子的影响，比如对区域性滤波方法的选择还需进一步研究和验证。

参考文献 (References):

冯贵平, 宋清涛, 蒋兴伟, 等, 2018. 卫星重力估计陆地水和冰川对全球海平面变化的贡献[J]. 海洋学报, 40(11): 85-95. FENG G P, SONG Q T, JIANG X W, et al, 2018. Land water and glaciers contributions to global sea level change from satellite gravity measurement[J]. Haiyang Xuebao, 40(11): 85-95.

冯伟, 钟敏, 许厚泽, 2014. 联合卫星测高、卫星重力和海洋浮标资料研究2005—2013年的全球海平面变化[J]. 地球物理学进展, 29(2): 471-477. FENG W, ZHONG M, XU H Z, 2014. Global sea level changes estimated from satellite altimetry, satellite gravimetry and Argo data during 2005-2013[J]. Progress in Geophysics, 29(2): 471-477.

江敏, 钟敏, 张子占, 2013. 冰川均衡调整对全球海水质量变化的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 38(10): 1188-1191, 1132. JIANG M, ZHONG M, ZHANG Z Z, 2013. Influence of GIA on ocean mass variations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 38(10): 1188-1191, 1132.

刘书豪, 杨帆, 吴毅, 等, 2023. GRACE研究海洋质量变化的不确定度分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 51(3): 141-148. LIU S H, YANG F, WU Y, et al, 2023. Uncertainty analysis of GRACE on global mean ocean mass change[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 51(3): 141-148.

穆大鹏, 闫昊明, 2018. 全球平均海平面上升的瞬时速率[J]. 地球物理学报, 61(12): 4758-4766. MU D P, YAN H M, 2018. The instantaneous rate of global mean sea level rise[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(12): 4758-4766.

汪秋昱, 饶维龙, 张岚, 等, 2022. GRACE时变重力信号反演方法研究的进展和展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 50(9): 104-116. WANG Q Y, RAO W L, ZHANG L, et al, 2022. Progress and prospect of GRACE time-varying gravi-

ty signal inversion method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 50(9): 104-116.

徐天河, 穆大鹏, 闫昊明, 等, 2022a. 近20年海平面变化成因研究进展及挑战[J]. 测绘学报, 51(7): 1294-1305. XU T H, MU D P, YAN H M, et al, 2022a. The causes of contemporary sea level rise over recent two decades: progress and challenge[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51(7): 1294-1305.

徐天河, 杨元元, 穆大鹏, 等, 2022b. 近海海平面变化成因分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 47(10): 1750-1757. XU T H, YANG Y Y, MU D P, et al, 2022b. Causes of coastal sea level change[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(10): 1750-1757.

BLAZQUEZ A, MEXSSIGNAC B, LEMOINE J M, et al, 2018. Exploring the uncertainty in GRACE estimates of the mass redistributions at the Earth surface: implications for the global water and sea level budgets[J]. Geophysical Journal International, 215(1): 415-430.

CARON L, IVINS E R, LAROUR E, et al, 2018. GIA model statistics for GRACE hydrology, cryosphere, and ocean science[J]. Geophysical Research Letters, 45(5): 2203-2212.

CAZENAVEA A, NEREM R S, 2004. Present-day sea level change: observations and causes[J]. Reviews of Geophysics, 42: RG3001.

CHANG L, SUN W K, 2022. Consistency analysis of GRACE and GRACE-FO data in the study of global mean sea level change[J]. Geodesy and Geodynamics, 13(4): 321-326.

CHEN J L, WILSON C R, Tapley B D, et al, 2008. Antarctic regional ice loss rates from GRACE[J]. Earth and Planetary Science Letters, 266(1/2): 140-148.

CHEN J L, WILSON C R, 2010. Assessment of degree-2 zonal gravitational changes from GRACE, earth rotation, climate models, and satellite laser ranging[J]. Gravity, Geoid and Earth Observation, 135: 669-676.

CHEN J L, WILSON C R, LI J, et al, 2015. Reducing leakage error in GRACE-observed long-term ice mass change: a case study in West Antarctica[J]. Journal of Geodesy, 89: 925-940.

CHEN J L, WILSON C R, RIES J C, 2016. Broadband assessment of degree-2 gravitational changes from GRACE and other estimates, 2002-2015[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(3): 2112-2128.

CHEN J L, TAPLEY B, SAVE H, et al, 2018. Quantification of ocean mass change using gravity recovery and climate experiment, satellite altimeter, and Argo floats observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(11): 10212-10225.

CHEN J L, TAPLEY B, SEO K W, et al, 2019. Improved quantification of global mean ocean mass change using GRACE satellite gravimetry measurements[J]. Geophysical Research Letters, 46(23): 13984-13991.

CHEN J L, TAPLEY B, WILSON C, et al, 2020. Global ocean mass change from GRACE and GRACE Follow-On and altimeter and Argo measurements[J]. Geophysical Research Letters, 47(22): e2020GL090656.

CHEN J L, TAPLEY B, TAMISIEA M E, et al, 2021. Error assessment of GRACE and GRACE Follow-On mass change[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(9): e2021JB022124.

CHENG M K, TAPLEY B D, RIES J C, 2013. Deceleration in the Earth's oblateness[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(2): 740-747.

CHENG M K, RIES J, 2018. Monthly estimates of C_{20} from 5 SLR satellites based on GRACE RL06 models, GRACE technical note11[DB/OL]. The GRACE Project, Center for Space Research, University of Texas at Austin. [2023-10-05]. https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/.

