



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析
作者: 李耀宗, 郑李均, 王鹏辉, 周浩, 罗志才, 周泽兵
DOI: 10.13203/j.whugis20240373
收稿日期: 2025-02-20
网络首发日期: 2025-03-19
引用格式: 李耀宗, 郑李均, 王鹏辉, 周浩, 罗志才, 周泽兵. 海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240373>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240373

引用格式：

李耀宗, 郑李均, 王鹏辉, 等. 海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240373 (LI Yaozong, ZHENG Lijun, WANG Penghui, et al. The Impact of Ocean Tide Model Error on Temporal Gravity Field in Terms of Mascon Solution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240373)

海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析

李耀宗¹, 郑李均¹, 王鹏辉¹, 周浩¹, 罗志才¹, 周泽兵^{1,*}

¹ 国家精密重力测量科学中心, 地球物理研究所, 基本物理量测量教育部重点实验室, 华中科技大学物理学院, 湖北 武汉, 430074

摘要：海潮模型作为时变重力场反演中的重要力模型之一, 研究其模型误差对反演精度的影响具有重要的科学意义。Mascon (mass concentration) 解是地球时变重力场表征方式之一, 其关注信号的空间分布特征, 提供了分析海潮模型误差影响机制的全新视角。本文基于动力学法恢复 Mascon 解的基本原理, 建立闭环数值仿真平台, 重点研究了海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的精度影响, 主要研究结论如下: (1) 海潮模型中未建模的潮波信号会导致显著条带误差, 在海洋上以条带误差的形式存在, 在陆地上则会干扰时变信号的精细建模。(2) 海潮模型误差存在系统差异, 在浅海区域及高纬度地区表现明显, 对于南北极区域时变信号的提取影响显著, 中低纬地区浅海区域的影响不可忽略。

关键词：海潮模型误差; 时变重力场; Mascon 解

The Impact of Ocean Tide Model Error on Temporal Gravity Field in Terms of Mascon Solution

LI Yaozong¹, ZHENG Lijun¹, WANG Penghui¹, ZHOU Hao¹, LUO Zhicai¹, ZHOU Zebing^{1,*}

¹ National Gravitation Laboratory, Institute of Geophysics, MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement, and School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Objectives: The ocean tide model (OTM), as one of the significant background models in the inversion of the temporal gravitational field, is of considerable scientific significance to investigate the impact of its model noise on the accuracy of the inversion of the temporal gravity field. The Mascon (Mass Concentration) solution is one of the representations of the Earth's temporal gravity field, which focuses on signal's spatial pattern, providing a new perspective in spatial domain on the impact of OTM error. **Methods:** In this paper, with EOT11a serving as the baseline, the differences of model FES2004, EOT11ag, FES2014b and EOT20, were utilized to simulate real OTM errors. Besides, based on modified dynamic method for Mascon solution, a closed-loop numerical simulation experiment was conducted for low-low satellite-to-satellite tracking mission. By conducting simulations, the spatial distribution of

收稿日期: 2025-02-20

基金项目：国家重点研发计划 (2023YFC2907003, 2023YFC2206700), 国家自然科学基金 (42422403), 装备预研教育部联合基金项目 (8091B03032408)。

第一作者：李耀宗, 博士研究生, 研究方向为时变重力场建模。liyaozong@hust.edu.cn

通信作者：周泽兵, 博士, 教授。zhouzb@mail.hust.edu.cn

OTM errors can be determined from the differences in satellite along-track perturbations calculated by various models. The impact on the Mascon solution can be assessed by comparing the results to a baseline error-free outcome. **Results:** The spatial distribution of acceleration residuals showed that: large magnitude of OTM errors exhibited in high latitude region for FES2014b and EOT20, as they shared identical systematic biases in such region; FES2004 model differed in shallow sea areas at mid-to-low latitude, attributed to its modeling method; additionally, while FES2014b and EOT20 contained more tidal components, there were noticeable errors in ocean area. For the Mascon results, the impact of OTM error showed different characteristics: the OTM errors had little influence on the inversion of signals within continental regions at mid-to-low latitude; the systematic OTM errors in high latitude region may cause aliasing with signals in such area; the unmodeled tidal signals caused significant north-south striping errors in ocean area. **Conclusions:** The main research conclusions are as follows: (1) High-frequency tidal signals within ocean tide models lead to significant striping errors. These manifest as striping errors over the oceans and interfere with the fine modeling of signals on land. (2) Systematic differences exist in ocean tide model errors, notably evident in shallow sea areas and high-latitude regions. These errors significantly affect the extraction of time-varying signals in polar regions and cannot be ignored in shallow sea areas at mid-to-low latitudes.

