

联合卫星重力、卫星测高和海洋资料 研究全球海平面变化

张保军¹ 王泽民¹

¹ 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:利用 GRACE、卫星测高和海洋实测温盐数据,探讨了 2003~2012 年间全球海平面、比容海平面和海水质量等的变化特征,并讨论了南极冰盖和格陵兰冰盖消融对全球海平面变化的影响。全球海平面整体呈上升趋势,上升速度为 2.72 ± 0.07 mm/a,且存在显著的空间分布特征。全球海平面、比容海平面和海水质量等的变化还具有显著的季节性特征,其中全球海平面变化的年周期振幅为 4.6 ± 0.3 mm。使用经验正交函数分析 EOF 得到全球海平面和比容海平面的季节性变化在南北半球存在显著的差异,但海水质量季节性变化不存在这种差异。南极冰盖和格陵兰冰盖的消融速率分别为 -75.7 ± 12.3 Gt/a 和 -124.1 ± 2.9 Gt/a,对海平面的长期趋势贡献分别为 0.21 ± 0.03 mm/a 和 0.34 ± 0.01 mm/a,仅占全球海水质量增加速度 1.80 ± 0.10 mm/a 的 12% 和 19%,总计占 31%,因此,两极冰盖质量消融并不是 2003-2012 年间海水质量增加的最主要因素。

关键词:海平面变化;卫星测高;GRACE;Argo;Ishii
中图分类号:P228.41 **文献标志码:**A

总的海平面变化可由卫星测高技术直接观测得到,海水质量变化造成的海平面变化可由 GRACE 时变重力场数据反演得到,比容海平面可以利用海洋温盐数据计算得到,综合利用这三种相互独立的观测系统有助于我们进一步理解海平面变化。

Chen 等^[1]利用卫星测高和 WOA01 温盐模型研究了 1992-10~2004-08 间的全球海平面年际变化,并结合 GRACE 时变重力场模型和陆地水文和大气水含量模型进一步分析了海平面在 2002-04~2004-07 间的季节性变化特征;Willis 等^[2]利用 GRACE、Jason-1 和 Argo 浮标数据分析了 2003~2007 年间海平面季节和年际变化特征;Vinogradov 等^[3]利用卫星测高和 ECCO-GO-DAE 同化模型并结合热通量、淡水通量以及风应力数据研究了 1992~2004 年间的海平面季节变化特征,并对海平面季节性变化的机制进行了分析;García 等^[4]首次联合卫星测高、ECCO 海洋模式和 GRACE 资料,研究了地中海地区的海平面

周年变化;冯伟等^[5]联合卫星测高、Argo 温盐、GRACE 卫星重力和验潮站资料,分别在季节尺度和年际尺度探讨了 2005~2013 年全球海平面的变化。

本文联合卫星重力、卫星测高、Argo 和 Ishii 温盐资料对 2003~2012 年间全球海平面变化进行了分析,主要探讨 10 年间全球海平面变化、比容海平面变化和海水质量变化的长期趋势和季节性变化特征,并分析了南极冰盖和格陵兰冰盖消融对海平面变化的影响。

1 数据与方法

1.1 卫星测高数据

采用法国 AVISO 提供的最新版本的月均海平面高度异常数据计算 2003-01~2012-12 间的全球海平面变化。该数据融合 T/P、Jason-1/2、ERS-1/2、GFO、Envisat、Cryosat-2 等多颗卫星测高资料生成的空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,几乎覆

收稿日期:2015-04-21

项目来源:南北极环境综合考察与评估专项基金资助项目(CHINARE2015-02-02);测绘地理信息公益性行业科研专项基金资助项目(201412009)。

第一作者:张保军,博士生,主要从事卫星大地测量研究。E-mail:bjzhang@whu.edu.cn

通讯作者:王泽民,教授,博士。E-mail:zmwang@whu.edu.cn

盖全球(北半球最高覆盖到 81.375°N , 南半球最高覆盖到 78.625°S)的月均格网数据,并且已作了标准地球物理改正及大气改正,移去了海潮、地球固体潮和海洋极潮等的影响。为了与温盐和卫星重力数据的空间分辨率保持一致,我们先将海平面高异常数据插值成 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的格网数据,然后进行了 500 km 的高斯滤波,以保持 4 种数据空间上的一致性。

