

DOI: 10.13203/j.whugis.20210643



文章编号: 1671-8860(2022)10-1750-08

近海海平面变化成因分析

徐天河¹ 杨元元² 穆大鹏¹ 尹鹏¹

1 山东大学空间科学研究院, 山东 威海, 264209

2 盐城师范学院城市与规划学院, 江苏 盐城, 224002

摘要:近海海平面上升直接威胁人类生存,分析其成因不仅具有重要科学意义,而且能够为应对海平面上升提供相应策略。使用卫星测高、时变重力以及浮标观测研究2002—2020年近海300 km内海平面变化成因。由于时变重力在近海受到较为严重的泄漏误差影响,使用时变重力约束解模拟陆地质量变化对海洋质量的泄漏,其线性趋势约为0.68 mm/a。在季节和非季节尺度上,时变重力和浮标观测解释了卫星测高的结果,证明近海海平面平衡方程在季节和非季节时间尺度上能够被闭合。在长期变化趋势方面,卫星测高显示近海海平面上升速率为 3.32 ± 0.45 mm/a,而时变重力与浮标观测之和的速率为 2.25 ± 0.51 mm/a,两者之间存在约1 mm/a的速率差。鉴于该速率差高于估计的不确定度,认为当前在闭合近海海平面平衡方程长期趋势方面仍存在不小挑战,一方面近海比容实测数据较为稀少,很可能低估了长期趋势变化;另一方面,不完善的泄漏误差改正和陆地垂直运动改正也会影响近海海平面长期趋势变化。

关键词:海平面变化;卫星测高;时变重力;近海区域

中图分类号: P229

文献标志码: A

海平面变化成因分析是指在确定海平面总体变化的基础上,定量估计海水质量和海水比容的贡献^[1-4]。在月平均变化时间尺度上,如果海水质量和海水比容能够解释海平面上升,则认为海平面平衡方程被闭合^[5-6]。海平面上升是全球变暖的直接后果^[7],研究其变化成因对于认识和理解全球气候变化尤为重要。近海海平面变化与人类生活甚至生存息息相关^[8-9],确定其成因变化不仅能提升关于海平面上升对气候变化响应的认识,约束未来海平面上升预测^[10],同时能够帮助沿海地区积极应对未来更为激烈的全球变化。

研究海平面变化成因依赖可靠的观测系统,包括卫星测高、Argo浮标和卫星重力等技术手段^[11-13]。卫星测高能够监测全球主要海域的海平面变化,其数据显示,自1993年至今,全球平均海平面上升的速率约为3 mm/a,并伴随一定的加速度^[14];大约在2000年前后,Argo浮标计划开始实施,浮标数目逐渐增加,在2007年超过3 000个,能够测量海表面至2 000 m处的海水温度和盐度,可以用来估计海水比容变化^[11];2002年,重力场恢复与气候实验(gravity recovery and climate

experiment, GRACE)卫星成功发射,首次实现了高精度全球时变重力场的观测,并能够反演全球海水质量变化^[15-16],其后续任务GRACE-FO (GRACE follow-on)于2018年成功发射,继续探测时变重力场^[17]。上述3种独立观测系统为研究海平面变化成因提供了基础,并得到广泛关注^[1-9]。研究表明,在2005年后,全球平均海平面上升的2/3是由于海水质量增加引起的^[5-6],其中格陵兰岛和南极的冰盖消融几乎占据了质量上升的一半^[6];全球平均海平面上升的1/3是由于海水热膨胀导致^[4]。

尽管全球平均海平面上升的成因被成功揭示,但是对近海区域的海平面变化成因认识却严重不足。由于GRACE/GRACE-FO的空间分辨率较低,在近海区域,海水质量变化信号受到陆地水文信号的泄漏影响十分显著^[18-19],难以直接确定海水质量变化。实际上,在使用GRACE估计全球海水质量变化时,通常将近海300 km内的质量变化扣除^[20-21],考虑到被屏蔽的面积占据海洋面积的18%,大部分前人研究的全球平均海平面并非代表真实的全球海平面平均值。