Key words: ocean tide model error, temporal gravity field, Mascon solution

重力恢复及气候实验卫星（Gravity Recovery And Climate Change, GRACE）于 2002 年成功发射，提供了全球大尺度物质运移过程的全新视角^[1]。基于上述数据反演的月尺度时变重力场模型产品，反映了地表质量迁移过程，对水文、冰川、海平面及气候变化等诸多领域的研究产生了深远影响^[2-6]，其成果也广泛应用于我国长江黄河流域及其他区域的水储量变化监测^[7-9]。

受限于 GRACE 卫星飞行模式、观测噪声及高频信号的混频误差，时变重力场的精度和分辨率仍有待提高，国内外学者也致力于发展高精度的时变重力场模型。时变重力场反演的关键在于构建重力场参数与星间观测数据的联系，进而基于间接平差原理给出重力场参数的估计值。动力积分法基于先验力模型从观测值提取时变信号，算法精度依赖于力模型精度。随着观测精度以及处理技术的进步，现有力模型精度已不足以支撑更高精度时变重力场模型需求^[10-12]。海潮模型误差是主要的力模型误差之一，残余的海潮信号能从星间观测数据残差中分析识别，其误差在反演过程的影响不可忽略^[13]。海潮信号的混频效应较为复杂，海潮模型误差传播机制、其与轨道飞行模式和观测噪声的复杂耦合作用亦不明确，国内外学者对此开展了大量研究。王长青等从轨道模拟以及实测数据处理的角度，分别研究了海潮模型短周期潮波及次生潮混频误差在反演过程的传播^[14]。Hauk 等提出了基于长周期观测数据的两步法模型，将海潮模型误差从观测信号中分离^[15]。Abrykosov 等在反演过程中直接考虑海潮模型误差的影响，将不同海潮模型之间的差异看作随机误差，减弱海潮模型误差对时变重力场反演的影响^[16]。

上述国内外已有研究成果主要基于球谐系数法，研究内容聚焦于海潮模型误差的频域表现及混频误差对时变重力场反演的影响。然而，海潮模型误差在空间上的分布特征并不规律，不同海潮模型各潮波分量的误差空间分布特性也不尽相同^[13-16]。这种误差分布特性在时变重力场反演结果中的分布特性尚不明确，尤其是对于陆地区域的水文过程中相关时变信号提取的影响仍有待研究。不同于球谐基函数关注重力场的频谱信号，Mascon 基函数更关注信号的空间分布特征，且可以引入先验信息对地球物理信号和噪声进行约束^[17-20]，一定程度上实现信号和噪声在空间上的分离；Mascon 基函数的这一特

性，将有利于进一步开展针对海潮模型误差对时变重力场反演影响的研究。

鉴于此，本文将从 Mascon 解的概念和理论基础出发，阐述基于动力学法恢复 Mascon 解的基本原理，重点通过闭环数值仿真模拟实验，探讨海潮模型误差对 Mascon 解的影响。特别地，通过探讨海潮模型误差对 Mascon 解的影响，也将为传统的基于球谐系数法的分析提供全新视角。

1 时变重力场 Mascon 解的反演方法

球谐基函数来源于重力位的拉普拉斯方程解，表征了地球重力场的频谱特征。然而，精细的重力场结构特征需要高阶的球谐基函数进行描述，在整体观测数据不充分、分布不均匀的情况下，难以在区域信号建模过程得到较好的结果。因此，Muller 等提出 Mascon 基函数的概念，用于表征月球重力场精细结构特征^[21]。

Rowlands 等^[22]率先将 Mascon 方法用于地球重力场恢复，其将地球重力场的变化等效为地球表面的质量异常信号。若将地球表面划分为若干格网，则可以将格网点的质量变化作为未知参数，构建轨道、星间距离变率等观测量与未知参数的观测方程。在此基础上，假设格网内物质均匀分布，则可将质量变化转化为高度变化；如果以水的密度为基准，对应的高度变化即可称之为等效水高。时变重力场 Mascon 解，即以格网点等效水高形式表示的地球时变重力场。

