



ENSO影响下的西太平洋地区海陆水储量变化分析

刘冰石¹ 邹贤才^{1,2}

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:利用2005-01—2016-12的GRACE卫星数据,结合测高、ARGO(array for real-time geostrophic oceanography)、TRMM(tropical rainfall measurement mission)降水数据和MEI(multivariate ENSO index),从海平面、海水质量、海水比容和陆地水储量的非季节性变化分析了厄尔尼诺-南方涛动(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)对西太平洋及其沿岸地区的影响。在GRACE数据处理过程中考虑了地震构造信号的影响,并采用正演模型法来恢复时变信号。结果表明,西太平洋地区平均海平面(western Pacific mean sea level, WPMSL)变化对ENSO的响应表现为:厄尔尼诺期间海平面下降,拉尼娜期间海平面上升;尤其在2014—2016年厄尔尼诺期间,WPMSL下降了近26.2 mm。比容变化为影响WPMSL非季节性变化的主导因素。澳大利亚和中南半岛水储量异常在年际变化上也较好响应了ENSO,与MEI的相关系数分别为-0.61(滞后3个月)和-0.65(滞后8个月)。长江流域对ENSO的响应主要在中下游区域,2014—2016年厄尔尼诺造成了该时期长江流域水储量达到近几年的极大值。

关键词:GRACE; 正演模型法; 海平面变化; 陆地水储量变化; 西太平洋; ENSO

中图分类号:P223

文献标志码:A

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)是厄尔尼诺和拉尼娜的统称,海平面变化深受ENSO的影响^[1-2]。2010—2011年太平洋赤道处发生了近80 a来最强的ENSO寒冷事件(即2010—2011年拉尼娜),该事件导致全球平均海平面(global mean sea level, GMSL)骤降约5 mm^[2]。2014年起太平洋赤道处再次发生了一次超强厄尔尼诺,并于2015年底至2016年初达到顶峰,研究表明本次事件为1951年以来的最强事件^[3],进一步影响了海平面变化。

重力卫星GRACE(gravity recovery and climate experiment)自发射以来,已为人们研究大尺度范围、高精度的陆地水变化、海水质量变化提供了丰富的研究资料。随着ARGO(array for real-time geostrophic oceanography)计划的不断推进,人们能够实时、不间断地获得高精度、高分辨率的海水比容(密度)变化。理论上讲,ARGO数据获得的海水比容变化与GRACE数据获得的海水

质量变化之和应接近于测高数据的观测值,对此,国内外许多学者已有验证^[4-7]。

目前,国内外学者对海平面变化的研究多限于全球尺度上^[4-9],对局部区域的海平面变化及其变化机制的研究相对较少。在2010—2011年拉尼娜和2014—2016年厄尔尼诺两次超强的ENSO背景下,研究西太平洋地区的海平面变化及其成因以及是否与全球平均海平面变化相一致值得探讨。

在GRACE数据处理过程中产生的泄露误差往往会对GRACE信号估计造成较大影响,尤其是在海水质量变化的研究中^[8]。海洋信号的强度往往仅为毫米量级(等效为水高),而陆地水文信号的强度往往在厘米甚至分米量级(等效为水高),因此在海陆交界处海洋信号极易受到陆地信号的污染,从而降低对海水质量变化估计的可靠性。目前,国内外学者在计算海水质量变化时,为削弱海陆交界处泄露误差的影响,往往将

收稿日期:2018-05-14

项目资助:国家自然科学基金(41874021);民用航天“十三五”技术预先研究项目;重力梯度测量卫星系统技术项目。

第一作者:刘冰石,博士生,主要从事卫星大地测量研究。bs.liu@whu.edu.cn

通讯作者:邹贤才,博士,教授。xczou@whu.edu.cn

靠近陆地 300 km 或 600 km 以内的海洋区域移除^[6-9],这在计算全球尺度的海水质量变化时能有效地削弱泄露误差的影响。但对于本文研究的局部区域,若将靠近陆地 300 km 或 600 km 以内的海洋区域移除,必然会影响到局部海水质量变化的估计。同时,目前国内外学者多采用尺度因子法^[10]来恢复陆地信号。但尺度因子的计算完全依赖于先验地表模型的选择^[11],现有的地表模型往往缺乏一些关键的物理信息,如地下水变化、高山冰雪消融等,因此一定程度上也会影响到 GRACE 解算结果的可靠性。为了更好地对泄露误差进行校正,本文采用了正演模型法,该方法在信号恢复过程中仅受 GRACE 原始观测值的约束,能有效地恢复陆地时变信号,削弱陆地信号向海洋区域的泄露,可有效估计西太平洋地区的海水质量变化。