1.2 GRACE 卫星重力数据

本文使用 JPL 提供的 RL05 版本的 GRACE 时变重力场数据反演海水质量变化、南极冰盖和格陵兰岛冰盖质量变化。2003-01~2012-12 间共有 115 个月的正则化球谐系数数据(其中 2003-06、2011-01、2011-06、2012-05、2010-10 共 5 个月的数据缺失,为保证数据的客观性,本文对这 5 个月的缺失数据不进行插值处理),最高阶数为 100 阶,本文仅截取前 60 阶进行计算。使用 Cheng 等^[6]提供的 SLR 观测的 C20 项替换精度较低的 GRACE 数据的 C20 项;利用 Cheng 等^[7]提供的地心运动模型计算并加回一阶项系数以和卫星测高数据保持一致;采用 P3M6 去相关方法^[8-9]结合 500 km 的高斯滤波的组合滤波方案减弱和消除“条带”误差和高阶噪声误差的影响;采用 Wahr 等^[10]的方法进行泄露改正减少海陆边界陆地信号泄露的影响;在反演海水质量变化时,采用 GSM+GAD-GAA 模型,在海洋区域加回了大气海洋模型 GAD,并扣除了大气质量的月时变的影响(其中 GSM 为 GRACE 时变重力场球谐系数, GAA、GAD 为 GRACE 使用的海洋大气背景场模型 AOD1B 的月均模型)^[11],以保留需要的海洋信号;在反演南极和格陵兰冰盖质量变化时,使用不包含大气和海洋质量变化的 GSM 数据,最终计算出根据全球高分辨率海岸线数据库(Global Selfconsistent Hierarchical High-resolution Geography, GSHHG)^[12]提取的全球海洋和两极冰盖的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格网的质量变化等效水高时间序列。

1.3 海洋温盐数据

采用 Argo 温盐和 Ishii 温盐资料计算 2003-01~2012-12 月间全球海平面的比容变化^[13]。Argo 温盐数据使用 JAMSTEC 提供的月均格网数据^[14],空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,沿海水深度从 0~2 000 m 分为 25 层。Ishii 温盐资料是由 Ishii 提供的最新的 V6.13 版本海洋温盐实测数据集^[15],空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,沿海水深度从 0~1 500 m 分为 24 层的三维格网月均数据。对计

算出的海平面比容变化时间序列进行了 500 km 半径的高斯滤波,以保持 4 种数据空间上的一致性。

2 结果与讨论

2.1 海平面变化特征

对计算得到的格网时间序列进行面积加权平均,计算得到全球平均的海平面变化、比容海平面变化和海水质量变化时间序列,并对其进行 3 个月的平滑滤波,以消除高频信号的影响,然后进行谐波分析,提取其周年、半年变化的振幅和周期以及长期趋势(本文采用 $A\cos(\omega t + \varphi)$ 的形式表示周期性,其中 A 是振幅, $2\pi/\omega$ 是周期, φ 是相位)。

表 1 是由卫星测高、GRACE 和 Argo、Ishii 温盐数据计算得到的 2003~2012 年间全球海平面变化、比容海平面变化和海水质量变化的季节性变化的周期、振幅和长期趋势。在顾及冰川均衡调整(GIA)改正 0.3 mm/a ^[16]后的全球海平面长期趋势为 $2.72\pm 0.07\text{ mm/a}$;采用 1.7 mm/a GIA 改正^[17-18]后,得到质量变化对全球海平面长期趋势的贡献为 $1.80\pm 0.10\text{ mm/a}$,占海平面变化的 66%;由 Argo 数据得到的比容海平面变化趋势为 $0.93\pm 0.05\text{ mm/a}$,占海平面变化的 34%,Ishii 数据得到的比容海平面变化趋势为 $0.51\pm 0.03\text{ mm/a}$,占海平面变化的 19%。各变化趋势均与文汉江等^[19]、冯伟等^[5]的研究结果一致。比容海平面变化加上海水质量变化的贡献,与测高卫星观测到的海平面变化结果基本一致,但仍存在着一定差别,尤其是 Ishii 比容海平面与 GRACE 海水质量变化的和与测高海平面变化相差较大。原因可能有以下几种:① 3 种数据的观测时间和空间上的不一致,比如 GRACE 的月均数据采用的可能有相邻月份的观测数据,并不严格是每个月的平均值,卫星测高得到的月均海面高数据受卫星运行轨道和周期的限制,不能在同一时刻观测到覆盖全球的观测值,但是温盐数据则是同一时刻覆盖全球数据的月均值,所以这 3 类数据并不是空间上和时间上严格相同的月均值;② 温盐数据缺乏深海观测数据,Ishii 数据仅覆盖到 1 500 m,Argo 也只观测到 2 000 m,均无法反映深海的比容海平面变化;③ GIA 改正模型存在很大的不确定性,不同的 GIA 模型对 GRACE 海水质量变化的改正存在着很大的差别^[20]。