收稿日期: 2022-03-30

项目资助: 国家自然科学基金(42192534, 41904081);国家重点研发计划(2020YFB0505800)。

第一作者: 徐天河, 博士, 教授, 主要从事卫星大地测量及测量数据处理方面的研究。thxu@sdu.edu.cn

本文在模拟 GRACE/GRACE-FO 陆地质量变化对近海海洋质量变化的基础上,联合 Argo 数据和卫星测高研究近海海平面变化成因,在季节、非季节以及长期趋势等不同时间尺度分析近海海平面平衡方程,研究结果将促进对当前海平面变化的理解与认识。

1 数据与方法

1.1 卫星测高

本文使用卫星测高观测估计近海海平面变化。卫星测高产品由法国多测高卫星任务精密定轨中心研制,并由卫星海洋学归档验证与解释 (archiving validation and interpretation of satellite oceanographic, AVISO) 向用户发布。该 AVISO 产品的空间网格大小为 0.25° , 覆盖全球主要海洋区域,但不包括北冰洋。AVISO 数据经过了卫星测高数据处理的标准改正过程,如干湿电离层延迟、反变气压计改正等。本文使用的 AVISO 数据是月平均值,时间覆盖范围为 2002-01—2020-05。在近海, AVISO 需要改正冰川均衡调整 (glacial isostatic adjustment, GIA) 影响,使用 ICE-6G-D 模型^[22]提供的垂直位移速率进行改正,改正数值约为 -0.2 mm/a , 小于全球平均改正值 (约为 -0.3 mm/a)。此外,本文将 AVISO 的空间网格范围限定在南北纬 65° 以内。如果不作特殊说明,下文使用的其他数据也同样限定在此范围内。

1.2 时变重力

GRACE 及其后继卫星 GRACE-FO 观测的时变重力场可以反演全球海水质量变化。本文使用的时变重力数据是由美国德克萨斯大学奥斯汀分校空间科学研究中心 (center for space research, CSR) 发布,产品类型包括两种:一种是经典的球谐系数产品,截断至 60 阶次;另一种是约束解产品,即 mascon 解^[23]。两种产品均为月均值,时间范围为 2002-04—2020-05。需要特别指出的是,球谐系数产品直接用于计算近海海水质量变化,而约束解用于模拟陆地质量向海洋区域的泄漏信号^[18]。

使用球谐系数计算海水质量变化需要经过一系列数据后处理,对于 GSM 产品,主要包括:(1)增加地心运动变化^[24-26];(2)使用卫星激光测距解算的 C_{20} 替换原 C_{20} 序列^[27];(3)特别地,由于 GRACE-FO 的 C_{30} 包含较大噪声,使用卫星激光测距解算的 C_{30} 替换 GRACE-FO 时期的

C_{30} 序列^[28];(4)加回 GAD 产品;(5)使用 ICE-6G-D 模型^[22]进行 GIA 影响改正;(6)移除重力场背景场变化,背景场为 2004—2012 年的平均变化。经过这些改正后,不使用任何滤波计算即可得到空间网格为 1° 的全球洋底压力变化,进一步移除 GAD 的全球平均,即移除大气质量负荷效应^[29],得到质量变化为海水质量变化。提取近海 300 km 以内的格网进行纬度加权,得到近海海水质量平均变化。

以上得到的近海平均海水质量仍需要进行泄漏误差改正,这是因为 GRACE 和 GRACE-FO 的空间分辨率较为粗糙,无法真正实现 1° 的空间分辨率。一般认为在海洋区域, GRACE/GRACE-FO 的空间分辨率大约为 $500\sim 700 \text{ km}$ ^[30]。尽管由于陆地质量变化强度高于海水质量变化,其空间分辨率也因此高于海洋区域,但全球大部分陆地地区空间分辨率也很难优于 300 km。鉴于在沿海地区,海洋和陆地的质量变化不再连续,因此,从 GRACE/GRACE-FO 计算的近海海水质量变化包含来自陆地水文信号或冰川信号的泄漏。为移除陆地质量变化向海洋的泄漏^[18-19],理论上需要已知真实的陆地质量变化,并通过模拟生成类似于 GRACE/GRACE-FO 球谐系数产品,即可获得陆地向海洋的泄漏信号。然而实际上,目前除了 GRACE/GRACE-FO 外,没有其他观测手段能在全球尺度上直接观测陆地质量变化,已有的水文模型通常低估陆地水文趋势^[31]。因此,在有限的选择下,本文使用约束解的陆地质量变化作为真实的陆地质量变化,用于泄漏误差模拟。具体做法是将约束解的陆地质量(海水质量设置为零)转化到球谐系数,截断到 60 阶次,然后不使用任何滤波再转换到空间域,将近海 300 km 范围内的格网进行纬度加权,得到泄漏信号。