地震引起的重力信号变化同样可被 GRACE 卫星探测到,尤其是震级较大的地震,其引起的重力信号变化在空间尺度上可影响至数千公里,时间尺度上可影响至数十年^[12]。在早期的海平面变化研究中,地震信号(尤其是震后松弛信号)的影响往往尚未考虑,这可能会影响到最终的趋势估计。本文将提取并移除研究时期内的地震构造信号,从而进一步提高质量估算结果的可靠性。

除 GRACE 数据外,本文还结合了 2005-01—2016-12 的卫星测高、ARGO、TRMM (tropical rainfall measurement mission) 降水数据以及 MEI (multivariate ENSO index) 等多种数据,从海平面、海水质量、海水比容和陆地水储量的非季节性变化角度对 ENSO 影响下的西太平洋地区 (90°E~150°W, 45°N~45°S) 的海陆水储量变化进行详细的探讨。

1 数据与方法

1.1 GRACE 数据反演地表质量变化方法

采用德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, CSR) 提供的 GRACE RL05 数据,时间范围包含 2005-01—2016-12 共计 128 个月的数据 (部分月份数据缺失),只采用前 60 阶的位系数。加回 Swenson 等^[13]计算的 1 阶项,利用卫星激光测距测得的 $C_{2,0}$ 项对 GRACE 原始的 $C_{2,0}$ 项进行了替换。采用 500 km 的高斯平滑滤波^[14]来削弱 GRACE 位系数中原有的高频误差。选用 ICE-6G 模型^[15]进行冰川均衡调整 (glacial

isostatic adjustment, GIA) 改正。

由于研究区域的重力场信号受到 2004 年苏门答腊地震 (震级 $M_w = 9.15 \sim 9.3$) 和 2011 年日本东北大地震 (震级 $M_w \approx 9.0$) 的影响,震后松弛信号将会影响到最终估算的质量变化趋势。因此,本文采用 Broerse 等^[16]给出的方法来提取两大地震的构造信号,即:

$$U(t) = H(t - t_{eq}) \left(h + i \ln \left(1 + \frac{t - t_{eq}}{\tau_{ln}} \right) \right)$$

式中, $H(\cdot)$ 为赫维赛德函数; t_{eq} 为地震发生时刻; h 指同震信号; i 为待估系数; τ_{ln} 为震后松弛时间常数,本文取 τ_{ln} 为 5 a。

位系数的截断和空间平滑的使用会造成时变信号的损失和泄露,尤其在海陆交界处。本文采用 Chen 等^[17]提出的正演模型法来恢复时变信号,该方法的基本原理为通过迭代调整使得模拟模型逐渐逼近观测值来恢复时变信号^[18-19]。

利用 GRACE 数据计算得到的 2005-01—2016-12 西太平洋及沿海地区地表质量变化速率 (等效为水高) 如图 1 所示。图 1(a) 和图 1(b) 均为 500 km 高斯平滑后的结果,且未移除地震构造信号的影响,图 1(b) 的色标范围相对较小,以体现海洋区域的信号变化。对比图 1(a) 和图 1(b) 可以发现,海陆交界处存在大量陆地信号向海洋泄露的情况,两大地震的构造信号同样较为显著。图 1(c) 为移除地震构造信号并采用迭代恢复后的质量变化速率分布,改正后的陆地信号得到了明显的增强,一定程度上恢复了经空间平滑后所削弱的信号。将图 1(c) 的色标范围进一步缩小得到图 1(d),相较图 1(b),图 1(d) 中海陆交界处的信号泄露现象和地震构造信号均得到有效的移除。

1.2 卫星测高数据

采用法国 AVISO (archiving, validation, and interpretation of satellite oceanographic data) 提供的月平均海平面异常数据,时间范围为 2005-01—2016-12。该数据融合了 TOPEX/Poseidon、Jason-1 和 Jason-2 等多种测高卫星资料,移除了轨道误差并进行了必要的标准改正^[6]。该数据未加入 GIA 改正,因此本文利用 ICE-6G 模型对其进行 GIA 改正。该数据的格网分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 本文将其插值到 $1^\circ \times 1^\circ$, 进而获得西太平洋的平均海平面变化时间序列。