对全球平均的海平面、比容海平面和海水质

表 1 卫星测高、GRACE 和海洋温盐数据计算的全球海平面变化
Tab. 1 Global Mean Sea Level Variations from Altimetry, GRACE and Ocean Data

数据源	周年变化		半周年变化		长期趋势项 /(mm·a ⁻¹)
	幅度/mm	相位/d	幅度/mm	相位/d	
Altimetry	4.6±0.3	108±4	0.6±0.3	63±27	2.72±0.07
GRACE	7.3±0.4	79±3	1.5±0.4	148±15	1.80±0.10
Argo	4.1±0.2	248±3	1.0±0.2	79±12	0.93±0.05
Ishii	3.6±0.1	250±2	0.6±0.1	66±12	0.51±0.03

量变化时间序列移去长期趋势项和偏差后得到海平面、比容海平面和海水质量的季节性变化时间序列,见图 1。结合表 1 可以看出,年周期变化在季节变化中占主导地位,4 个序列的年周期振幅均是相应半周年变化振幅的 4~8 倍;GRACE 反演得到的海水质量变化的季节性变化振幅最大,振幅达到 7.3±0.4 mm;Argo 数据得到的比容海平面和 Ishii 数据得到的比容海平面具有很好的一致性,两者的相关系数达到 0.89,其年周期振幅小于质量变化的年周期振幅,分别为 4.1±0.2 mm 和 3.6±0.1 mm,相位相差 2 d,半周年变化相位相差 5 d;两比容海平面变化均与质量变化时间序列反相,相位相差 182 d 和 184 d,且具有很好的负相关,均达到-0.75;测高海平面变化序列与质量变化序列具有相关系数为 0.76 的正相关,但与比容海平面序列间的相关系数为-0.51 和-0.49,弱于质量变化和比容海平面间的负相关,并且质量变化的振幅远大于比容海平面变化的振幅,造成了测高海平面变化的振幅小于质量变化而大于比容海平面变化,为 4.6±0.3 mm。

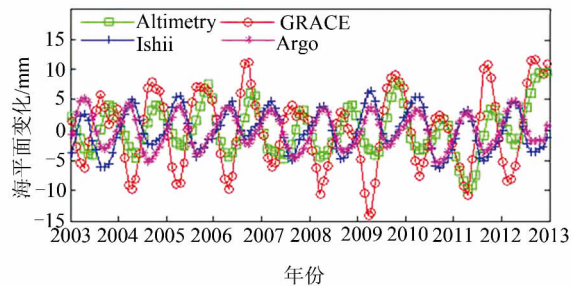


图 1 卫星测高、GRACE 和海洋温盐数据计算的全球海平面季节性变化
Fig. 1 Global Mean Sea Level Seasonal Variations from Altimetry, GRACE and Ocean Data

顾及到 Argo 数据的覆盖范围最小(各数据的覆盖范围见图 2),为消除数据观测空间不一致的影响,我们计算了 2003~2012 年间 Argo 覆盖范围内的海平面、比容海平面和海水质量的变化,其中海平面变化速率为 2.74±0.08 mm/a,年周期振幅为 3.9±0.3 mm;质量变化贡献为 1.76±0.14 mm/a,占海平面变化的 64%,年周期振幅为

7.5±0.6 mm;比容变化贡献为 0.93±0.05 mm/a (Argo),占海平面变化的 34%,年周期振幅为 4.3±0.2 mm 和 0.49±0.04 mm/a (Ishii),占海平面变化的 18%,年周期振幅为 4.1±0.2 mm;与上文使用全部数据的计算结果一致,说明利用卫星测高和 Argo 数据缺乏的高纬度观测数据对研究全球海平面变化的总体趋势和特征影响较小。