1.3 比容观测

本文使用英国 Met Office 研制的比容产品 EN 系列^[32],数据版本是 4.2.1,以下简称 EN4。该数据主要是基于 Argo 浮标观测,使用最优化插值方法获得三维规则空间网格。选择 EN4 是因为该数据覆盖全球全部海洋区域,包括北冰洋以及边缘海、浅水区域等,而其他很多 Argo 产品在边缘海、浅水区以及高纬度区域(纬度大于 65°)不提供有效值。EN4 的空间网格为 1° ,垂直方向有 42 层,最大深度为 5 000 m,时间分辨率为每月一值,本文使用的时间范围为 2002—2020 年。

1.4 近海范围及数据空间分辨率统一

GRACE观测的时变重力场的空间分辨率约为300 km,其球谐系数产品截断到60阶次(有一些产品截断到96阶甚至更高)。实际上,GRACE的空间分辨率不仅与信号的空间分布特征有关,也与时间有关^[33],这是因为地表质量变化信号特征随着时间和空间而发生变化。考虑到此前很多研究屏蔽了近海300 km范围内的海水质量变化^[20-21,29],本文定义该空间尺度为近海区域。此外,由于卫星测高的覆盖范围主要是在南北纬65°以内,因此,本文的近海区域也截至±65°。

另外一个需要注意的问题是不同观测系统的分辨率统一。目前AVISO发布的卫星测高产品是0.25°格网,但这并非其真实分辨率,实际的分辨率取决于卫星轨道之间的间隔和重复采样间隔。同样的问题也存在于Argo观测,尽管大多数Argo产品的网格大小为1°,但其有效分辨率与实际的浮标采样有关,如局部区域在某时间段内采样较为丰富,则其精度和分辨率会高于采样稀疏区域。就GRACE而言,尽管球谐系数截断到60阶次,但几乎各个阶次都包含噪声,尤其是高阶部分,因此其实际分辨率也低于300 km。

为减小不同观测系统之间空间分辨率的差异,本文将卫星测高和Argo产品先转换到球谐

域,截断到60阶次,然后再转换到空间域,中间不使用任何滤波。这种转换对于本文研究的近海区域很有必要,因为其形状本质上是一个狭长的带状区域,且受到陆地泄漏误差的影响,会进一步影响时变重力的空间分辨率。球谐截断有利于缩小卫星测高和Argo产品与时变重力之间的空间分辨率差异。

2 近海海平面变化成因

2.1 近海海水质量变化

图1为近海海平面变化。图1(a)为海水质量变化及陆地信号泄漏,该海水质量变化是从CSR提供的GSM和GAD计算得到,未经GIA改正和泄漏误差改正,陆地信号泄漏是使用约束解模拟计算得到,该信号泄漏与泄漏误差改正符号相反;图1(b)为卫星测高观测的海平面以及从海洋浮标计算得到的海水比容和热容变化;图1(c)为移除线性趋势的近海海平面变化;图1(d)为近海海平面年际变化,即在图1(c)的基础上扣除季节变化(包括周年变化和半周年变化)。从时间序列变化结构看,海水质量变化的长期趋势微弱,但季节信号明显。之前的研究屏蔽近海海水质量变化,主要原因是陆地质量信号泄漏,特别是格陵兰岛、南极地区和阿拉斯加的冰川消融,对近海影响较大。