1.3 ARGO 数据

ARGO 计划于 1999 年开始实施^[20],其目的

是通过在全球海洋布设大量的自持式自由漂流的剖面浮标,对2 000 m以上的海洋温度、盐度和

流速进行连续实时监测。ARGO浮标于2005年基本达到全球布设,于2007年初步建成^[17]。

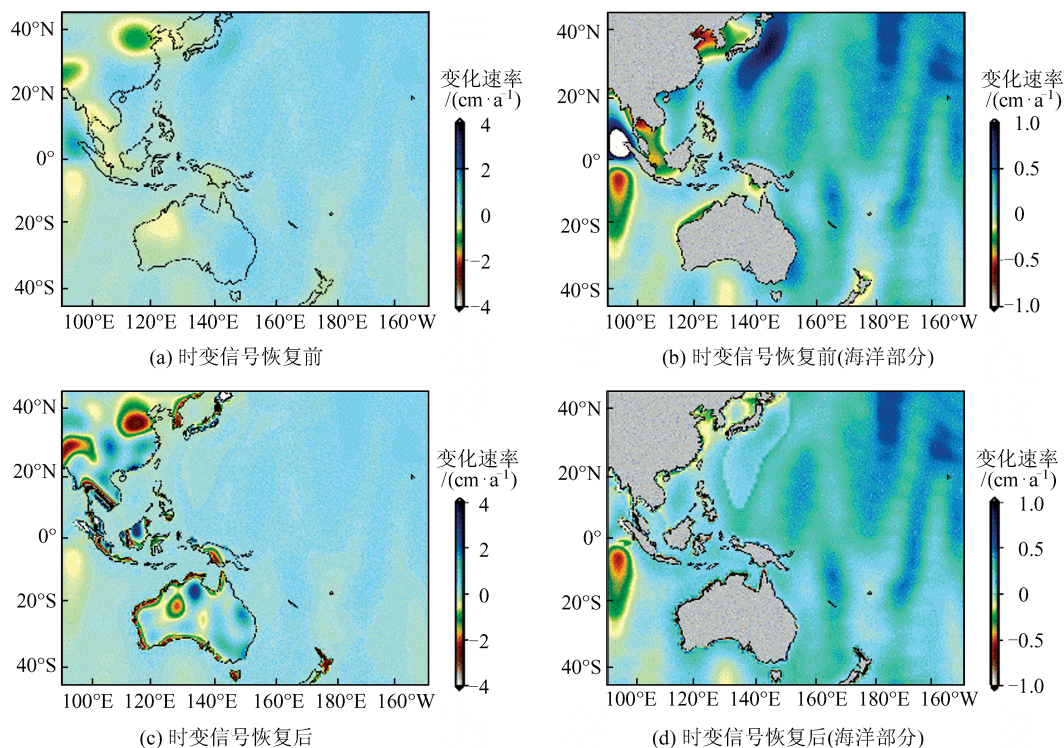


图1 西太平洋及沿海地区地表质量变化速率分布

Fig.1 Distributions of Mass Change Rates in the Western Pacific and Coastal Areas

本文选用日本海洋研究开发机构(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)、斯克利普斯海洋研究中心(Scripps Institution of Oceanography, SIO)和夏威夷大学太平洋研究中心(International Pacific Research Center, IPRC)3家机构提供的月平均ARGO海洋温度、盐度数据。空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,提供0~2 000 m海水深度的三维数据。选取的时间范围为2005-01—2016-12,数据积分深度至2 000 m,采用3家机构的平均值获得西太平洋平均海水比容变化。

1.4 TRMM降水数据

热带降雨检测卫星TRMM由美国宇航局和日本宇宙航空开发机构共同研制,于1997年成功发射,主要目的为检测中低纬度的降水信息。本文采用3B43数据,时间分辨率为1个月,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,为与其他数据保持一致,本文将其插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

1.5 MEI

MEI由美国国家海洋和大气管理局提供。该指数利用近实时海洋船舶和浮标观测数据并整合其他观测信息来分析海洋和大气耦合系统的性质,能够全程检测ENSO现象。在MEI指数

中,正值表示厄尔尼诺,负值表示拉尼娜。

2 结果与分析

考虑到本文研究的时变信号时间序列中均具有明显的年周期和半年周期特性,因此在对时间序列进行最小二乘线性拟合时,主要考虑线性趋势项、年周期项和半年周期项3部分。ENSO对水储量变化的影响主要体现在时间序列的非周期项上,本文将拟合后的时间序列的周期项剔除,并进行3个月的滑动平均以去除时间序列中60 d的高频信号^[21],进而获得时间序列中的年际变化信号。

2.1 海平面变化分析

西太平洋地区平均海平面(Western Pacific mean sea level, WPMSL)、海水质量和海水比容年际变化如图2所示,相应的变化趋势见表1。为了与GMSL变化相对比,本文同样也给出了由测高数据估计的GMSL年际变化时间序列。由质量(GRACE)+比容(ARGO)估计的WPMSL年际变化与测高观测结果在2007年后基本趋于吻合,而在2005—2006年间的匹配结果较差,这可能与此期间的ARGO计划仍在建设阶段且数据

