2014~2016年 El Niño 期间全球平均海平面的年际变化及全球水循环的贡献

陈威^{1,2*}, 钟敏^{1*}, 钟玉龙^{1,2}, 冯伟¹, 张明月^{1,2}

1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zmzm@asch.whigg.ac.cn; chenwei@asch.whigg.ac.cn

2016-12-12 收稿, 2017-03-29 修回, 2017-03-29 接受, 2017-06-07 网络版发表

国家自然科学基金(41474063, 41431070, 41674084)和国家重大科学研究计划(2013CB733305)资助

摘要 自1993年以来, 卫星测高的结果显示全球平均海平面(global mean sea level, GMSL)以3 mm/a左右的平均速率上升, 并伴随着明显的年际变化. 2002年成功发射的重力卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)通过高精度测量两颗卫星之间的距离变化(微米级精度)反演全球陆地水时空变化, 为全球平均海平面变化的成因分析研究提供了观测基础. 综合利用卫星测高、GRACE卫星重力、海水温盐Argo浮标数据, 详细分析了2010~2016年La Niña和El Niño期间GMSL年际变化和年际尺度上陆地水的贡献. 结果显示, 从2010年开始进入La Niña到2011年La Niña达到鼎盛期GMSL下降了7.6 mm, 其中海水质量减少贡献了5.1 mm; 2011~2013年GMSL快速上升了19.2 mm, 相应海水质量的增加贡献了12.3 mm; 2014~2016年强El Niño事件使得GMSL上升了15.1 mm, 其中海水质量增加对GMSL的贡献达13.6 mm, 该时期海水质量变化是GMSL年际变化的主导因素. 同时采用卫星重力正演方法(Forward Modelling, FM)分别研究了澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域、北美地区、南极+格陵兰区域的陆地水储量变化, 结果表明: 2014~2016年El Niño期间全球海水质量的增加主要来自于澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域陆地水减少的贡献.

关键词 全球平均海平面, 海水质量变化, 陆地水循环, El Niño

全球平均海平面(global mean sea level, GMSL)变化、陆地水的迁移和重新分布, 对全球气候变化和人类活动会产生重大的影响, 其中海平面变化已经成为全球变化的一个重要指标^[1]. GMSL变化主要包括两个部分的贡献: (1) 海水温度和盐度的变化引起海水体积发生改变从而导致海平面的变化即比容海平面; (2) 在全球水循环系统中由于海洋-陆地-大气之间的水量交换引起海水质量的变化从而导致海平面发生升降. 全球陆地水主要包括地表水、冰雪、土壤水和地下水等, 陆地水的变化是降水、蒸发、径流

和地下水渗漏等活动过程的综合反映^[2]. 在全球气候变暖的背景下, 海水温度升高(主要是指海洋0~2000 m深度的温度)会使得海水受热膨胀从而导致海平面升高, 陆地上的极地冰盖冰帽和山岳冰川的融化, 也会造成陆地水减少和海平面上升^[2,3].

El Niño和La Niña主要是指太平洋东部和中部热带海洋的海水温度异常引发全球气候模式发生变化的一种异常气候现象^[4,5]. El Niño和La Niña对于海平面和陆地水的影响一直是全球变化研究的热点, 已有研究表明, El Niño影响GMSL的年际变化、全球的

引用格式: 陈威, 钟敏, 钟玉龙, 等. 2014~2016年 El Niño 期间全球平均海平面的年际变化及全球水循环的贡献. 科学通报, 2017, 62: 2116~2124

Chen W, Zhong M, Zhong Y L, et al. Global mean sea level variations and the land water cycle at the inter-annual scale during the 2014~2016 El Niño episode (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2116~2124, doi: 10.1360/N972016-01377