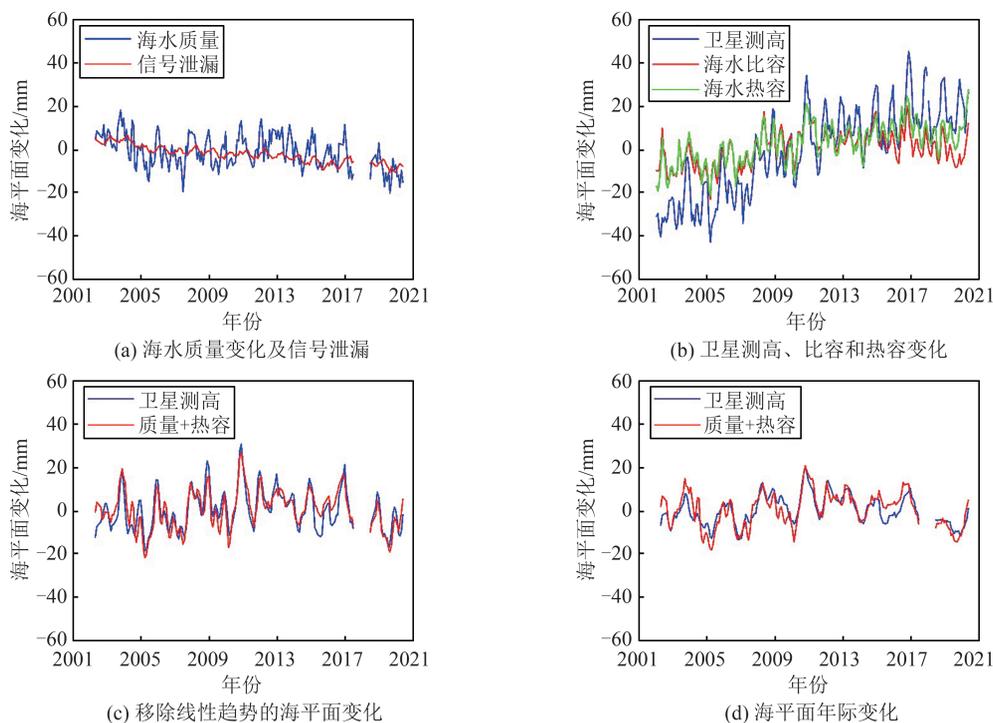


图1 近海海平面变化

Fig. 1 Coastal Sea Level Change

表 1 给出了不同时间段内近海海平面及其贡献成分的长期趋势,包括陆地信号泄漏的影响。从表 1 可以看出,在 2002—2020 年期间,使用约束解模拟泄漏信号的结果为 0.68 ± 0.02 mm/a,该变化主要受长期趋势主

导,季节变化相对较弱(图 1(a)中红色线);近海范围内的 GIA 改正值为 1.0 ± 0.3 mm/a,与全球改正值比较接近;经过 GIA 改正和泄漏误差改正后,近海海水质量的变化趋势为 1.12 ± 0.47 mm/a。

表 1 近海海平面及其不同成分长期趋势/(mm·a⁻¹)

Tab.1 Long-term Trend of Coastal Sea Level and Its Different Components/(mm·a⁻¹)

| 时间段 | 卫星测高 | 质量+热容 | 海水热容 | 海水质量 | 冰川均衡调整 | 泄漏误差改正 |
|------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|
| 2002—2020年 | 3.23 ± 0.45 | 2.25 ± 0.51 | 1.15 ± 0.17 | 1.12 ± 0.47 | 1.0 ± 0.3 | 0.68 ± 0.02 |
| 2016—2020年 | 0.25 ± 0.49 | -1.89 ± 0.55 | -0.85 ± 0.21 | -1.17 ± 0.51 | 1.0 ± 0.3 | 0.51 ± 0.02 |

2.2 近海比容变化

比容变化是海平面变化的重要贡献源,它包括热容变化和盐容变化。由于 Argo 浮标的盐度观测在 2016 年左右出现了明显的系统偏差,显著影响近海比容变化(图 1(b)),因此本文使用热容变化替代比容变化。需要注意的是,在全球尺度上,使用热容替代比容变化具有合理性,因为全球海洋的总盐度变化十分微小,甚至可以忽略^[34]。但在区域尺度上,由于盐度对流等作用,即不同区域之间的盐度交换会导致盐度空间变化再分布,且主要发生在一些局部区域,如北冰洋的 Beaufort 盆地以及印度洋东部。理论上需要检核盐度在近海区域是否发生了变化。从热容和比容在 2002—2015 年的变化看,两者基本吻合(图 1(b)),表明盐度变化十分微小。但是在 2016 年前后,比容和热容之间的差距开始变大,考虑到 Argo 浮标的盐度偏差也发生在这个时候,因此,本文假定在近海区域,盐度在研究时间段内的变化居于次要地位,使用热容变化替代比容变化。