质量较差有关^[18]。这也影响了最终的趋势估计,即 2005-01—2010-12 和 2005-01—2016-12 时间段内的 GRACE+ARGO 趋势估算结果均低于测高观测结果,而在 2011-01—2016-12 期间两类估算结果则基本相当。

2005—2016 年 WPMSL 总体呈上升趋势,这主要来自于海水质量变化的贡献。2011 年后, GMSL 开始加速上升,且以海水质量变化的贡献为主^[4-6],而 WPMSL 的变化速率则呈现出与 GMSL 相反的结果,由 $(4.43 \pm 1.26) \text{ mm/a}$ (2005-01—2010-12) 下降为 $(-1.65 \pm 1.49) \text{ mm/a}$, 比容变化是该阶段 WPMSL 下降的主导因素。

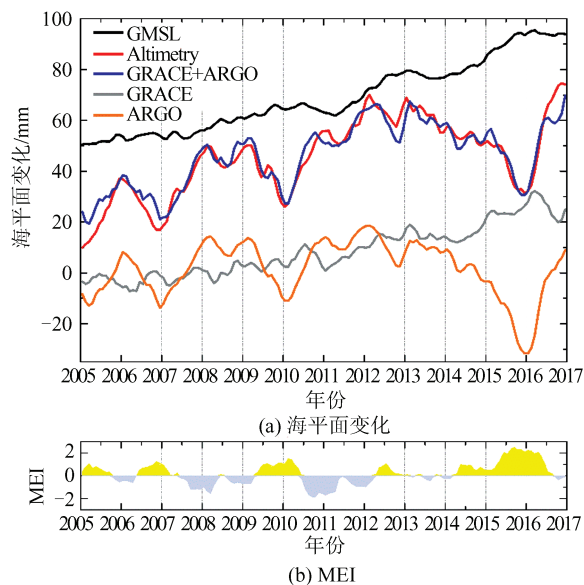


图2 西太平洋地区海平面年际变化时间序列及 MEI
Fig.2 Time Series of Interannual Variations of Sea Level in the Western Pacific and MEI

早期研究表明, GMSL 与 ENSO 的相关性体现在: 厄尔尼诺期间, GMSL 上升, 而拉尼娜期间则呈现出下降趋势^[22]。在此, 将西太平洋地区海平面、海水质量和海水比容年际变化的趋势项移除, 获得相应的非趋势性年际变化, 并将其与 MEI 相比较, 探寻西太平洋地区海平面变化与 ENSO 的联系, 如图 3 所示, 与 MEI 的相关系数见表 1。

与 GMSL 对 ENSO 的响应相反, WPMSL 与 MEI 呈现出明显的负相关, 相关系数为 -0.75 , 即拉尼娜期间, 海平面上升; 厄尔尼诺期间, 海平面下降。尤其是在 2014—2016 年厄尔尼诺期间, WPMSL 下降了近 26.2 mm (2014-01—2015-12), 达到近几年的最低值。比容变化与 MEI 也呈现出很强的负相关, 相关系数达到了 0.78 ; 而海水质量变化对 ENSO 的响应相对较低, 相关系数仅为

0.44 。海水质量变化对 WPMSL 的非季节性变化的影响较小, 海水比容变化为影响西太平洋地区海平面非季节性变化的主导因素。

厄尔尼诺期间, 太平洋赤道处东南信风减弱, 西风增强, 暖水东移, 西太平洋地区海温变冷, 海水体积收缩, 拉尼娜期间则相反, 这可能是造成西太平洋地区海水比容变化与 MEI 呈现出负相关的主要原因。

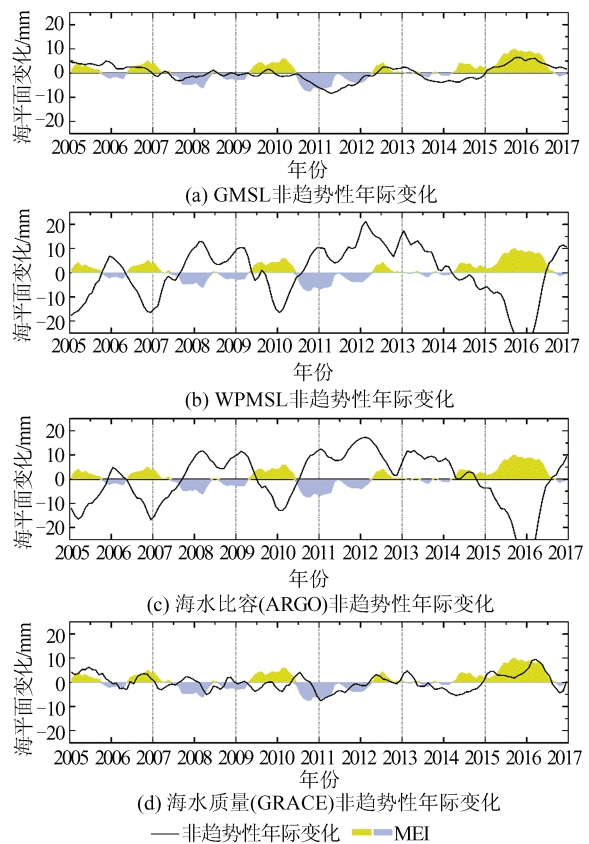


图3 西太平洋地区海平面异常非趋势性变化序列与 MEI 比较

Fig.3 Comparison of Non-trending Interannual Variations of the Sea Level Change in the Western Pacific with MEI