降水与蒸发量^[6], 热带地区陆地水的变化在El Niño期间与GMSL年际变化呈负相关^[7]. 特别是2010~2012年的La Niña作为近80年里最强的一次El Niño冷期事件引起了广大学者的关注. 其中, Boening等人^[8]认为2010~2011年强La Niña使得海水质量减少导致全球平均海平面下降了5 mm, 其中比容海平面未发生变化, 同时发现2005~2012年间澳大利亚+印度尼西亚区域、南美洲区域、东南亚区域、南极+格陵兰区域陆地水总的变化与全球海水质量变化相吻合; Fasullo等人^[4]则认为2010~2011年强La Niña期间海水质量引起的全球平均海平面下降的5 mm主要由澳大利亚、南美洲北部和东南亚的陆地水增加所贡献, 其中澳大利亚陆地水增加占主导因素; Yi等人^[9]认为从2010~2011年GMSL下降了7.9 mm, 2011~2012年GMSL上升了11.6 mm, 2012~2013年5月GMSL上升了7.2 mm, 并发现2010~2011年由于海水质量减少导致GMSL下降的5 mm主要是西伯利亚区域、南美洲区域和澳大利亚区域陆地水的增加所致; 钟玉龙等人^[10], Feng和Zhong^[11]研究显示2010~2012年强La Niña使得海水质量减少引起的GMSL下降了6 mm, 同时比容海平面也下降了近2 mm. 以上学者研究表明2010~2012年强La Niña期间海水质量的减少导致GMSL下降了5~6 mm, 并且海水质量的减少伴随着澳大利亚等区域陆地水的增加.

2010~2016年期间, 全球气候不仅遭遇了2010~2012年强La Niña事件, 而且在2014~2016年间发生了一次强El Niño事件, GMSL和陆地水储量的年际波动较大. 因此本文利用卫星测高数据、GRACE卫星重力数据、海水温盐Argo浮标数据, 重点研究了2014~2016年强El Niño期间GMSL年际变化以及全球水循环的贡献, 详细分析了: (1) 2014~2016年强El Niño期间海水质量变化、全球比容海平面变化分别对GMSL的贡献; (2) 2014~2016年El Niño期间全球陆地水的峰谷异常变化和气候异常期间澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域、北美地区和南极+格陵兰区域的陆地水储量变化分别对GMSL的贡献.

1 数据和方法

1.1 卫星测高数据

本文采用的卫星测高数据为法国AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic)

提供的格网数据(MSLA)(<http://www.aviso.altimetry.fr>)^[12]. 该数据融合了TOPEX/Poseidon, Jason-1/2, ERS1/2和ENVISAT等多颗卫星的测高资料, 并经过了必要的改正, 如: 电离层延迟改正、对流层干湿分量改正、固体潮和海潮改正、海洋负荷潮汐改正、电磁偏差改正、仪器改正和反变气压计改正等. 并采用2014年4月推出的SSALTO/Duacs产品的最新版本, 时间分辨率为1 d, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间跨度为2003年1月至2016年1月. 为了与GRACE卫星重力数据、Argo温盐浮标数据相匹配, 将数据进行了月平均, 并加入了0.3 mm/a的地壳均衡调整(GIA)改正^[13].

1.2 GRACE卫星重力数据

本文采用的是美国德克萨斯大学空间研究中心CSR(Center for Space Research, University of Texas at Austin)提供的2003年1月至2016年3月GRACE level-2 RL05月重力场模型数据. 该数据为60阶球谐系数, 扣除了非潮汐大气、高频海洋信号以及固体潮汐等影响. 为与经过反变气压计改正的卫星测高数据进行匹配, 在计算海水质量时需加上GAD海洋大气模型, 并且扣除大气质量在海洋上月平均值的时变部分^[2,14].

由于GRACE重力卫星受到轨道设计和观测精度的制约, GRACE原始数据中的高阶球谐系数存在较大的误差, 并且在南北方向上存在十分明显的“条带”误差. 因此在进行数据处理时采用了如下步骤: (1) 从球谐系数中扣除了相应时间段上的平均值; (2) 重新加回了由卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)观测得到的C20项, 选用了2016年JPL最新公布的C20参数^[15], 同时加上Swenson计算的地心改正项; (3) 采用Geruo等人^[16]模型扣除GIA的影响; (4) 采用Chambers^[17]提出的滑动窗口方法分别去除同一次的奇数阶球谐系数和偶数阶球谐系数的相关性; (4) 使用500 km高斯平滑来降低高阶球谐系数的噪声; (5) 采用Wahr等人^[18]的方法将球谐系数转化为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球等效海平面高的格网数据; (6) 将格网数据进行面积加权(权重系数为数据所在的格网点纬度余弦)转化为时间序列^[10].