2.3 近海海平面变化的季节及趋势变化

在季节尺度上,海水质量与热容变化之和(图 1(c)中红色线)与卫星测高吻合度较高,相关性达到了 0.90($p < 0.01$)。直观上看,即便在 2016 年后,尽管 GRACE 和 GRACE-FO 只有一颗卫星加速度计在正常运行,海水质量与热容变化之和与卫星测高仍然吻合。不仅如此,在非季节尺度上(即移除季节信号和长期趋势),海水质量与热容变化之和也很好解释了卫星测高的变化(图 1(d))。这说明,在季节和非季节尺度上,近海海平面变化的成因已经被揭示。在近海,无论是时变重力还是 Argo,都具备提供可靠海平面变化成分的能力。

除季节和非季节变化外,长期趋势变化的成

因也是理解近海海平面变化的重要因素。图 2 为全球和近海的平均海平面变化对比。从表 1 可以看出,在 2002—2020 年期间,卫星测高数据表明近海海平面上升速率为 3.23 ± 0.45 mm/a,而同时期全球平均海平面的线性速率估计值为 3.63 ± 0.43 mm/a。近海平均海平面速率低于全球平均速率,这是由于近海海平面在 2016 年后趋势明显减弱(见图 2 中红色线变化),其线性速率降为 0.25 mm/a,从而降低了整个研究时间段内的近海海平面上升速率。一方面,这强调了海平面上升具有较强的非稳态性,另一方面也证明近海海平面上升会显著区别于全球平均海平面。除了长期速率外,两者的年际波动变化也存在显著差异,近海海平面的波动明显高于全球平均值。在 2002—2020 年期间,近海的热容变化趋势为 1.15 ± 0.17 mm/a(表 1),近海海水质量与热容变化之和的速率为 2.25 ± 0.51 mm/a,与卫星测高的速率相差 0.98 mm/a,该速率差高于估计的不确定度。此外,考虑到全球平均海平面的闭合差为卫星测高的速率减去海水质量与海水比容之和的速率,该值在 2016 年之前小于 0.3 mm/a^[4-6],因此,在长期趋势方面,揭示近海海平面变化成因存在挑战。

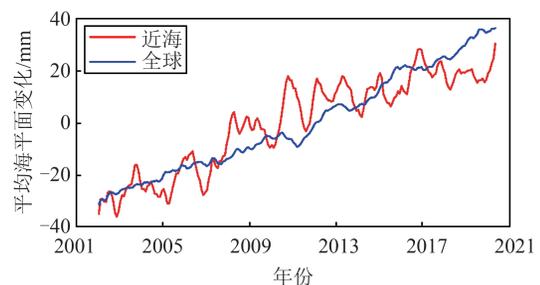


图 2 全球与近海平均海平面变化

Fig.2 Change of Global Mean Sea Level and Coastal Mean Sea Level

3 讨论

3.1 主要误差因素

卫星测高、时变重力以及比容观测在近海区域的误差会高于全球平均。相对而言,卫星测高的误差可能会小于其他两者。本文定义的近海范围是从海岸线开始向海洋内部延伸300 km,覆盖了全球主要的边缘海域以及浅水区域。卫星测高在确定近海海面高变化时,主要困难是在浅水区域内波形重定,特别是在近海约20 km内,波形重定精度低于开阔海域。近年来,由于算法改进,近海波形重定精度得到改善,随之提高了卫星测高的精度。

比容观测在近海的不确定度会明显高于全球平均值。由于Argo浮标在近海范围内比较稀疏,难以对比容变化形成有效约束,极有可能低估了长期趋势变化。使用EN4估计的近海热容变化可能更多的受到背景场以及优化插值方法的影响。本文在估计热容不确定度时主要考虑最小二乘的形式误差(2倍),这可能会低估了真实的不确定度。