地表质量变化引起的卫星轨道摄动可基于牛顿万有引力定律直接给出^[23]：

$$\vec{a}_i = \frac{GA_i\rho_w}{d^3}h_i\vec{d} \quad (1)$$

其中， G 是引力常数， ρ_w 是水层密度； d 是质量块 i 与卫星质心之间的距离， \vec{d} 是从质量块指向卫星质心的向量， A_i 是质量块的表面积， h_i 是覆盖质量块 i 的水的厚度， \vec{a}_i 是该质量块在卫星位置的摄动加速度。考虑到 GRACE 系列时变重力场的实际空间分辨率约为 3° ，本文将地球表面分割为近似在赤道区域 $3^\circ \times 3^\circ$ 等面积网格；网格在纬度上均匀分布，在同一纬度带上则按照等面积原则进行切割。

动力积分法将卫星每个历元的积分轨道和实测轨道之间的差异看作与时间相关的变分函数^[24]，由此构建轨道和星间距离变率与待求参数的联系：

$$\Delta X(t) = X(t) - \bar{X}(t) = \frac{\partial X(t)}{\partial r(t_0)}\delta r(t_0) + \frac{\partial X(t)}{\partial h}\delta h \quad (2)$$

其中， $X(t)$ 代表 t 时刻的观测值， $\bar{X}(t)$ 为参考值， $\delta r(t_0)$ 为初始状态改正量， δh 为待估计格网点的等效水高。基于公式(2)，可形成线性化后的误差方程式如下，其中 A 为设计矩阵， x 为待求参数， l 为观测值， y 为估计值与观测值的残差：

$$y = Ax - l \quad (3)$$

由上述误差方程生成法方程之后，根据最小二乘准则，即可给出待估计的等效水高。然而，动力积分法构建的误差方程中引入了初始状态参数，在叠加各弧段的法方程时，需先消去弧段的初始状态参数。值得注意的是，公式(4)为病态方程，按照上述方法直接求解不能给出稳定解。为此，本文基于 Tikhonov 正则化原理，引入空间约束方程作为约束条件，抑制解的病态性^[17-19,22-23]。如公式(5)所示，

其中 α 为正则化因子，用于平衡先验信息和观测信息权重，本文采用 L 曲线法给出该参数估值^[25]； C_s 表示空间约束矩阵。

$$\hat{x} = (A^T A + \alpha C_s)^{-1} A^T l \quad (4)$$

空间约束矩阵假定空间相近的格网点质量变化存在相关性，即对于 N 个格网点来说，可以构建 $N \times (N-1)/2$ 组如公式(6)所示的约束方程^[26]：

$$h_i - h_j = 0, i \neq j, i > 0, j > 0 \quad (5)$$

而每组约束方程的权重由格网点间的相对距离决定^[26-27]。考虑到约束方程会引入空间平滑效果，需要设置相关距离，以避免结果过度平滑。每组约束方程的相对权重可表示为：

$$W_{ij} = \exp\left(1 - \frac{d_{ij}}{D_0 * \cos(\varphi_i)}\right) \quad (6)$$

其中 D_0 为相关距离，本文相关距离的设置为格网分辨率 3° ，即仅考虑最邻近格网的相关性^[27]； $\cos(\varphi_i)$ 为纬度相关参数，考虑到高纬度区域相邻格网点的距离相对较小，且星下点分布更为密集，同样的相关距离会引入更多的协方差信息干扰解算结果，因此引入了该参数进行补偿^[18]。将上述 $N \times (N-1)/2$ 组约束方程的系数矩阵记为 H ，最终的正则化矩阵可表示为^[26]：

$$C_s = H^T W H \quad (7)$$

2 闭环数值仿真设计

海潮模型误差是时变重力场反演的主要误差源之一，随着海潮模型精度的不断提高，海潮模型误差的形式也在发生变化，本文以不同海潮模型的差异，代替海潮模型误差，对其在重力场反演过程中的影响进行了研究。对于海洋潮汐的建模主要分为两种模式：一类是基于水动力学的同化模型，如 FES (finite element solutions) 系列；一类是基于测高数据时间序列分析的经验模型，如 EOT (empirical ocean tide model) 系列。FES2004 是 GRACE RL04 处理海潮混叠的标准模型，包含 18 个主潮波及 238 个次生潮^[28]。FES2014b 模型在 FES2004 的基础上，扩展了潮汐分量的频谱，一共包含 34 个主潮波及 327 个次生潮^[29]。EOT 系列模型是在 FES 系列模型的基础上，通过对测高数据的剩余潮汐效应进行调和分析给出的经验改正模型，如 EOT11a 以 FES2004 模型为基础构建^[30]，EOT20 则是基于 FES2014b 模型^[31]。EOT11ag 相比 EOT11a 模型同化了 GRACE 重力观测数据^[32]。本文选择 EOT11a 模型作为参考，分别研究了 EOT11ag、FES2004、FES2014b、EOT20a 四种海潮模型代表的海潮模型误差形式的影响。