1.3 海水温盐Argo浮标数据

1998年, 美国等国家的大气海洋科学家计划推

出一个旨在快速、准确、大范围地收集全球海水温度、盐度剖面资料的全球海洋观测试验项目即Argo(array for real-time geostrophic oceanography)全球海洋观测网. 本文采用的是日本海洋地球科学技术中心(Japan Marine Science and Technology Center, JAMSTEC)发布的Argo格网数据(http://www.argo.ucsd.edu/Gridded_fields.html), 并选取2003年1月至2016年3月的数据, 该数据包含了海洋深度0~2000 m的三维温盐资料, 时间分辨率为1个月, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 将深度0~2000 m的海洋分为25层, 比容海平面变化(Δh)可以根据不同层的海水密度来进行计算:

$$\Delta h = - \sum_{i=1}^N \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \times h_i, \quad (1)$$

式中, 海水密度 ρ 与海水的温度 T 、盐度 S 和压强 P 有关, ρ_0 表示深度0~2000 m的海水平均密度^[19]. 与卫星测高、GRACE卫星重力数据相匹配, 在计算比容海平面时进行了面积加权(权重系数为格网的纬度余弦), Argo数据的范围选择在 65°S ~ 65°N 之间, 同时采用3个月的滑动平均.

1.4 正演方法

正演方法 (Forward Modelling, FM)不仅可以有效地处理陆地水量变化信号泄露到海洋区域的问题, 还有助于重构海洋、极地冰川、山地冰川和陆地区域等水量变化的真实信号, 因此本文在提取澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域、北美地区(主要指美国和加拿大)和南极+格陵兰区域这4个区域的陆地水信号时采用了FM方法. FM方法是一个迭代拟合的数学过程, 主要是将模型与GRACE观测值的差异添加到下一次迭代中去, 使得迭代拟合的结果与GRACE观测值越来越相近, 具体步骤: (1) 按照GRACE数据解算的步骤得到GRACE质量结果; (2) 将GRACE质量结果转成球谐系数并截断至60阶(其中0阶和1阶球谐系数为0), 并进行500 km高斯滤波得到FM质量结果; (3) 比较GRACE质量结果和FM质量结果之间的差异, 并将该差异逐次迭代拟合(本文迭代次数选取100)直至得到FM真实的质量结果^[20~22].

2 结果与讨论

2.1 全球平均海平面变化及其成因

利用2003~2016年的卫星测高数据、GRACE卫星

重力数据和海水温盐Argo浮标数据经过处理后分别得到GMSL时间序列如图1(b)所示, 很明显Altimetry和“GRACE+Argo”吻合较好, 相关系数为0.98(95%的置信区间). 由Altimetry, GRACE, Argo得到的海平面变化速率分别为 3.4 ± 0.38 , 2.1 ± 0.25 , 1.1 ± 0.17 mm/a, 三者均呈上升趋势. 2011~2016年, GMSL呈快速上升的趋势, Altimetry, GRACE和Argo观测得到的海平面变化速率分别 6.5 ± 1.18 , 4.1 ± 0.96 , 1.9 ± 0.39 mm/a; 2003~2010年, 海水质量和比容海平面对GMSL的贡献大致相当, 2010年以后, 海水质量的增加对GMSL上升的贡献占主导因素.

由图1(b)和表1可知从2010~2011年La Niña期间GMSL下降了7.6 mm, 其中由海水质量减少导致海平面下降了5.1 mm, 期间比容海平面也下降了1.8 mm; 2011~2012年La Niña开始减弱, GMSL总共上升了11.6 mm, 其中由于海水质量增加使得GMSL上升了7.2 mm; 2012~2013年海水质量的继续增加对GMSL贡献了4.1 mm, 而此时比容海平面上升了3.2 mm, 从图2(b)可知该年份海水质量和比容海平面对GMSL的贡献比例相当; 2011~2013年海水质量的持续增加使得海平面上升了12.3 mm, 对GMSL的贡献达74%.

结合表1和图2可知2013~2014年准La Niña期间, 虽然海水质量的减少使得海平面下降了2.3 mm, 比容海平面却上升了2.1 mm, 本文利用Argo数据只研究到海洋0~2000 m比容海平面的贡献, Purkey和Johnson^[23]认为2000 m以下的比容海平面贡献约为0.1 mm/a, 由此可见2013~2014年GMSL大致经历了一个平稳期. 而2014~2016年强El Niño期间, 海水质量的迅速增加导致全球海平面上升了13.6 mm, 比容海平面仅上升1.1 mm, 由图2可知2014~2016年强El Niño驱使海水质量的迅速增加是导致GMSL上升的主要原因.