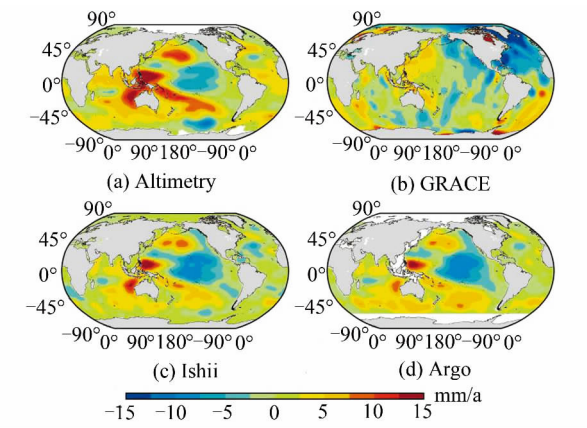


图 2 海平面变化趋势空间分布
Fig. 2 Spatial Distribution of Sea Level Change Trend

图 2 进一步给出了 2003~2012 年间全球海平面变化、比容海平面变化和海水质量变化的长期趋势的空间分布。从图 2 中可以看出,全球海平面变化虽然总体上呈上升趋势,但空间分布上存在着很显著的区域性特征,其中西北太平洋暖池海域、黑潮延伸体海域、澳大利亚西北部的印度洋海域和澳大利亚东部的太平洋海域海平面上升趋势显著,而东太平洋低纬度海域海平面呈显著下降趋势;无论是 Argo 数据还是 Ishii 数据,得到的比容海平面变化的趋势都与海平面变化趋势基本一致,但是其大部分趋势估值均小于海平面变化;西北太平洋、南大西洋海域海水质量增长速度显著,而东北太平洋、北冰洋、北大西洋特别是格陵兰岛附近海域海平面下降趋势明显。

2.2 极地冰盖对海平面变化的贡献

对由 GRACE 计算得到的南极冰盖和格陵兰冰盖的质量变化格网时间序列采用与 § 2.1 中全球海平面变化格网时间序列相同的处理,先通过面积加权平均计算出两冰盖的质量变化时间序

列, 然后进行 3 个月的平滑滤波, 消除高频信号的影响, 再通过谐波分析提取其周年、半年变化的振幅、周期及长期变化趋势。同时还采用 Paulson 模型改正了 GIA 的影响^[21], 并通过将南极冰盖和格陵兰冰盖质量变化的振幅和长期趋势分别乘以由 GSHHG 计算得到的南极冰盖和格陵兰冰盖的面积与全球海洋面积的比值, 计算出两冰盖消融对全球海平面变化的贡献。

图 3 给出了南极冰盖和格陵兰冰盖经过 GIA 改正后的 2002~2012 年间的质量变化趋势的空间分布。总体来看, 2002~2012 年间南极冰盖和格陵兰冰盖均呈加速消融趋势。格陵兰冰盖的整体呈消融趋势, 消融速率较大的区域主要位于冰盖的东南部 and 西北部, 最大消融速率高达 87.9 mm/a, 且整体消融速率明显大于南极冰盖的消融速率; 西南极的 Amundsen Gulf 和 Graham Land 地区是南极冰盖消融趋势最为显著的区域, 质量消融速率最高超过 70 mm/a, Rome 冰架及 Marie Byrd Land 质量也在减少, 但是东南极的 New Schwaben Land 和 Enderby Land 地区冰盖质量呈上升趋势, 最大上升趋势超过 20 mm/a, 在一定程度上弥补了西南极冰盖消融带来的质量损失。

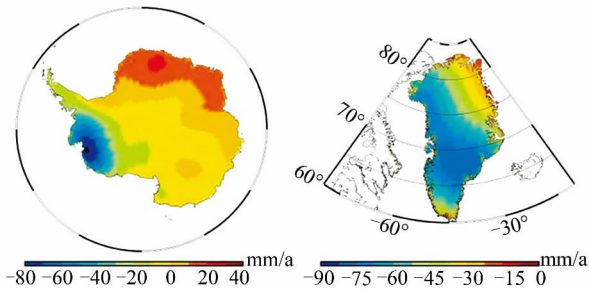


图 3 南极和格陵兰冰盖质量变化趋势分布
Fig. 3 Distribution of Antarctic and Greenland Mass Change Trend