为了准确评估海潮模型误差对 Mascon 解反演精度的影响，本文采用了 GRACE 轨道的设计参数，设计与实测数据处理流程类似的闭环数值仿真流程，进行了 2000 年 1 月份的时变重力场 mascon 解数值模拟，如图 1 所示。

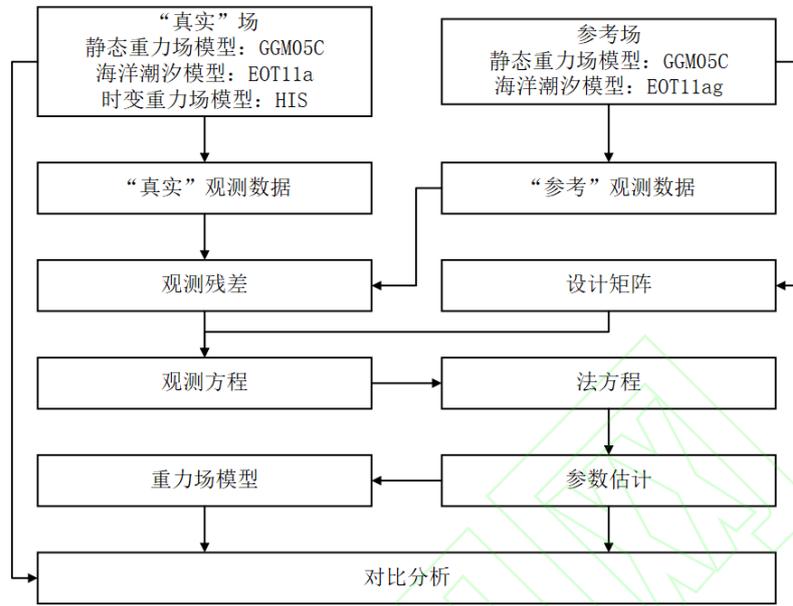


图 1 重力场反演与评估流程图

Fig. 1 Flowchart of Earth's gravity field determination and assessment

(1) 选用高精度的“真实”场来模拟实际的观测环境，包括静态重力场模型 GGM05C^[33]，海潮模型 EOT11a 和时变重力场模型 HIS^[34]。其中 HIS 模型反映的是地球系统的水文、冰川以及固体地球的质量变化，可用来刻画地球系统的物质运移过程。以“真实”场作为背景摄动力模型，利用数值积分器获取轨道和星间距离变率等无误差的“真实”观测数据。

(2) 在实际的重力场反演过程中，背景摄动力模型中不可避免的包含噪声，按照上述海潮模型误差模拟方案设计，本文选择了不同于“真实”场的海潮模型来模拟海潮模型误差，包括 EOT11ag、FES2004、EOT20、FES2014b。以参考场为背景摄动力模型，利用数值积分器得到参考的轨道和星间距离变率等有误差的“参考”观测数据。

(3) 将“真实”观测数据和“参考”观测数据两者作差，可以得到观测残差；由数值积分器可以得到设计矩阵，继而根据间接平差理论构建观测方程，并依次进行法方程建立和参数估计，最终即可得到重力场解。将重力场模型解和原始的 HIS 模型比较，可以评估各类海潮模型误差对时变重力场建模的精度影响。

3 结果与讨论

3.1 不同海潮模型的摄动力差异

不同海潮模型在振幅、相位及潮汐成分等均有细微差别，因此导出的海潮摄动力也会存在相应的差异。为了考察海潮模型计算的海潮摄动力差异，本文以卫星受到的径向摄动力分量为例，展示了该误差的空间分布特性。如图 2 所示，以“真实”海潮模型 EOT11a 为基准，分别计算了四种不同的“参考”海潮模型 EOT11ag、FES2004、EOT20、FES2014b 引起的卫星径向摄动力分量偏差。分析图 2 的