2010~2016年GMSL的变化结果表明: 从2010~2012年强La Niña到2014~2016年强El Niño的过渡年份里(主要是2013~2014年)GMSL基本处于平稳期; 2010~2012年强La Niña期间和2014~2016年强El Niño期间GMSL的变化主要来自于海水质量的变化, 特别是2014~2016年强El Niño期间海水质量的增加对GMSL的贡献达到93%.

2.2 陆地水的年际变化及其贡献

由于El Niño(La Niña)期间全球海水质量的增加

图 1 Southern Oscillation Index (SOI)指数分布图(a)以及 2003~2016 年去除季节项后的GMSL时间序列(b). 为了便于比较我们对“GRACE+Argo”曲线(蓝色曲线)进行了平移

Figure 1 (a) Southern Oscillation Index (SOI) histogram (green curve) and SOI time series (red curve) after a 3-month boxcar smoothing; (b) global mean sea level (GMSL) variations from Altimetry (blue curve) and from “GRACE+Argo” (red curve), and ocean mass from GRACE (black curve) and steric components from Argo (green curve) respectively. Seasonal cycles are removed and a 3-month boxcar smoothing is applied to original time series. The blue curve and red curve have been offset for clarity

表 1 由Altimetry, GRACE和Argo分别得到的 8 个特定年份区间内GMSL异常差值(单位: mm)

Table 1 Global mean sea level (GMSL) abnormal differences from Altimetry, GRACE and Argo at 8 given year's intervals (unit: mm)

	2010~2011年	2011~2012年	2012~2013年	2011~2013年	2013~2014年	2014~2015年	2015~2016年	2014~2016年
Altimetry	-7.6	11.6	7.9	19.2	0.1	7.5	7.6	15.1
GRACE+Argo	-6.9	9.6	7.3	16.6	-0.2	7.6	7.1	14.7
GRACE	-5.1	7.2	4.1	12.3	-2.3	6.8	6.8	13.6
Argo	-1.8	2.4	3.2	4.3	2.1	0.8	0.3	1.1

(减少)会伴随着全球陆地水质量的减少(增加), 利用 2003~2016年GRACE卫星重力数据分别得到海水质量的变化速率(等效海平面高)和陆地水的质量变化速率(等效海平面高)为 2.1 ± 0.23 和 -2.2 ± 0.23 mm/a, 两者的相关系数为-0.99(95%置信水平). 为研究El Niño (La Niña)期间陆地水的年际变化及其对GMSL的贡献, 我们相应选取了3个不同的特定时间段如图3所示: (1) 2011JFM~2010JFM对应的是2010~2012年强

La Niña期间陆地水在增加, 该阶段全球陆地水异常主要体现在澳大利亚、南美洲北部、北美地区、东南亚以及非洲等区域; (b) 2013JFM~2011JFM对应的是2011~2013年海水质量持续增加阶段, 该阶段全球陆地水异常主要体现在西伯利亚、澳大利亚、南美洲、东南亚、格陵兰、北美地区等区域; (c) 2016JFM~2014JFM对应的是2014~2016年的强El Niño期间陆地水在减少, 该阶段全球陆地水异常主要体现在澳大利

图2 在8个特定年份区间内, 分别由Altimetry, GRACE+Argo, GRACE得到的GMSL异常差值折线图(a)以及Argo, GRACE在8个特定年份区间内分别对GMSL的贡献比例(b)

Figure 2 Global mean sea level (GMSL) abnormal differences from Altimetry, from “GRACE+Argo”, and ocean mass from GRACE, respectively (a); and contributions to GMSL from Argo, GRACE at 8 given year’s intervals (b)

图3 根据2010~2012年强La Niña事件、2014~2016年强El Niño事件, 相应选取了3个时间段内的全球陆地水异常差值分布. (a) 2011JFM~2010JFM; (b) 2013JFM~2011JFM; (c) 2016JFM~2014JFM; 其中JFM分别表示的1~3月全球陆地水异常的平均值

Figure 3 Differences of global land water mass anomalies at 3 periods based on La Niña events during 2010~2012 and strong El Niño during 2014~2016. (a) 2011JFM~2010JFM; (b) 2013JFM~2011JFM; (c) 2016JFM~2014JFM. JFM means the average of global land water variations in January, February and March