2.2 陆地水储量变化分析

西太平洋沿岸 3 个典型区域 (长江流域、中南半岛和澳大利亚大陆) 的水储量和降水量异常年际变化如图 4 所示。为展现 ENSO 对西太平洋沿岸地区陆地水储量的影响, 本文给出了西太平洋地区 2011 年 3、4、5 月的平均陆地水储量异常 (即 2010—2011 年拉尼娜期间) (图 5(a)) 和 2015 年 12 月、2016 年 1、2 月的平均陆地水储量异常 (即 2014—2016 年厄尔尼诺期间) (图 5(c))。这里的“异常”是指移除周年和半年项后相对于长期趋势的偏差^[18]。通过时间序列分析发现, 西太平洋沿岸地区陆地水储量变化时间序列整体上较

陆地降水变化时间序列滞后约2.8个月,因此图5中相应的降水异常的时间选择为:图5(b)为2010年12月、2011年1、2月这3个月的平均值,图5(d)为2015年9、10、11月这3个月的平均值。

表1 不同时间段西太平洋地区平均海平面、海水质量、海水比容变化趋势/(mm·a⁻¹)
Tab.1 Trends of Sea Level Change, Ocean Mass Change and Steric Change with Different Periods in the Western Pacific /(mm·a⁻¹)

海平面变化	时间段			与MEI的相关系数
	2005-01—2016-12	2005-01—2010-12	2011-01—2016-12	
GMSL	3.88±0.17	2.88±0.25	5.59±0.41	0.62
WPMSL	3.01±0.56	4.43±1.26	-1.65±1.49	-0.75
质量(GRACE)+比容(ARGO)	2.38±0.50	3.65±1.17	-1.61±1.28	-0.73
质量(GRACE)	2.72±0.19	1.91±0.45	3.83±0.54	0.44
比容(ARGO)	-0.33±0.54	1.74±1.15	-5.44±1.35	-0.78

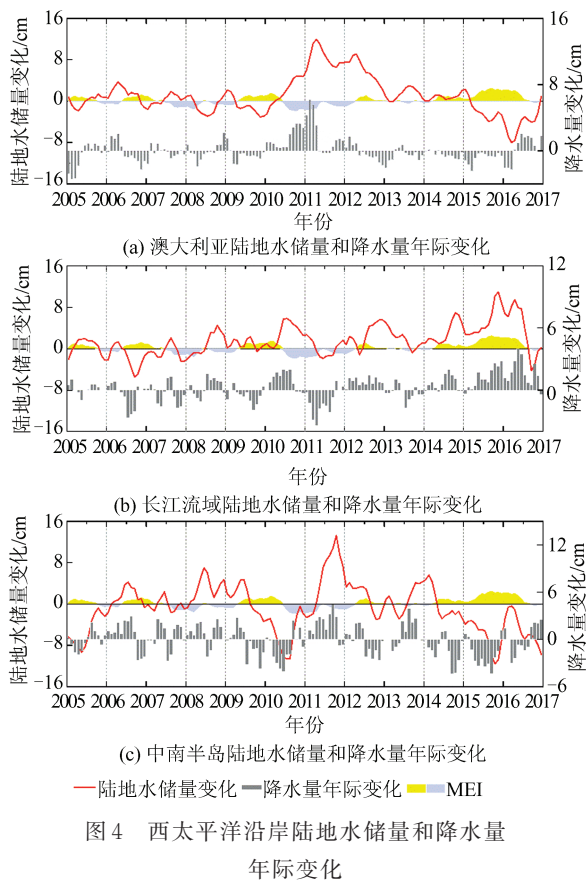


图4 西太平洋沿岸陆地水储量和降水量年际变化
Fig.4 Time Series of Interannual Variations of Terrestrial Water Storage and Land Precipitation in the Western Pacific Coastal Areas