时变重力在近海范围受到更多的误差影响。比如,与全球平均变化相同,低阶项(包括一阶项、 C_{20} 以及 C_{30})和GIA改正会显著影响近海海水质量变化,其中,GIA的不确定度约为0.3 mm/a,一阶项的不确定度约为0.2 mm/a^[21]。此外,近海海水质量变化也受到泄漏信号不确定度的影响。本文模拟的泄漏信号从根本上依赖CSR提供的约束解,主要是考虑到其信号强度高于传统的球谐系数,且经过了泄漏改正。但是,一方面,CSR约束解可能存在泄漏改正不完善,因为他们的改正策略是在解算时阻止陆地质量向海洋泄漏^[23],能否完全实现阻止泄漏,有待于进一步检验;另一方面,目前时变重力的空间分辨率有限,这导致其恢复的区域信号强度会低于真实信号,特别是在沿海的陆地区域,会直接影响泄漏信号模拟。换言之,使用CSR约束解模拟的泄漏信号可能小于真实的陆地泄漏信号。本文在估计近海海水质量变化不确定度时主要考虑了低阶项和最小二乘拟合的2倍形式误差,并假定它们之间统计独立。由于暂时无法充分估计泄漏信号的真实不确定度,因此没有将其包含在海水质量变化的不确定度之中。这样,我们认为,目前的不确定度估计要小于真实的不确定度。

3.2 球谐截断问题

在计算近海海平面变化时,不仅将时变重力截断至60阶次,而且将卫星测高观测和比容数据也同样进行球谐转换并截断到60阶次,目的在于统一数据的空间分辨率。在研究全球平均海平面变化成因时,一般没有作这样的数据处理。同时本文也指出,相关研究屏蔽了时变重力的近海变化^[20,29],但没有屏蔽卫星测高和比容在近海范围内的变化。在近海,统一空间分辨率具有必要性,因为近海是一条宽度为300 km的狭长地带,时变重力的分辨率较低,无法探测区域内的真实空间分布特征,仅提供平均值变化。卫星测高的空间分辨率要高于时变重力,但是Argo浮标的空间分辨率较为复杂,很大程度上取决于实际观测资料的稀疏程度。因此,将卫星测高和比容观测进行球谐转换并截断,会减小不同观测系统在空间分辨率方面的差距,研究成因变化更具合理性。

3.3 2016年以后变化

最近的结果表明,2016年后全球平均海平面平衡方程不再闭合(闭合差增加至1.2 mm/a^[34]),从时变重力计算得到的全球平均海水质量趋势明显小于2016年之前的海水质量趋势。本文计算了2016年以后的近海海平面变化趋势(表1),发现海水质量与热容之和的速率为-1.89 mm/a,明显小于同时期卫星测高的速率(0.25 mm/a),差距扩至2 mm/a。此外,2002—2015年期间,近海海平面平衡方程的闭合差约为1 mm/a,表明近海海平面平衡方程的闭合差在2016年后扩大,与全球平均海平面平衡方程十分相似。在理论上,增大的闭合差直接与观测系统的误差有关,比如时变重力有限的分辨率和Argo在近海区域较为稀疏的浮标观测,以及未考虑的海水盐度变化贡献等,但目前还不能量化评估每个观测系统各自的误差。

4 结语

在季节尺度和非季节尺度上,卫星测高的观测结果与其他两个观测系统的结果十分吻合,表明近海海平面季节变化成因能够被解释。然而在长期趋势方面,受制于观测资料的不确定度,特别是由于海洋观测资料较为稀疏,以及时变重力空间分辨率相对粗糙,导致海平面上升的长期趋势约有1 mm/a的速率差异。

在2016年后,不仅全球平均海平面平衡方程

不再闭合^[20,34],近海的趋势差异也在明显变大。尽管最近的研究表明,2016年后时变重力观测到的南极和格陵兰岛的冰川消融没有明显偏差,但这只能证明时变重力能够稳健地恢复地表质量强信号变化^[17]。然而,无论是全球平均海水质量,还是近海海水质量变化,长期趋势的量级要明显小于极地冰川消融信号。这可能是导致时变重力卫星(由于加速度计问题)低估当前海水质量趋势的原因;另外,考虑到地表质量迁移守恒,时变重力也会低估某些区域陆地质量长期趋势变化。针对该挑战,需要建立和发展新的方法提高时变重力恢复弱信号变化的能力,如融合区域陆地垂直运动变化观测数据反演陆地质量变化(特别是山地冰川消融),增强区域信号,实现闭合2016年后的海平面平衡方程,或者减小其差距。