利亚、东南亚、南美洲北部、北美洲北部、非洲南部等区域。这里陆地水异常是指扣除了季节项和趋势项后的异常变化^[8,10]。

虽然格陵兰区域只在图4(b)中表现出较强的陆地水异常,但是南极和格陵兰区域对GMSL的趋势项贡献十分明显。Ramillien等人^[24]认为2002~2005年格陵兰和南极对GMSL上升的贡献分别为0.36和0.49 mm; Shepherd等人^[25]认为自1992年以来极地冰川对海平面贡献为0.59 mm; Chen等人^[26]认为2005~2011年格陵兰和南极对海平面上升的贡献分别为0.69和0.50 mm(其中1 mm大约等效于360 Gt)。因此定量研究陆地水储量对GMSL的贡献时,需要考虑南极+格陵兰区域的影响。利用2003~2016年GRACE时变重力场数据,采用FM方法反演了澳大利亚+东南亚区域,南美洲区域,北美地区(主要指美国和加拿大),南极+格陵兰区域的陆地水变化,如图3(a)所示南极对GMSL的趋势贡献为 0.44 ± 0.04 mm/a,格陵兰对GMSL的趋势贡献为 0.63 ± 0.03 mm/a,这与Chen等人^[21]、高春春等人^[27]、Watkins等人^[28]计算的南极、

格陵兰的陆地水储量变化基本一致。

从2010年进入La Niña到2011年La Niña达到峰值时澳大利亚+东南亚的陆地水储量增加了4.4 mm,而由表1可知该时间段内由于海水质量减少引起的海平面下降了5.1 mm,因此该阶段海水质量的减少主要体现在澳大利亚+东南亚区域的陆地水增加;如图3(a)和(b)所示2011~2013年海水质量持续增加阶段,南极+格陵兰区域、澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域的陆地水分别减少(等效海平面)2.2, 2.8, 2.1 mm,而该阶段内海水质量的增加对GMSL贡献7.9 mm,因此2011~2013年海水质量的增加主要由于南极+格陵兰区域、澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域减少的陆地水所贡献;结合图3和4可知在2014~2016年强El Niño期间,南极+格陵兰区域、澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域的陆地水总共下降10 mm,对GMSL的上升贡献了62%。由此可见2010~2012年强La Niña期间和2014~2016年强El Niño期间,海水质量的增加主要来自于澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域陆地水的减少。El Niño(La Niña)期间GMSL发生较大的波

图4 (a) 2003~2016年南美洲区域、南极洲+格陵兰区域、澳大利亚+东南亚区域、北美地区(主要指美国和加拿大)4个区域的陆地水储量变化分别对GMSL的贡献(为便于比较,4个区域的陆地水储量均乘以-1); (b) 2003~2016年4个区域的陆地水储量总和 $\times(-1)$ 和由GRACE直接观测得到的全球海水质量变化

Figure 4 (a) Contributions of land water storage changes to GMSL come from “Australia+Southeast Asia”, South America, “America+Canada” and “Antartic+Greenland” respectively during 2003–2016. (b) Sum of all contributions of land water storage from four regions $\times(-1)$, and global ocean mass variations observed from GRACE directly

动, 热带太平洋地区的陆地水发生异常.

由图3(b)可知2003~2016年全球海水质量变化和4个区域(南极+格陵兰、澳大利亚+东南亚、北美地区、南美洲)陆地水储量总和的变化速率分别为 2.10 ± 0.25 和 -2.11 ± 0.48 mm/a(均转化为等效海平面高), 两者的相关系数 -0.96 (95%的置信区间). 2003~2016年全球海水质量的年际变化主要来自于澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域的陆地水储量变化的贡献, 其中全球海水质量的趋势项大部分来自于南极+格陵兰区域、北美地区陆地水储量的贡献.

3 结论

本文利用卫星测高数据、GRACE卫星重力数据和海水温盐Argo浮标数据分析了2003~2016年GMSL变化特别是2014~2016年强El Niño期间GMSL年际变化以及全球水循环的贡献, 研究结果表明以下几点.