陆地水储量变化对ENSO的响应往往存在一定的滞后^[23]。图6给出了以上不同区域的陆地水储量非趋势性年际变化在不同滞后月份下与MEI的相关系数序列。

从图6(a)可以看出,澳大利亚地区水储量变化整体上与MEI呈现负相关,约为-0.61(滞后3个月),即拉尼娜期间水储量盈余,厄尔尼诺期间

亏损。2010年中旬至2011年底,伴随着较往年异常的强降雨,澳大利亚地区水储量呈现出骤增的趋势,尤其是澳大利亚北部地区的水储量明显增加(图5(a)、图5(b))。2010—2011年拉尼娜以及同期伴随的较强印度洋偶极和南方环状模^[24]共同导致了澳大利亚地区出现了自2005年来陆地水储量最大的一次盈余。2012年中旬后,澳大利亚地区水储量开始呈现出下降趋势,并在2014—2016年厄尔尼诺期间加速亏损。

图4(b)表明,长江流域整体上对ENSO的响应没有明显的规律,这可能是由于长江流域东西跨度较大,且上游深居内陆,受海洋环境影响较小。从图5也可以看出,长江流域(图5中虚线范围内)的水储量变化和降水变化主要集中在中下游地区,上游地区并不明显。进一步将长江流域分离,分别计算了上游和中下游地区与MEI序列的相关系数(图6(b))。可以发现,上游地区几乎与MEI不相关,且相关系数在-0.2~0.2间浮动;而中下游地区对ENSO的响应明显,在滞后3~6个月内均存在较大的相关系数(0.53~0.57),其中在滞后5个月时达到最大值(0.57)。2014—2016年厄尔尼诺较大程度上影响了长江流域的水储量变化,自2015年起降水量逐步增加,随之水储量盈余达到了2005年以来的最大值。

与澳大利亚地区相似,中南半岛水储量变化与MEI也呈现出明显的负相关(图6(c))。由于该区域距西太平洋区域相对较远,因此对ENSO的响应滞后时间较长,在滞后8个月时相关系数达到最大值(-0.65)。2014年至2016年中旬,在厄尔尼诺的影响下,中南半岛降水量长期匮乏,致使水储量明显亏损。

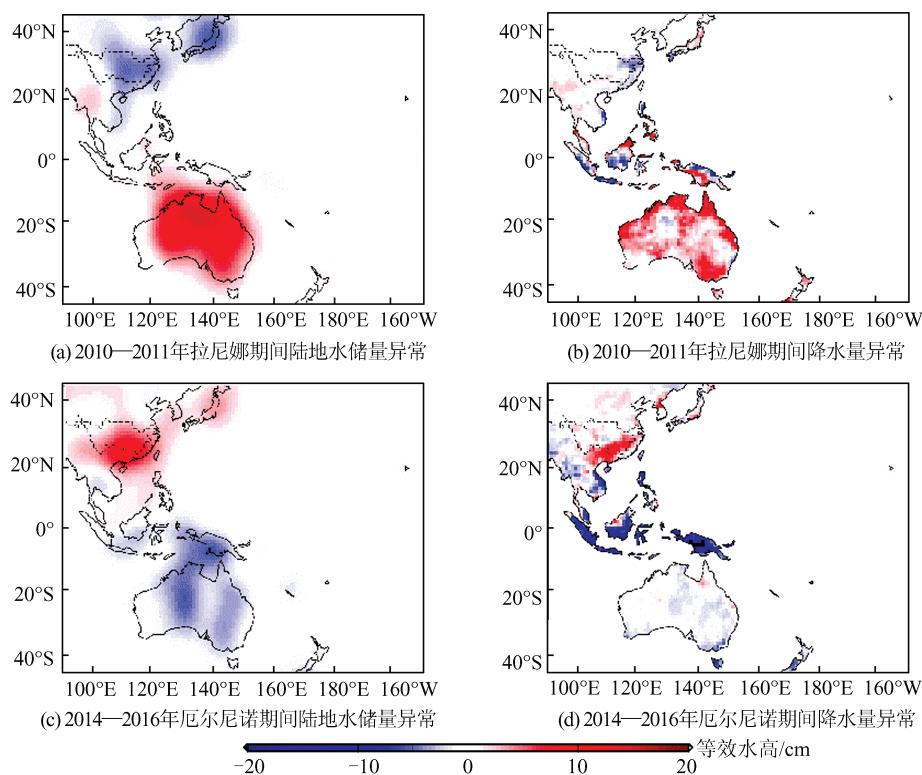


图5 ENSO影响下的西太平洋沿岸陆地水储量和降水量异常

Fig.5 Anomalies of Terrestrial Water Storage and Precipitation in the Western Pacific Coastal Areas Under the Influence of ENSO