致谢:感谢 AVISO 提供的卫星测高产品、英国气象局提供的 Argo 数据及美国空间研究中心提供的 GRACE 数据。

参 考 文 献

- [1] Wei F, Min Z, Xu H Z, et al. Sea Level Variations in the South China Sea Inferred from Satellite Gravity, Altimetry, and Oceanographic Data [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2012, 55(10): 1696-1701
- [2] Wang Zemin, Zhang Baojun, Jiang Weiping, et al. Ocean Mass Variations in the South China Sea Inferred from Satellite Altimetry, GRACE, Oceanographic and Meteorological Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 571-577 (王泽民, 张保军, 姜卫平, 等. 联合卫星测高、GRACE、海洋和气象资料研究南海海水质量变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(4): 571-577)
- [3] Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea Level Budget over 2003-2008: A Reevaluation from GRACE Space Gravimetry, Satellite Altimetry and Argo [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1/2): 83-88
- [4] Wang F W, Shen Y Z, Chen Q J, et al. Reduced Misclosure of Global Sea-Level Budget with Updated Tongji-Grace2018 Solution [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 17667
- [5] Yi S, Sun W K, Heki K, et al. An Increase in the Rate of Global Mean Sea Level Rise Since 2010 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(10): 3998-4006
- [6] Dieng H B, Cazenave A, Meyssignac B, et al. New Estimate of the Current Rate of Sea Level Rise from a Sea Level Budget Approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(8): 3744-3751
- [7] Church J A, White N J. A 20th Century Acceleration in Global Sea-Level Rise [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L01602
- [8] Nicholls R J, Cazenave A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones [J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1517-1520
- [9] Chang Le, Sun Wenke. Progress and Prospect of Sea Level Changes of Global and China Nearby Seas [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(3): 266-279 (常乐, 孙文科. 全球及中国近海海平面变化趋势研究进展及展望[J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(3): 266-279)
- [10] Watson P J. A New Perspective on Global Mean Sea Level (GMSL) Acceleration [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6478-6484
- [11] Jiang Min, Zhong Min, Feng Wei, et al. Study of Steric Sea Level Variations Combining the Data from Altimetry and GRACE [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(6): 5-7 (江敏, 钟敏, 冯伟, 等. 联合卫星测高和卫星重力数据研究热容海平面变化[J]. 海洋测绘, 2011, 31(6): 5-7)
- [12] Zhang Baojun, Wang Zemin. Global Sea Level Variations Estimated from Satellite Altimetry, GRACE and Oceanographic Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1453-1459 (张保军, 王泽民. 联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究全球海平面变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(11): 1453-1459)
- [13] Chen Wei, Zhong Min, Zhong Yulong, et al. Global Mean Sea Level Variations and the Land Water Cycle at the Inter-Annual Scale During the 2014-2016 El Nino Episode [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(19): 2116-2124 (陈威, 钟敏, 钟玉龙, 等. 2014-2016年El Nino期间全球平均海平面的年际变化及全球水循环的贡献[J]. 科学通报, 2017, 62(19): 2116-2124)
- [14] Nerem R S, Beckley B D, Fasullo J T, et al. Climate-Change-Driven Accelerated Sea-Level Rise Detected in the Altimeter Era [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(9): 2022-2025
- [15] Feng Guiping, Song Qingtao, Jiang Xingwei, et al. Land Water and Glaciers Contributions to Global Sea Level Change from Satellite Gravity Measure-