CHENG M K, RIES J, 2023. C_{20} and C_{30} variations from SLR for GRACE/GRACE-FO science applications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(2): e2022JB025459.

CHURCH J A, WHITE N J, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century[J]. Surveys in Geophysics, 32(4/5): 585-602.

GERUO A, WAHR J, ZHONG S J, 2013. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada[J]. Geophysical Journal Interna-

tional, 192(2): 557-572.

HAMLINGTON B D, GARDNER A S, IVINS E, et al, 2020. Understanding of contemporary regional sea-level change and the implications for the future[J]. Reviews of Geophysics, 58(3): e2019RG000672.

HORWATH M, GUTKNECHT B D, CAZENAVE A, et al, 2022. Global sea-level budget and ocean-mass budget, with a focus on advanced data products and uncertainty characterisation[J]. Earth System Science Data, 14(2): 411-447.

KING M A, BINGHAM R J, MOORE P, et al, 2012. Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution[J]. Nature, 491(7425): 586-589.

LOOMIS B D, RACHLIN K E, LUTHCKE S B, 2019. Improved Earth oblateness rate reveals increased ice sheet losses and mass-driven sea level rise[J]. Geophysical Research Letters, 46(12): 6910-6917.

LOOMIS B D, RACHLIN K E, WIESE D N, et al, 2020. Replacing GRACE/GRACE-FO C_{30} with satellite laser ranging: impacts on Antarctic ice sheet mass change[J]. Geophysical Research Letters, 47(3): e2019GL085488.

PELTIER W R, 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 32: 111-149.

PELTIER W R, ARGUS D F, DRUMMOND R, 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: the global ICE-6G_C (VM5a) model[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(1): 450-487.

PELTIER W R, ARGUS D F, DRUMMOND R, 2018. Comment on “An assessment of the ICE-6G_C (VM5a) glacial isostatic adjustment model” by Purcell et al[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(2): 2019-2028.

SUN Y, RIVA R, DITMAR P, 2016. Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J2 from a combination of GRACE data and geophysical models[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(11): 8352-8370.

SWENSON S, CHAMBERS D, WAHR J, et al, 2008. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output[J]. Journal of Geophysical Research, 113(8): B08410.

TAPLEY B D, WATKINS M M, FLECHTNER F, et al, 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change[J]. Nature Climate Change, 9(5): 358-369.

UEBBING B, KUSCHE J, RIETBROEK R, et al, 2019. Processing choices affect ocean mass estimates from GRACE[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(2): 1029-1044.

VELICOGNA I, WAHR J, 2013. Time-variable gravity observations of ice sheet mass balance: precision and limitations of the GRACE satellite data[J]. Geophysical Research Letters, 40(12): 3055-3063.

VISHWAKARMA B D, HORWATH M, GROH A, et al, 2022. Accounting for GIA signal in GRACE products[J]. Geophysical Journal International, 228(3): 2056-2060.

WAHR J, MOLENAAR M, BRYAN F, 1998. 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, 103(B12): 30205-30229.

WANG F W, SHEN Y Z, CHEN Q J, et al, 2022. Revisiting sea-level budget by considering all potential impact factors for global mean sea-level change estimation[J]. Scientific Reports, 12(1): 10251.

YI S, SNEEUW N, 2021. Filling the data gaps within GRACE missions using singular spectrum analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(5): e2020JB021227.

ZHOU Y, JIN S G, TENZER R, et al, 2016. Water storage variations in the Poyang Lake Basin estimated from GRACE and satellite altimetry[J]. Geodesy and Geodynamics, 7(2): 108-116.

Post-Processing Factors Analysis of Global Ocean Mass Inversion by GRACE/GRACE-FO

HAN Wenya, LI Weiwei

（*College of Geodesy and Geomatics*, *Shandong University of Science and Technology*, Qingdao 266590, China）

Abstract: Time-varying gravity field is an important means to invert ocean mass change. A thorough evaluation of post-processing strategies of time-varying gravity field is essential to accurately obtain ocean mass change. This study adopted the gravity recovery and climate experiment (GRACE) and GRACE Follow-On (GRACE-FO) gravity field data to inverse the global ocean mass, evaluated the low degree coefficients replacement (C_{20}) and model corrections (including GIA, leakage) are evaluated, and quantified the contribution of different truncation degrees in ocean mass. The results showed that the stability of the original C_{20} is poor, with the ocean mass change rate derived from it slightly higher than that obtained from independent C_{20} coefficients based on SLR data. Therefore, it's suggested to replace the original C_{20} by using the C_{20} provided by Goddard Space Flight Center (GSFC). The differences in correction values of the five GIA models are obvious, of which the correction derived from the Caron18 model is the largest. For the leakage correction, as the Buffer Zone extends, the ocean mass change rate increases. We find that the leakage is serious for the sea area less than 300 km from the coastline. Thus, a Buffer Zone extending at least 300 km beyond the coastline is preferred. From the perspective of contribution of different truncation degrees, it is found that when the truncation order is below 30, the estimated rate of change in ocean mass and the annual amplitude show significant differences, indicating that the coefficients below the 30 degrees have a non-negligible contribution to the inversion of ocean mass. When the truncation degree is 40, the cumulative trend and annual amplitude contribution reach to 98.56% and 98.79%, respectively. Thus, the contribution of the truncation degree mroe than 40 is quite small.

Keywords: GRACE/GRACE-FO; ocean mass changes; C_{20} replacement; GIA corrections; leakage correction; degrees contribution

Received: March 2, 2024　**Online:** November 14, 2024