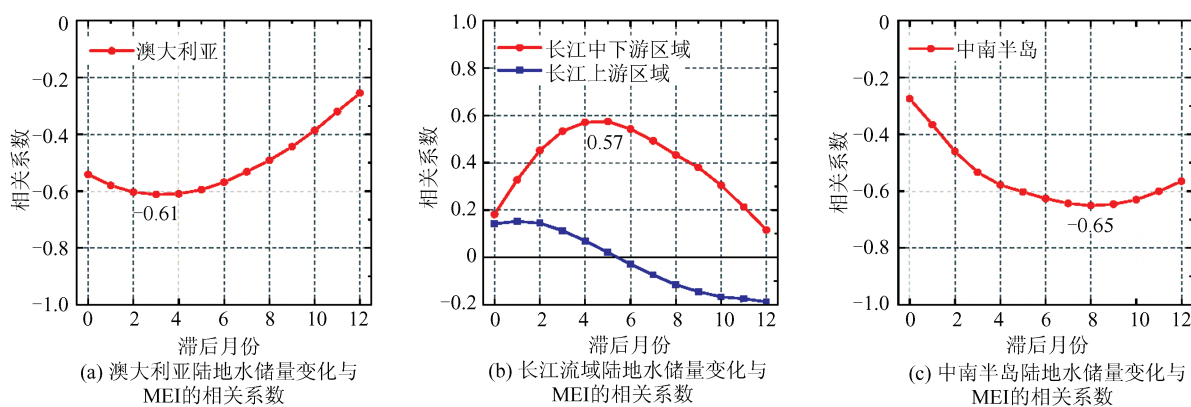


图6 不同滞后月份下陆地水储量变化与MEI的相关系数

Fig.6 Correlation Coefficients of Terrestrial Water Storage and MEI Under Different Lagging Months

3 结 语

本文在移除地震构造信号的前提下,采用基于正演模型法的GRACE质量反演方法,并结合测高、ARGO、TRMM降水数据以及MEI从海平面变化、陆地水储量变化等角度分析了ENSO影响下的西太平洋地区海陆水储量变化。结果表明:

1) 2005—2016年,由测高数据获得的WPMSL呈上升趋势,约为 (3.01 ± 0.56) mm/a,低于同期GMSL上升速率,海水质量变化为

WPMSL上升的主导因素。由质量(GRACE)+比容(ARGO)估计的WPMSL年际变化与测高观测结果在2007年后基本趋于吻合,而在2005—2006年期间的匹配结果较差,这可能与此期间的ARGO计划仍处于建设阶段且数据质量较差有关。

2) 与GMSL相反,WPMSL对ENSO的响应表现为:厄尔尼诺期间,海平面下降;拉尼娜期间,海平面上升。比容变化为影响WPMSL对ENSO响应的主导因素。在2014—2016年厄尔尼诺的影响下,2014-01—2015-12西太平洋地区

的平均海平面下降了近 26.2 mm,达到近几年的最低值。

3)西太平洋陆地地区的水储量变化也较好地响应了 ENSO。其中,澳大利亚和中南半岛与 MEI 呈负相关,相关系数分别为 -0.61 (滞后 3 个月)和 -0.65 (滞后 8 个月)。中南半岛距西太平洋相对较远,导致了陆地水储量变化对 ENSO 的响应滞后时间较长。

4)长江流域对 ENSO 的响应主要以中下游地区为主,相关系数为 0.57 (滞后 5 个月)。在 2014—2016 年厄尔尼诺的影响下,长江流域呈现出降水量增多、水储量增加的现象。

致谢:感谢 CSR 提供的 GRACE 数据、AVISO 提供的卫星测高数据、JAMSTEC、SIO 和 IPRC 提供的 ARGO 数据、GES DISC 提供的 TRMM 数据以及 NOAA 提供的 MEI 数据;感谢武汉大学高性能计算中心提供的计算支持。