表 2 是由 GRACE 计算得到的南极冰盖和格陵兰冰盖的质量变化, 表 3 是南极冰盖和格林兰冰盖质量变化对全球海平面变化的贡献。2003-

2012 年十年间, 南极冰盖和格陵兰冰盖分别以 $-75.7 \pm 12.3 \text{ Gt/a}$ 和 $-124.1 \pm 2.9 \text{ Gt/a}$ 的速度消融, 换成等效水高形式表示, 消融速度分别为 $-5.45 \pm 0.89 \text{ mm/a}$ 和 $-58.06 \pm 1.34 \text{ mm/a}$, 其中南极冰盖和格陵兰冰盖消融对全球海平面上升趋势的贡献分别为 $0.21 \pm 0.03 \text{ mm/a}$, $0.34 \pm 0.01 \text{ mm/a}$, 这与文献^[22-25]的研究结果一致。海水质量变化的速率为 $1.80 \pm 0.10 \text{ mm/a}$, 两极冰盖的消融对海水质量的变化贡献仅为 31%, 其中南极冰盖贡献为 12%, 格陵兰冰盖贡献为 19%, 并不是全球海水质量增加的主要来源。南极冰盖和格陵兰冰盖的消融同样具有季节性特征, 其中南极冰盖的年变化振幅达到 $53.0 \pm 3.5 \text{ mm}$, 格陵兰冰盖的年变化振幅为 $81.8 \pm 5.3 \text{ mm}$, 两者的年相位差为 155 d, 这与格林兰冰盖和南极冰盖的地理位置和气候特征相符。南极冰盖和格陵兰冰盖质量的年周期振幅换算成对全球海平面变化的幅度分别为 $2.03 \pm 0.13 \text{ mm}$ 和 $0.48 \pm 0.03 \text{ mm}$ 。对海水质量平均变化的时间序列和南极冰盖、格陵兰冰盖对海洋贡献的平均时间序列进行相关分析, 发现南极冰盖、格陵兰冰盖对海洋的贡献与海水质量变化间的相关系数分别是 -0.36 和 0.30 , 在相对海水质量变化分别延迟 8 个月和 2 个月后, 相关系数达到相应的最高值 0.64 和 0.41 。这与极地冰盖消融贡献仅占海平面质量变化的 31%, 且振幅变化也分别只有 $2.03 \pm 0.13 \text{ mm}$ 、 $0.48 \pm 0.03 \text{ mm}$, 以及 GRACE 海水质量变化分别和南极冰盖、格陵兰冰盖质量变化对海洋的贡献的相位相差 236 d、31 d 的结果基本一致。总之, 虽然极地冰盖的质量消融需要一个涉及到海-气-冰盖间的质量交换和海洋自身调制的复杂的质量再分配的过程, 不能即时全部转化成对全球海平面变化幅度的影响, 但通过分析仍然可以了解到极地冰盖消融对全球海平面季节性变化的影响。

表 2 GRACE 计算的南极冰盖和格陵兰冰盖质量变化

Tab. 2 Antarctica and Greenland Mass Variations from GRACE

冰盖	周年变化		半年变化		长期趋势项	
	幅度/mm	相位/d	幅度/mm	相位/d	水高/(mm·a ⁻¹)	质量/(Gt·a ⁻¹)
南极	53.0±3.5	135±4	8.1±3.5	56±25	-5.45±0.89	-75.7±12.3
格陵兰	81.8±5.3	290±4	4.2±5.3	102±73	-58.06±1.34	-124.1±2.9

表 3 南极冰盖和格林兰冰盖质量变化对全球海平面变化的贡献

Tab. 3 Contribution of Antarctic and Greenland Mass Variations to Global Mean Sea Level Variation

冰盖	周年变化		半年变化		长期趋势项/
	幅度/mm	相位/d	幅度/mm	相位/d	(mm·a ⁻¹)
南极	2.03±0.13	315±4	0.31±0.14	34±25	0.21±0.03
格陵兰	0.48±0.03	110±4	0.02±0.03	12±73	0.34±0.01