计算结果，可以得出以下结论：（1）海潮模型之间存在继承性。例如 EOT11ag 和 EOT11a 的区别在于海潮模型建模过程中是否同化了卫星重力数据^[32]，并没有引入额外的卫星测高数据，二者差异最小。EOT20 在南北纬 66° 以上区域未对 FES2014b 模型进行修正^[31]，二者在高纬度区域的摄动偏差几乎一致。EOT 系列模型相比 FES 模型的改正主要体现在浅海区域^[30-31]，FES2004 模型相比 EOT11a 的偏差在这一特征上体现最为明显。（2）不同潮汐模型在全球的摄动影响不尽一致，其摄动影响集中在海洋区域，偏差则在浅海区域体现的尤为明显。海洋区域上的摄动力建模差异主要反映了不同海潮模型对潮汐信号刻画能力的差异，即该差异主要包含了相同潮波分量在振幅和相位上的差异以及海潮模型对残余潮汐信号刻画的差异。陆地上的差异则反映了卫星对浅海区域摄动的响应，由于卫星飞行模式影响，该响应特征在南北向的海陆边界最为明显，如南极区域。

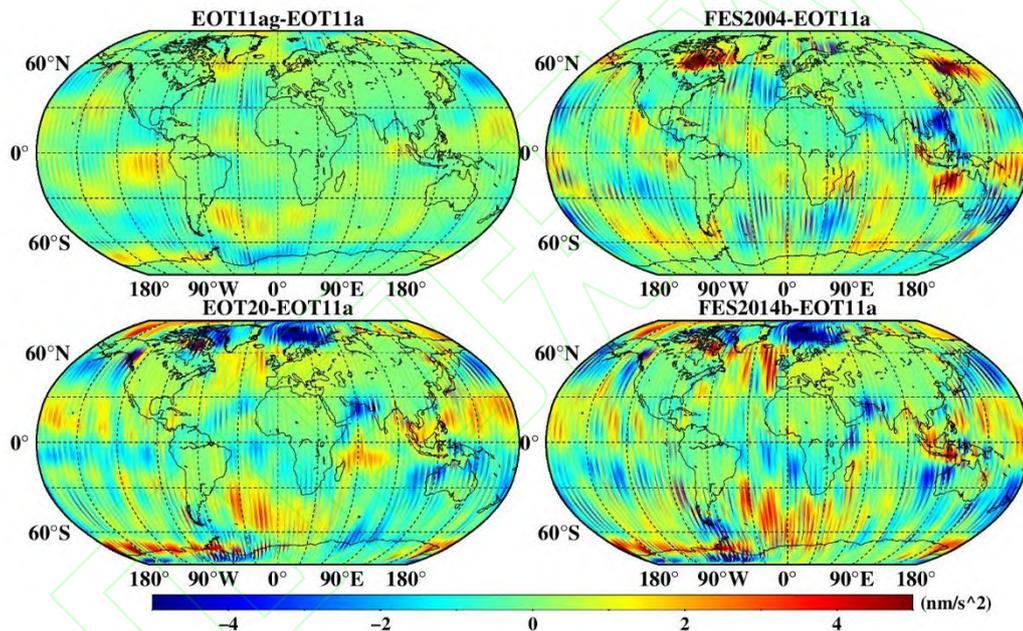


图 2 不同海潮模型引起的径向方向摄动力差异

Fig. 2 The radial perturbation force discrepancies derived from different ocean tide models

3.2 海潮模型误差对 Mascon 解空域分布影响

基于上述模拟流程及参数设置，本文首先进行无误差的反演模拟，即“参考”的海潮模型依然采用 EOT11a 模型，结果如图 3 所示。结果表明本文采用的参数设置及正则化方案有效，反演结果与输入的时变信号在空间分布及量级均大体相符。然而在主要的时变信号区域，由于正则化的空间平滑效果以及时变信号的截断误差影响，时变信号的分布和量级稍有差距，为避免这一误差干扰对海潮模型误差影响的分析，后续讨论均以无误差的 Mascon 解为参考。