(1) 由卫星测高、GRACE卫星重力、Argo温盐浮标数据分别得到的2003~2016年海平面变化速率为 3.4 ± 0.38 , 2.1 ± 0.25 , 1.1 ± 0.17 mm/a, 2003~2010年, 海

水质量和海水膨胀对GMSL趋势变化的贡献大致相当, 2010年以后, 海水质量的增加对GMSL上升趋势的贡献占主导因素. 2010~2012年强La Niña期间和2014~2016年强El Niño期间GMSL的变化主要来自于海水质量的变化, 其中2014~2016年强El Niño期间海水质量的增加对GMSL的贡献达到了93%.

(2) 2010~2012年强La Niña期间和2014~2016年强El Niño期间, 澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域、北美地区(主要是美国和加拿大)、南极+格陵兰区域这4个区域的陆地水异常较为明显. 2010~2012年强La Niña期间由于海水质量减少导致海平面下降的5.1 mm主要由澳大利亚+东南亚区域的陆地水增加所贡献, 2014~2016年El Niño期间全球海水质量的增加基本上来自于澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域的陆地水减少的贡献. 2003~2016年全球海水质量的年际变化大部分来自于澳大利亚+东南亚区域、南美洲区域的陆地水量变化的贡献, 而全球海水质量的趋势变化大部分来自于南极+格陵兰区域、北美地区陆地水储量变化的贡献.

参考文献

- 1 Change I C. The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 2 Feng W. Regional terrestrial water storage and sea level variations inferred from satellite gravimetry (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 [冯伟. 区域陆地水与海平面变化的卫星重力监测研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2013]
- 3 Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. Trend of China land water storage redistribution at medium and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2009, 54: 1290–1294 [钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近5年中国陆地水量中空间尺度的变化趋势. 科学通报, 2009, 54: 1290–1294]
- 4 Fasullo J T, Boening C, Landerer F W, et al. Australia's unique influence on global sea level in 2010–2011. Geophys Res Lett, 2013, 40: 4368–4373
- 5 Trenberth K E, Caron J M. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. J Clim, 2000, 13: 4358–4365
- 6 Gu G, Adler R F, Huffman G J, et al. Tropical rainfall variability on interannual to interdecadal and longer time scales derived from the GPCP monthly product. J Clim, 2007, 20: 4033–4046
- 7 Cazenave A, Llovel W. Contemporary sea level rise. Annu Rev Mar Sci, 2010, 2: 145–173
- 8 Boening C, Willis J K, Landerer F W, et al. The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. Geophys Res Lett, 2012, 39: 4368–4373
- 9 Yi S, Sun W K, Heki K, et al. An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010. Geophys Res Lett, 2015, 42: 3998–4006
- 10 Zhong Y L, Zhong M, Feng W. Monitoring the cause of global mean sea level with satellite gravity and analyzing the correlation with ENSO in recent decade (in Chinese). Prog Geophys, 2016, 2: 643–648 [钟玉龙, 钟敏, 冯伟. 近十年全球平均海平面变化成因的卫星重力监测研究以及与ENSO现象的相关分析. 地球物理学进展, 2016, 2: 643–648]
- 11 Feng W, Zhong M. Global sea level variations from altimetry, GRACE and Argo data over 2005–2014. Geodesy Geodyn, 2015, 6: 274–279
- 12 Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, et al. A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008. Ocean Sci, 2009, 5: 193–201

- 13 Feng W, Zhong M, Xu H Z. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1696–1701 [冯伟, 钟敏, 许厚泽. 联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究中国南海海平面变化. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 313–319]
- 14 Kuo C Y, Shum C K, Guo J Y, et al. Southern ocean mass variation studies using GRACE and satellite altimetry. *Earth Planets Space*, 2008, 60: 477–485
- 15 Cheng M, Tapley B D, Ries J C. Deceleration in the Earth's oblateness. *J Geophys Res*, 2013, 118: 740–747
- 16 Geruo A, Wahr J, Zhong S J. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: An application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophys J Int*, 2012, 192: 557–572
- 17 Chambers D P. Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: 387–390
- 18 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 Geophys Res*, 1998, 103: 30205–30229
- 19 Fofonoff N P, Millard J R. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. Technical Report. Technical Papers in Marine Science. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1983
- 20 Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Patagonia Icefield melting observed by Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Geophys Res Lett*, 2007, 34: 315–324
- 21 Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. *Nat Geosci*, 2013, 6: 549–552
- 22 Chen J L, Wilson C R, Li J, et al. Reducing leakage error in GRACE-observed long-term ice mass change: A case study in west Antarctica. *J Geodesy*, 2015, 89: 925–940
- 23 Purkey S G, Johnson G C. Warming of global abyssal and deep southern ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets. *J Clim*, 2010, 23: 6336–6351
- 24 Ramillien G, Lombard A, Cazenave A, et al. Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. *Glob Planet Change*, 2006, 53: 198–208
- 25 Shepherd A, Ivins E R, Geruo A, et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 2012, 338: 1183–1189
- 26 Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. Antarctic regional ice loss rates from GRACE. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 266: 140–148
- 27 Gao C C, Lu Y, Zhang Z Z, et al. Detecting the Antarctic ice sheet mass balance and its uncertainty by GRACE gravity satellite (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 3: 780–792 [高春春, 陆洋, 张子占, 等. GRACE 重力卫星探测南极冰盖质量平衡及其不确定性. *地球物理学报*, 2015, 3: 780–792]
- 28 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 Geophys Res*, 2015, 120: 2648–2671