2.3 EOF 分析

对经过滑动平均、去除趋势项和拟合偏差的测高海平面、比容海平面和 GRACE 质量变化格网时间序列进行 EOF 分解。测高海平面、GRACE 质量变化、Argo 和 Ishii 比容海平面的第一模态方差解释率分别为 76%、62%、78% 和 79%，可以代表各格网时间序列的时空变化特征。图 4 和图 5 分别是 EOF 第一模态的时间系数和空间模态。从图 4 可以看出，4 个序列的 EOF 第一模态时间系数均具有显著的年周期特征，且它们的时间系数相位基本一致，仅 GRACE 比其他

3 个序列早一个月，在 9 月份达到峰值。

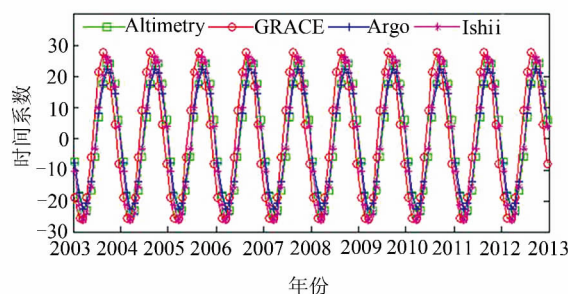


图 4 EOF 第一模态的时间系数

Fig. 4 Time Series of EOF Mode 1

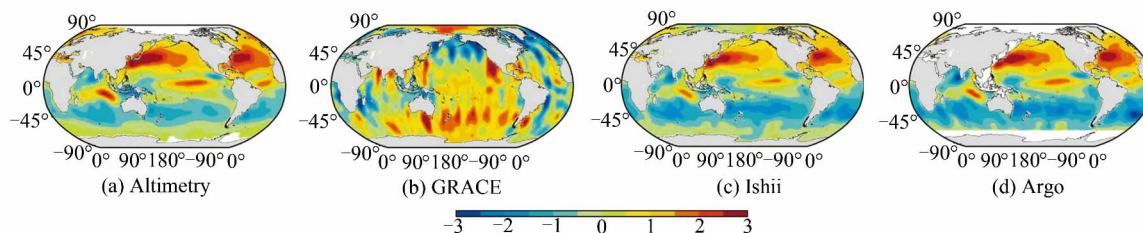


图 5 EOF 第一模态的空间模态

Fig. 5 Spatial Mode of EOF Mode 1

由图 5 可以看出，测高海平面变化和比容海平面变化的 EOF 第一模态的空间分布十分相似，均表现出显著的南北极差异，正的大值地区主要分布在北半球，负的大值地区主要分布在南半球，而且大值区域主要分布在季节性洋流海域。太平洋的黑潮及北太平洋暖流、赤道逆流，大西洋的墨西哥湾暖流、北大西洋暖流、赤道暖流以及几内亚暖流，印度洋的赤道逆流和季风洋流等暖流地区均是正的大值区域；而南大洋西风漂流、太平洋加利福尼亚寒流、秘鲁寒流、大西洋的本格拉寒流、印度洋的西澳寒流等寒流海域是负的大值区域。还可以看出，GRACE 质量变化的 EOF 第一模态的空间分布在南北半球不存在明显的差异，这主要是因为海洋能通过正压调整过程快速调整海水质量的变化，同时由于 GRACE 序列第一模态的时间系数在 9 月份达到峰值，而且其空间模态主要为正值，可以得出海水质量在 9 月份达到峰值。Chambers^[13]指出，顾及到海洋对海水质量变化正压调整的短暂过程，每年 10 月份海水质量变化在北半球和最大比容海平面的变化一起产生了更大的海平面变化，而在南半球，海水质量变化几乎和比容海平面变化呈反相分布，因此削弱了海平面变化的幅值。因此全球范围内测高海平面变化的 EOF 第一模态的值普遍大于比容海平面的 EOF 第一模态的值。

测高海平面变化、比容海平面变化和 GRACE 质量变化的 EOF 第一模态的空间分布与冯伟等^[5]关于海平面季节性变化的研究结论十分吻合，很好地反映出海平面变化、比容海平面变化和质量贡献的季节性变化特征。