参 考 文 献

- [1] Nerem R S, Chambers D P, Choe C, et al. Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(s1):435-446
- [2] Boening C, Willis J K, Landerer F W, et al. The 2011 La Niña: So Strong, the Oceans Fell[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19):1-5
- [3] Yuan Yuan, Zhou Ningfang, Li Chongyin. Correlation Between Haze in North China and Super El Niño Events[J]. *Chinese J Geophys*, 2017, 60(1):11-21(袁媛,周宁芳,李崇银.中国华北雾霾天气与超强 El Niño 事件的相关性研究[J].地球物理学报,2017,60(1):11-21)
- [4] Feng Wei, Zhong Min, Xu Houze. Global Sea Level Changes Estimated from Satellite Altimetry, Satellite Gravimetry and Argo Data During 2005—2013[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(2):471-477(冯伟,钟敏,许厚泽.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,2014,29(2):471-477)
- [5] 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.武汉大学学报·信息科学版,2015,40(11):1453-1459)
- [6] Chambers D P, Cazenave A, Champollion N, et al. Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget Between 1993 and 2014[J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(1):1-19
- [7] Willis J K, Chambers D P, Nerem R S. Assessing the Globally Averaged Sea Level Budget on Seasonal to Interannual Timescales[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C6):205-210
- [8] Chambers D P. Evaluation of New GRACE Time-Variable Gravity Data over the Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17):1-5
- [9] Chambers D P, Bonin J A. Evaluation of Release-05 GRACE Time-Variable Gravity Coefficients over the Ocean[J]. *Ocean Science*, 2012, 8(5):859-868
- [10] Landerer F W, Swenson S C. Accuracy of Scaled GRACE Terrestrial Water Storage Estimates[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4):W04531
- [11] Yi S, Wang Q, Sun W. Basin Mass Dynamic Changes in China from GRACE Based on a Multibasin Inversion Method[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(5):3782-3803
- [12] Han S, Riva R, Sauber J, et al. Source Parameter Inversion for Recent Great Earthquakes from a Decade-Long Observation of Global Gravity Fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(3):1240-1267
- [13] Swenson S, Chambers D, Wahr J. Estimating Geocenter Variations from a Combination of GRACE and Ocean Model Output[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(B8):194-205
- [14] 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*, 1998, 103(B12):30205-30230
- [15] Peltier W R, Argus D F, Drummond R. Space Geodesy Constrains Ice Age Terminal Deglaciation: The Global ICE-6G_C (VM5a) Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(1):450-487
- [16] Broerse T, Riva R, Simons W, et al. Postseismic GRACE and GPS Observations Indicate a Rheology Contrast Above and Below the Sumatra Slab[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(7):5343-5361
- [17] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Contribution of Ice Sheet and Mountain Glacier Melt to Recent Sea Level Rise[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(7):549-552
- [18] Yi S, Sun W, Heki K, et al. An Increase in the

- Rate of Global Mean Sea Level Rise Since 2010[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(10):3 998-4 006
- [19] Yi S, Sun W, Feng W, et al. Anthropogenic and Climate-Driven Water Depletion in Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 9 061-9 069
- [20] Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen Years of Ocean Observations with the Global Argo Array[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2):145-153
- [21] Masters D, Nerem R S, Choe C, et al. Comparison of Global Mean Sea Level Time Series from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2[J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(s1):20-41
- [22] Piecuch C G, Quinn K J. El Niño, La Niña, and the Global Sea Level Budget[J]. *Ocean Science*, 2016, 12(6):1-18
- [23] Zhang Z, Chao B F, Chen J, et al. Terrestrial Water Storage Anomalies of Yangtze River Basin Droughts Observed by GRACE and Connections with ENSO[J]. *Global & Planetary Change*, 2015, 126:35-45
- [24] Fasullo J T, Boening C, Landerer F W, et al. Australia's Unique Influence on Global Sea Level in 2010—2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16):4 368-4 373

Analysis of Sea and Land Water Storage Changes in the Western Pacific Under the Influence of ENSO

LIU Bingshi¹ ZOU Xiancai^{1,2}

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper, the gravity recovery and climate experiment (GRACE), altimetry, ARGO, TRMM (tropical rainfall measurement mission) data and multivariate ENSO index (MEI) from January 2005 to December 2016 are adopted to analyze the effects of ENSO on the Western Pacific and its coastal areas, from the aspects of sea level, oceanic mass, steric and the terrestrial water storage change. During the GRACE data processing, we remove the effect of tectonic signals, and use an iterative forward modeling method to recover time-varying signal. The result shows, the changes in the Western Pacific mean sea level (WPMSL) in response to ENSO are as follows: The sea level is lower during El Niño and higher during La Niña; in particular, during 2014—2016 El Niño, the WPMSL dropped by nearly 26.2 mm. The steric change is the dominant factor affecting the nonseasonal anomalies of the WPMSL. The nonseasonal anomalies of water storage in Australia and Indochina Peninsula also respond well to the ENSO, and the correlation coefficients with the MEI are -0.61 (lag three months) and -0.65 (lag eight months). The response of the Yangtze River basin to ENSO is mainly in the middle and lower basin, 2014—2016 El Niño caused the water storage in the Yangtze River basin to reach the maximum value in recent years.

Key words: GRACE; forward modeling; sea level change; land water storage change; the Western Pacific; ENSO

First author: LIU Bingshi, PhD candidate, specializes in satellite geodesy. E-mail:bs.liu@whu.edu.cn

Corresponding author: ZOU Xiancai, PhD, professor. E-mail:xczou@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41874021; Civil Aerospace “13th Five-Year” Preliminary Research Project; Gravity Gradient Measurement Satellite System Research Project.