Summary for “2014–2016 年 El Niño 期间全球平均海平面的年际变化及全球水循环的贡献”

Global mean sea level variations and the land water cycle at the inter-annual scale during the 2014–2016 El Niño episode

CHEN Wei^{1,2*}, ZHONG Min^{1*}, ZHONG YuLong^{1,2}, FENG Wei¹ & ZHANG MingYue^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: zmzm@asch.whigg.ac.cn; chenwei@asch.whigg.ac.cn

Since 1993, the global mean sea level (GMSL) has been rising at a rate of about 3 mm/a detected by multi-satellite radar altimetry. The spaceborne gravimetry satellite, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), has been monitoring Earth's surface water mass variations since 2002. La Niña and El Niño events induces inter-annual variations of the GMSL manifest in ocean mass and steric sea level changes, linked with corresponding changes in land water cycle. Here we study the GMSL inter-annual variations and global land water mass changes integrating satellite altimetry, GRACE and Argo data, 2010–2016, during which strong La Niña and El Niño events occurred.

First, we quantify the evolutions of GMSL during the study time period. The results show that during the 2010–2011 La Niña episode, the GMSL dropped rapidly to 7.6 mm, with the ocean mass and the steric sea level decreased to 5.1 mm and to 1.8 mm, respectively. GMSL then increased to 19.2 mm, with ocean mass increased to 12.3 mm during 2011–2013. From 2013 to 2014, the steric GMSL increased by 2.1 mm, and the ocean mass variations dropped by 2.3 mm, thus the total GMSL remains nearly unchanged. During the strong 2014–2016 El Niño, ocean mass variations increased by 13.1 mm and contributed over 90% of GMSL change, which rises up by 15.1 mm.

Next, we analyze land water mass changes in four regions, namely Australia and Southeast Asia, South America, North America, Antarctica and Greenland, and investigate their linkage to the GMSL inter-annual variations. Here, we used the Forward Modelling (FM) method for GRACE data post-processing to reduce signal leakage problem to estimate land water storage mass changes. The results show that during the 2014–2016 El Niño episode, the global ocean mass increasing is mainly due to the total land water storage decreasing in Australia and Southeast Asia, South America, and Antarctica and Greenland. The inter-annual variations of global ocean mass variation during 2003–2016 is closely linked with the land water storage changes from Australia and Southeast Asia and the South America regions, which are strongly affected by La Niña and El Niño events. During 2003–2016, the ice ablations from the Antarctica and Greenland ice sheets directly contributed to GMSL rising, as opposed to the land water mass increase in the North America region, which has a negative effect on GMSL trend.

Finally, we estimated the GMSL, ocean mass and steric sea level trends at 3.4 ± 0.4 , 2.1 ± 0.3 , and 1.1 ± 0.2 mm/a, respectively during 2003–2016, and 6.5 ± 1.2 , 4.1 ± 1.0 , and 1.9 ± 0.4 mm/a, respectively during 2010–2016. We concluded that the ocean mass variation contributed to the GMSL trend two times larger than that of the steric sea level contribution during these two time periods. However the ocean mass variation is roughly equivalent to the steric sea level variation during 2003–2010.

GMSL, ocean mass variations, land water cycle, El Niño

doi: 10.1360/N972016-01377