3 结 语

本文利用 2003~2012 年间的卫星测高、GRACE、Argo 浮标和 Ishii 温盐数据分析了全球海平面变化、比容海平面变化和海水质量变化的长期趋势和季节性变化特征，探讨了南极冰盖和格陵兰冰盖对全球海平面变化的影响，并使用 EOF 方法进一步研究了全球海平面的季节性变化的时空变化特征。结果表明：2003~2012 年间，全球海平面变化呈上升趋势，但具有显著的空间分布特征，总体上升速率为 2.72 ± 0.07 mm/a，其中质量变化贡献为 1.80 ± 0.10 mm/a，占海平面变化的 66%，对应于 Argo 数据和 Ishii 数据，比容海平面变化贡献分别为 0.93 ± 0.05 mm/a， 0.51 ± 0.03 mm/a，占海平面变化的 34% (Argo) 和 19% (Ishii)；同时，全球海平面变化还具有显著的季节性变化特征，年周期变化振幅为 4.6 ± 0.3 mm，且南北半球存在着显著地季节性差异，年周期变化较为强烈的区域主要分布在季节性洋

流流域,比容海平面具有相似的季节性变化特征,但振幅较小,Argo 和 Ishii 数据得到的比容海平面年周期振幅分别为 4.1 ± 0.2 mm 和 3.6 ± 0.1 mm,海水质量变化的季节性变化的振幅最大,年周期振幅为 7.3 ± 0.4 mm,但南北半球不存在显著的季节性差异;期间,南极冰盖和格陵兰冰盖分别以 -75.7 ± 12.3 Gt/a 和 -124.1 ± 2.9 Gt/a 的速度消融,对海平面的长期变化趋势贡献分别为 0.21 ± 0.03 mm/a 和 0.34 ± 0.01 mm/a,对海平面振幅的变化的贡献分别为 2.03 ± 0.13 mm 和 0.48 ± 0.03 mm。

参 考 文 献

- [1] Chen J, Wilson C, Tapley B, et al. Seasonal Global Mean Sea Level Change from Satellite Altimeter, GRACE, and Geophysical Models[J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 79(9):532-539
- [2] Willis J K, Chambers D P, Nerem R S. Assessing the Globally Averaged Sea Level Budget on Seasonal to Interannual Time Scales [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, C06015
- [3] Vinogradov S V, Ponte R M, Heimbach P, et al. The Mean Seasonal Cycle in Sea Level Estimated from a Data-Constrained General Circulation Model [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, C03032
- [4] Garcia D, Chao B F, Rio J D, et al. On the Steric and Mass-Induced Contributions to the Annual Sea Level Variations in the Mediterranean Sea [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111; C09030
- [5] Feng Wei, Zhong Min, Xu Houze. Global Sea Level Changes Estimated from Satellite Altimetry, Satellite Gravimetry and Argo Data During 2005-2013 [J]. *Progressing 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 年全球海平面变化 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(2):471-477)
- [6] Cheng M K, Tapley B D, Ries J C. Deceleration in the Earth's Oblateness [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(2):740-747
- [7] Cheng M K, Ries J C, Tapley B D. Geocenter Variations from Analysis of SLR Data, in Reference Frames for Applications in Geosciences [J]. *International Association of Geodesy Symposia*, 2013, 138: 19-25
- [8] Swenson S, Wahr J. Post-Processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L08402
- [9] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. GRACE-Detects Coseismic and Postseismic from the Sumatra-Andaman Earthquake [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L13302
- [10] Wahr J, Molenaar M. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103 (B12): 30 205-30 229
- [11] Flechtner F, Dobslaw H, Fagiolini E. AOD1B Product Description Document for Product Release 05[R]. GFZ German Research Centre for Geosciences Department 1: Geodesy and Remote Sensing, Germany, 2014
- [12] Wessel P, Smith W H F. A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline Database [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 8 741-8 743
- [13] Chambers D. Observing Seasonal Steric Sea Level Variations with GRACE and Satellite Altimetry [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111(C3):C03010
- [14] Hosoda S, Ohira T, Nakamura T. A Monthly Mean Dataset of Global Oceanic Temperature and Salinity Derived from Argo Float Observations [J]. *Jamstec Rep Res Dev*, 2008, 8: 47-59
- [15] Ishii M, Kimoto M. Reevaluation of Historical Ocean Heat Content Variations with Time-Varying XBT and MBT Depth Bias Corrections [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(3):287-299
- [16] Douglas B, Peltier W. The Puzzle of Global Sea-Level Rise [J]. *Physics Today*, 2002, 55(3): 35-41
- [17] Jiang Min, Zhong Min, Zhang Zizhan, et al. Influence of GIA on Ocean Mass Variations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10):1 188-1 191(江敏, 钟敏, 张子占, 等. 冰川均衡调整对全球水质量变化的影响 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(10): 1 188-1 191)
- [18] Lombard A, Garcia D, Ramillien G, et al. Estimation of Steric Sea Level Variations from Combined GRACE and Jason-1 Data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254(12):194-202
- [19] Wen Hanjiang, Li Hongchao, Cai Yanhui, et al. The Study of Global Sea Level Change by Combining Argo Floats Data, Satellite Altimetry and GRACE Observations[J]. *Acta Geodeatica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5):696-702(文汉江, 李洪超, 蔡艳辉, 等. 联合 Argo 浮标、卫星测高和 GRACE 数据研究海平面变化[J]. *测绘学报*, 2012, 41(5):696-702)
- [20] Quinn K J, Ponte R M. Uncertainty in Ocean Mass Trends from GRACE [J]. *Geophys J Int*, 2010, 181:762-768