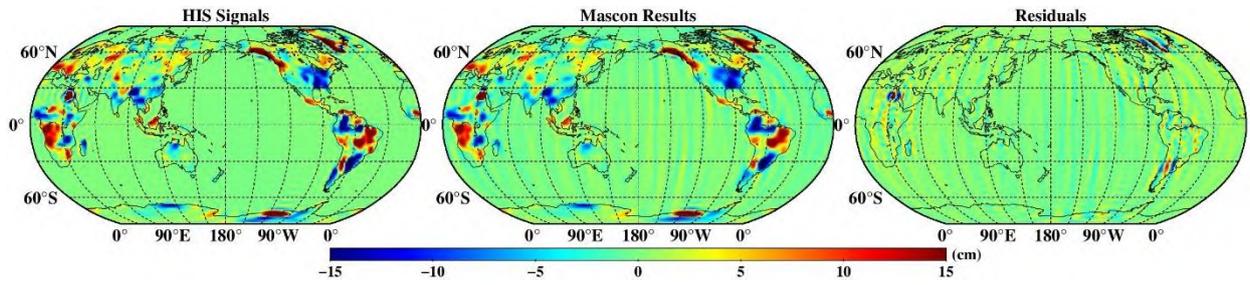


图 3 时变信号、Mascon 反演结果及二者的残差

Fig. 3 Signals, Mascon results and the residuals

为了更直观地展现海潮模型误差对 Mascon 解的空域分布影响，本文选取了四种不同的“参考”海潮模型 EOT11ag, FES2004、EOT20、FES2014b，计算了对应的 Mascon 解，并与上述无误差反演的 Mascon 解作差，结果如图 4 所示。

分析图 4 的计算结果，可以得出以下结论：（1）海潮模型误差存在继承性。EOT11a 相比 FES2004 的主要差别体现在浅海区域^[30]，而反演结果的误差也集中在浅海区域。EOT20 是以 FES2014b 模型为参考^[31]，因此 FES2014b 中的部分海潮模型误差也会在 EOT20 中体现。而 EOT20 与 EOT11a 模型采用了相似的测高数据及调和分析方法^[31]，EOT20 模型在浅海区域偏差相比 FES2014b 更小，反映在图 4 中即中低纬陆海交界区域误差量级偏小。（2）海潮模型误差对于大尺度时变信号的影响较小。在中低纬度主要的时变信号区域，海潮模型误差导致的反演误差均不明显。在南北极区域，由于 EOT20 与 FES2014b 模型相比 EOT11a 模型差异较大，对于南极区域时变信号提取会产生显著影响，同时在北极区域也会产生虚假信号。（3）海潮模型误差对 Mascon 解中的陆地和海洋影响形式不一致。海潮模型误差对 Mascon 解的海洋部分影响主要以条带误差形式存在，尽管在 Mascon 求解过程中已经对陆地和海洋进行相关的物理约束，但仍会有部分残余，以 FES2014b 作为“参考”场反演的 Mascon 解最为明显。EOT20 及 FES2014b 模型的共同点是相比 EOT11a 模型包含更多的潮汐分量，该现象说明了海潮模型未被精确建模的潮汐信号将会导致反演结果中的条带误差。海潮模型误差对于陆地部分的影响不尽相同，对于时变信号显著流域影响相对较小。对于经度圈范围内不存在明显信号的区域，与海洋区域类似，由于卫星轨道飞行模式影响，条带误差将淹没信号。

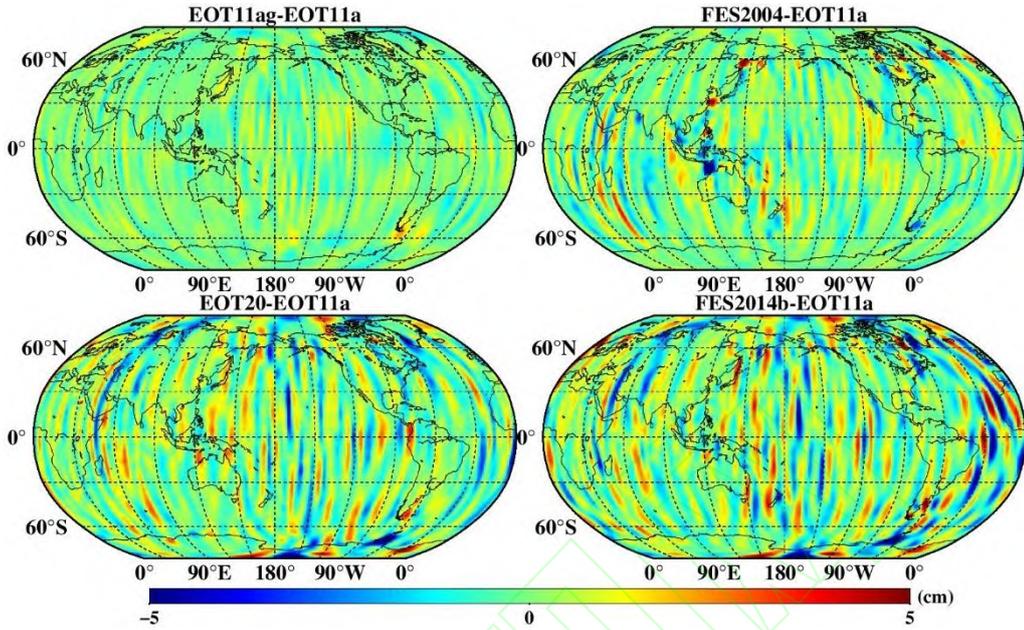


图 4 不同海潮模型误差反演的 MASCON 解差异

Fig. 4 The difference of Mascon solution based on different ocean tide models error