- ments [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40 (11): 85-95 (冯贵平, 宋清涛, 蒋兴伟, 等. 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*, 2018, 40(11): 85-95)
- [16] Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, et al. Contributions of GRACE to Understanding Climate Change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(5): 358-369
- [17] Velicogna I, Mohajerani Y, Geruo A, et al. Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-on Missions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(8): e2020GL087291
- [18] Mu D P, Xu T H, Xu G C. An Investigation of Mass Changes in the Bohai Sea Observed by GRACE [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(9): 79
- [19] Mu D P, Yan H M, Feng W, et al. GRACE Leakage Error Correction with Regularization Technique: Case Studies in Greenland and Antarctica [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 208 (3): 1775-1786
- [20] Chen J L, Tapley B, Wilson C, et al. Global Ocean Mass Change from GRACE and GRACE Follow-on and Altimeter and Argo Measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(22): e2020GL090656
- [21] Chen J L, Tapley B, Save H, et al. Quantification of Ocean Mass Change Using Gravity Recovery and Climate Experiment, Satellite Altimeter, and Argo Floats Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(11): 10212-10225
- [22] Peltier R W, Argus D F, Drummond R. 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*, 2018, 123(2): 2019-2028
- [23] 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
- [24] Sun Y, Riva R, Ditmar P. Optimizing Estimates of Annual Variations and Trends in Geocenter Motion and J_2 from a Combination of GRACE Data and Geophysical Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(11): 8352-8370
- [25] Yang Y Y, Zhong M, Feng W, et al. Detecting Regional Deep Ocean Warming Below 2 000 Meter Based on Altimetry, GRACE, Argo, and CTD Data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38 (10): 1778-1790
- [26] Zhong Y L, Zhong M, Feng W, et al. Groundwater Depletion in the West Liaohe River Basin, China and Its Implications Revealed by GRACE and in situ Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (4): 493
- [27] Loomis B D, Rachlin K E, Luthcke S B. Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-Driven Sea Level Rise [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46 (12): 6910-6917
- [28] Loomis B D, Rachlin K E, Wiese D N, et al. Replacing GRACE/GRACE-FO with Satellite Laser Ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet Mass Change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (3): e2019GL085488
- [29] Uebbing B, Kusche J, Rietbroek R, et al. Processing Choices Affect Ocean Mass Estimates from GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(2): 1029-1044
- [30] 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
- [31] Scanlon B R, Zhang Z Z, Save H, et al. Global Models Underestimate Large Decadal Declining and Rising Water Storage Trends Relative to GRACE Satellite Data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(6): 1080-1089
- [32] Good S A, Martin M J, Rayner N A. EN4: Quality Controlled Ocean Temperature and Salinity Profiles and Monthly Objective Analyses with Uncertainty Estimates [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6704-6716
- [33] Yi S, Song C Q, Wang Q Y, et al. The Potential of GRACE Gravimetry to Detect the Heavy Rainfall-Induced Impoundment of a Small Reservoir in the Upper Yellow River [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 6562-6578
- [34] Barnoud A, Pfeffer J, Guérou A, et al. Contributions of Altimetry and Argo to Non-Closure of the Global Mean Sea Level Budget since 2016 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48 (14): e2021GL092824

Causes of Coastal Sea Level Change

XU Tianhe¹ YANG Yuanyuan² MU Dapeng¹ YIN Peng¹

¹ Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China

² School of City and Regional Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China

Abstract: Objectives: Coastal sea level rise poses direct threats to human livelihood. It is of scientific importance to understand the causes and provide useful strategies for adapting sea level rise. This paper aims to investigate the causes of coastal sea level change using satellite altimetry, satellite time-variable gravity, and Argo floats. **Methods:** Given that time-variable gravity suffers from serious leakage issue over coastal area, we use land mass variations from a mascon solution to simulate the leakage from land into oceans, which is estimated to be 0.68 mm/a. **Results:** On seasonal and non-seasonal scales, satellite altimetry measurements are well explained by the summation of time-variable gravity and Argo floats, demonstrating the closure of coastal sea level change. Satellite altimetry suggests a rate of 3.32 ± 0.45 mm/a for coastal sea level rise, but the summation of time-variable gravity and Argo floats yields a rate of 2.25 ± 0.51 mm/a. **Conclusions:** The rate discrepancy is about 1 mm/a in coastal sea level budget, which suggests that closing the sea level budget for coastal zone is challenged by uncertainties. The in situ measurements are sparse for Argo over coastal zone, which may underestimate the steric trend. Furthermore, leakage correction and vertical land motion may also cause uncertainties.

Key words: sea level change; satellite altimetry; time-variable gravity; coastal zone

First author: XU Tianhe, PhD, professor, specializes in satellite geodesy and geodetic data processing. E-mail: thxu@sdu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42192534, 41904081); the National Key Research and Development Program of China (2020YFB0505800).

引文格式: XU Tianhe, YANG Yuanyuan, MU Dapeng, et al. Causes of Coastal Sea Level Change[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10):1750-1757. DOI:10.13203/j.whugis20210643(徐天河, 杨元元, 穆大鹏, 等. 近海海平面变化成因分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(10):1750-1757. DOI:10.13203/j.whugis20210643)