- [21] Paulson A, Zhong S, Wahr J. Inference of Mantle Viscosity from GRACE and Relative Sea Level Data [J]. *Geophys J Int*, 2007, 171: 497-508
- [22] Luo Zhicai, Li Qiong, Zhang Kun, et al. Trend of Mass Change in the Antarctic Ice Sheet Recovered from the GRACE Temporal Gravity Field[J]. *Sci China: Earth Sci*, 2012, 55: 76-82 (罗志才, 李琼, 张坤, 等. 利用 GRACE 时变重力场反演南极冰盖的质量变化趋势[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(10): 1590-1596)
- [23] Baur O. Greenland Mass Variation from Time-Vari-
- able Gravity in the Absence of GRACE [J]. *Geophys J Lett*, 2013, 40: 4289-4293
- [24] Groh A, Gruber C, Fagiolini E, et al. Ice-Mass Changes Inferred from Global and Regional GRACE Solutions[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, USA, 2014
- [25] Wouters B, Chambers D, Schrama E J O. GRACE Observes Small-Scale Mass Loss in Greenland[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(20): 295-296

Global Sea Level Variations Estimated from Satellite Altimetry, GRACE and Oceanographic Data

ZHANG Baojun¹ WANG Zemin¹

¹ Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper, global sea level variations and the influence on the sea level rise from Antarctic ice sheet and Greenland ice sheet ablation from 2003 to 2012 are estimated from satellite altimetry, GRACE and oceanographic data. From 2003 to 2012, global sea level rose with the rate at 2.72 ± 0.07 mm/a and spatial distribution characteristics estimated from altimetry. Ocean mass changes estimated from GRACE accounted for 66% of the sea level change, with the rate at 1.80 ± 0.10 mm/a, and steric sea level changes accounted for 34% of the sea level change with the rate at 0.93 ± 0.05 mm/a estimated from Argo and accounted for 19% of the sea level change with the rate at 0.51 ± 0.03 mm/a estimated from Ishii. Meanwhile, global sea level, steric sea level and oceanic mass variations had significant seasonal characteristics, with the annual cycle amplitude 4.6 ± 0.3 mm, 4.1 ± 0.2 mm, 3.6 ± 0.1 mm and 7.3 ± 0.4 mm, respectively, estimated from altimetry, Argo, Ishii and GRACE. Using empirical orthogonal function (EOF) analysis, we found significant seasonal differences existed between the northern and southern hemispheres in global sea level, steric sea level, but did not exist in oceanic mass changes. The rates of Antarctica ice sheet and Greenland ice sheet ablation were -75.7 ± 12.3 Gt/a and -124.1 ± 2.9 Gt/a from 2003 to 2012, respectively. And the correspondent global sea level rising rates were 0.21 ± 0.03 mm/a, 0.34 ± 0.01 mm/a, which can only accounted for 12% and 19%, total up to only 31% of the ocean mass increase. So the melting of the polar ice sheet was not the most important factor in the increase of ocean mass from 2003 to 2012.

Key words: global mean sea level variations; satellite altimetry; GRACE; Argo; Ishii

First author: ZHANG Baojun, PhD candidate, specializes in satellite geodesy. E-mail: bjzhang@whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Zemin, professor, PhD. E-mail: zmwang@whu.edu.cn

Foundation support: The Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Program, No. CHINARE2015-02-02; the Special Scientific Research and Public Service Fund of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 201412009.