4 结论

本文通过类似于实测数据解算的反演策略，构建闭环数值仿真环境，设计了不同的海潮模型误差的背景摄动力噪声模型，详细分析了海潮模型误差对 Mascon 解反演精度的影响，得到的主要结论如下：

(1) 海潮模型误差与卫星飞行模式的耦合会产生条带误差，其中未建模的潮波信号的影响最为显著，且在陆地部分和海洋部分的空域表现形式不同。海潮模型误差在海洋上仍主要以条带误差的形式存在，对陆地上时变信号显著区域影响不大，在其他区域仍会残留条带误差导致的虚假信号这种特性将影响陆地上的时变信号的精细建模。

(2) 海潮模型误差存在系统偏差，在浅海区域及高纬度区域表现明显。对于南极区域影响最为显著，可达 5cm 以上；中低纬浅海区域的影响相对较弱，如东南亚地区，但仍不可忽略。

总体而言，海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响在全球不同区域表现不尽相同，与海潮模型的潮波成分及精度密切相关。因此，如何精化海潮模型，减弱海潮模型误差，将是提升 Mascon 解精度的重要研究内容之一。海潮模型误差在 Mascon 解中的陆地部分和海洋部分的不同表现形式，也为优化球谐基函数形式下的时变重力场解，提供了一个新的研究思路。

参考文献

- [1] Tapley B. D., Bettadpur S., Watkins M., et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9).
- [2] Dai M., Zhou H., Ma W., et al, Tracking shallow and deep groundwater storage changes in North China Plain with improved fusion method and hybrid spectral analysis approach[J], *Journal of Hydrology*, 2024, 633:131001.
- [3] Ma W., Zhou H., Dai M., et al. Characterizing the drought events in Yangtze River basin via the insight view of its sub-basins water storage variations[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130995.
- [4] Otosaka I. N., Horwath M., Mottram R., et al. Mass Balances of the Antarctic and Greenland Ice Sheets Monitored from Space[J]. *Surveys in Geophysics*, 2023, 44(5): 1615-1652.
- [5] Tang L., Zhou H., Li J., et al. Effect of Argo Salinity Drift since 2016 on the Estimation of Regional Steric Sea Level Change Rates[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(11): 1855.
- [6] Tapley B. D., Watkins M. M., Flechtner F., et al. Contributions of GRACE to Understanding Climate Change[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 5(5): 358-369.
- [7] XIONG Jinghua, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Variation and Attribution of Terrestrial Water Storage in the Yangtze River Basin[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2241-2248(熊景华,郭生练,王俊,等.长江流域陆地水储量变化及归因研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(12): 2241-2248).
- [8] QU Wei, CHEN Peinan, ZHANG Pufang, et al. Spatiotemporal Changes of GWS Changes and Their Sustainability in the Upper Reaches of the Yellow River Basin from 2002 to 2022 Revealed by GRACE/GRACE-FO Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1287-1299(瞿伟,陈沛男,张普方,等. GRACE/GRACE-FO 揭示黄河上游 2002-2022 年 GWS 及可持续性时空演化[J].武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1287-1299).

-
- [9] 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(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).
- [10] Flechtner F., Neumayer K. H., Dahle C., et al. What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications[J]. *Surveys in Geophysics*, 2015, 37(2): 453-470.
- [11] Zhou H., Zheng L., Pail R., et al. The impacts of reducing atmospheric and oceanic de-aliasing model error on temporal gravity field model determination[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 234(1): 210-227.
- [12] Pfaffenzeller N., Pail R. Small satellite formations and constellations for observing sub-daily mass changes in the Earth system[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 234(3): 1550-1567.
- [13] Koch I., Duwe M., Flury J. Residual and unmodeled ocean tide signal from 20+ years of GRACE and GRACE-FO global gravity field models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(9): e2024JB029345.
- [14] WANG Chang-Qing, XU Hou-Ze, ZHONG Min, et al. A study on the effect of ocean tides error in GRACE temporal gravity field recovery[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2015, 58(9): 3072-3079(王长青,许厚泽,钟敏,等.海潮误差对 GRACE 时变重力场解算的影响研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3072-3079).
- [15] Hauk M., Pail R. Treatment of ocean tide aliasing in the context of a next generation gravity field mission[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 214(1): 345-365.
- [16] Abrykosov P., Sulzbach R., Pail R., et al. Treatment of ocean tide background model errors in the context of GRACE/GRACE-FO data processing[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 228(3): 1850-1865.
- [17] Luthcke S B, Sabaka T J, Loomis B D, et al. Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land-ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution[J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(216): 613-631.
- [18] Watkins M M, Wiese D N, Yuan D N, et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,

-
- 2015, 120(4): 2648-2671.
- [19] Save H, Bettadpur S, Tapley B D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7547-7569.
- [20] Markus A. A review of different mascon approaches for regional gravity field modelling since 1968[J]. *History of Geo- and Space Sciences*, 2022, 13: 205-217.
- [21] Muller P M, Sjogren W L. Mascons: Lunar Mass Concentrations[J]. *Science*, 1968, 161(3842): 680-684.
- [22] Rowlands D D, Luthcke S B, Klosko S M, et al. Resolving mass flux at high spatial and temporal resolution using GRACE intersatellite measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4).
- [23] Tregoning P, McGirr R, Pfeffer J, et al. ANU GRACE data analysis: characteristics and benefits of using irregularly shaped Mascons[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(2): e2021JB022412.
- [24] Kvas A., Behzadpour S., Ellmer M., et al. ITSG-Grace2018: Overview and Evaluation of a New GRACE-Only Gravity Field Time Series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8), 9332-9344.
- [25] YIN Heng, YOU Wei, FAN DongMing, et al. Variance constraint radial point-mass method for inversion of earth surface mass variation. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2022, 65(7): 2464-2483(尹恒,游为,范东明,等.反演地表质量变化的附有方差约束的径向点质量方法.地球物理学报, 2022, 65(7): 2464-2483).
- [26] Loomis B.D., Luthcke S.B. Sabaka, T.J. Regularization and error characterization of GRACE mascons[J]. *Journal of Geodynamics*, 2019, 93: 1381-1398.
- [27] SU Yong, ZHENG WenLei, YU Biao, et al. Surface mass distribution derived from three-dimensional acceleration point-mass modeling approach with spatial constraint methods[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2019, 62(2): 508-519(苏勇,郑文磊,余彪,等.反演地表质量变化的附有空间约束的三维加速度点质量模型法[J].地球物理学报, 2019, 62(2): 508-519).

-
- [28] Lyard F., Lefevre F., Letellier T. et al. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56: 394–415.
- [29] Spiridonov E. A., Vinogradova O. Y. Oceanic Tide Model FES2014b: Comparison with Gravity Measurements[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, 56(11), 1432-1446.
- [30] Savcenko R., Bosch W., Dettmering D., et al. EOT11a - Global Empirical Ocean Tide model from multi-mission satellite altimetry, with links to model results[OL], 2012. Retrieved from: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.834232>.
- [31] Hart-Davis M. G., Piccioni G., Dettmering D., et al. EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8), 3869-3884.
- [32] Mayer-Gürr T., Savcenko R., Bosch W., et al. Ocean tides from satellite altimetry and GRACE[J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 59-60: 28-38.
- [33] Ries J., Bettadpur S., Eanes R., et al. The Combined Gravity Model GGM05C[ET/OL]. GFZ Data Services, 2016.
- [34] Dobsław H., Bergmann-Wolf I., Dill R., et al. The updated ESA Earth System Model for future gravity mission simulation studies[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89: 505-513.

网络首发:

标题: 海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析

作者: 李耀宗, 郑李均, 王鹏辉, 周浩, 罗志才, 周泽兵

收稿日期: 2025-02-20

DOI:10.13203/j.whugis20240373

引用格式:

李耀宗, 郑李均, 王鹏辉, 等. 海潮模型误差对时变重力场 Mascon 解的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240373 (LI Yaozong, ZHENG Lijun, WANG Penghui, et al. The Impact of Ocean Tide Model Error on Temporal Gravity Field in Terms of Mascon Solution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240373)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

GRACE 时变重力场模型的自适应正则化滤波方法

嵇昆浦, 沈云中, 陈秋杰

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(11): 2101-2112.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20240316>

FG5 绝对重力仪观测数据的实测重力潮汐改正

田桂娥, 陈晓东, 吴书清, 孙和平, 白磊, 桑鹏, 牛晓伟

武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 870-878.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180472>

利用 GRACE 资料构造大尺度时变重力场统一模型

涂弋, 陆洋, 张子占, 史红岭, 杜宗亮, 高春春, 朱传东

武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(8): 1100-1106.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20140303>