

文章编号:1671-8860(2012)12-1421-04

文献标志码:A

# 利用多代卫星测高资料监测 1993~2011年全球海平面变化

李大炜<sup>1</sup> 李建成<sup>1,2</sup> 金涛勇<sup>1,2</sup> 胡敏章<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,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,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**联合多代测高卫星T/P、Jason-1/2海面高数据和验潮站数据,确定了各卫星高度计的长期低频漂移,建立了统一的卫星测高海面高观测值,研究了1993~2011年间全球平均海平面的变化。结果表明,近18 a全球平均海平面以 $3.12 \pm 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率上升,其中,海平面年际信号与ENSO事件表现出较强的相关性。

**关键词:**卫星测高;验潮站;全球海平面变化

中图法分类号:P228.3; P229.2

全球海平面变化是全球变化的重要特征之一,直接影响着全球天气及长期气候的演变<sup>[1]</sup>。卫星测高技术能够提供全球分布的、高质量的观测数据,为确定全球海平面变化提供必要的信息源。1992年8月,美国国家航空航天局和法国空间研究中心联合发射了T/P卫星,其覆盖了全球海洋大部分区域( $-66^{\circ}\text{S} \sim 66^{\circ}\text{N}$ ),对全球海平面变化提供了迄今为止最为精确的描述,其后续卫星Jason-1和Jason-2分别在2001年12月和2008年6月成功发射,这3颗卫星积累了近18 a的连续观测数据,是研究海平面变化精度最高且最完整的信息源。

本文联合多代测高卫星T/P、Jason-1/2数据计算了1993-01~2011-07期间全球平均海平面的变化,利用验潮站数据验证了卫星高度计的长期稳定性,研究分析了全球海平面变化的季节性特征、长期性趋势以及年际变化与厄尔尼诺、南方涛动(ENSO)事件的相关性。

## 1 数据处理

### 1.1 卫星测高数据处理

本文采用TOPEX第11~364周期‘C’版本MGDR数据(不包括期间Poseidon数据)、Jason-

1第1~259周期‘C’版本GDR数据、Jason-2第1~111周期‘T’版本GDR数据,3种数据的时间跨度为1993~2011年。

卫星至瞬时海面的测高观测值为<sup>[2]</sup>:

$$\rho(\varphi, \lambda) = h_{\text{alt}}(\varphi, \lambda) - h(\varphi, \lambda) \quad (1)$$

式中, $\varphi, \lambda$ 是纬度和经度; $h_{\text{alt}}$ 和 $h$ 分别是卫星和海面的大地高, $h_{\text{alt}}$ 由卫星星历给出; $\rho$ 是卫星质心至瞬时海面的距离,顾及了大气改正和常规地球物理改正。采用共线法内插出每个周期的沿轨海面高,选取平均海平面作为参考面,从而在对应地面点上形成海面异常变化时间序列。在每一个重复周期,全球海平面高度变化可以计算为<sup>[3]</sup>:

$$\Delta \text{sla}_i = \frac{\sum_{\lambda} \sum_{\varphi} \Delta h(\varphi, \lambda) w(\varphi)}{\sum_{\lambda} \sum_{\varphi} w(\varphi)} \quad (2)$$

$$w(\varphi) = \frac{\sin \beta(\varphi)}{\sin \beta(\varphi = 0)} \quad (3)$$

其中,

$$\beta(\varphi) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left| \frac{V_s \sin \alpha \pm V_e \cos \varphi}{V_s \cos \alpha} \right|$$
$$\sin \alpha = \left| \frac{\cos I}{\cos \varphi} \right|$$

式中, $i$ 是周期; $h(\varphi, \lambda)$ 是海面异常; $w(\varphi)$ 是纬度 $\varphi$ 处观测点的权; $I$ 是卫星轨道倾角; $V_s$ 是星下点沿轨运动的线速度,其值为 $5.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $V_e$ 是赤道

上任意一点的线速度,其值为  $0.46 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.2 验潮站数据处理

利用验潮站数据校准卫星测高数据是确定平均海平面的一个关键组成部分。本文选取 WOCE 的快速验潮站(见图 1)时观测数据来校检 T/P、Jason1/2 测高数据的长期稳定性,确定各卫星高度计的长期低频漂移。首先,以文献[4,5]的经验为参考,对验潮站数据进行相应的编辑和筛选。其次,对选取的验潮站数据进行预处理,具体步骤为:① 补插缺测值;② 利用 NCEP-NCAR 50 a 再分析资料进行逆气压改正;③ 采用二级滤波分别扣除主要全日、半日分潮,以及其他高频信号的影响;④ 选取以验潮站为中心,纬向土 $1^{\circ}$ 、经向

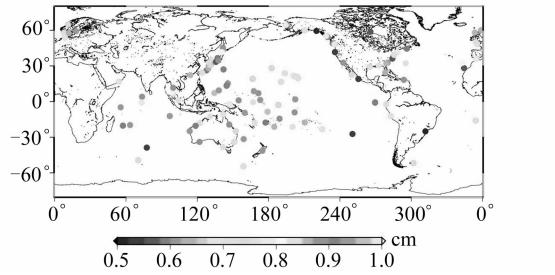


图 1 最终选取的验潮站及其与 TOPEX 测高数据的相关性

Fig. 1 Locations of Selected Tide Gauge and Correlation Between TOPEX and In-situ Time Series

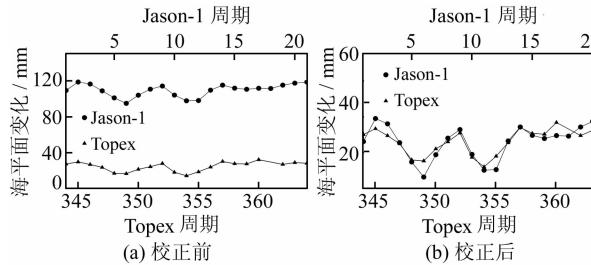


图 2 T/P 与 Jason-1 同步观测期间海平面变化

Fig. 2 Sea Level Anomaly of T/P and Jason-1 During Tandem Mission

## 2.2 高度计的低频漂移

测高卫星的设计寿命一般长达几 a,在这期间,随着时间环境的变化,高度计的仪器延迟可能出现变化<sup>[6]</sup>,本文利用前文处理得到的验潮站资料校准上述 T/P、Jason-1/2 卫星测高数据,建立差值时间序列。图 4 分别给出了重复周期平均后 T/P、Jason-1/2 卫星与验潮站的差值时间序列,其中,T/P 卫星在 1993~2002 年间的长期性趋势变化为  $0.58 \pm 0.15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,Jason-1 卫星在 2002~2008 年间的长期性趋势变化为  $0.36 \pm 0.22 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,Jason-2 卫星有明显的负向趋势,

土 $2^{\circ}$ 范围内的所有测高观测值,与验潮站数据建立差值时间序列,剔除两组数据相关系数小于 0.5 的验潮站。

## 2 数值结果与分析

### 2.1 海面高数据的统一

Jason-1/2 卫星发射初期,与前任卫星沿同一地面轨迹前后飞行,监测几乎相同的全球海平面变化,其中,2002-01~2002-08 T/P 和 Jason-1 维持相同轨道观测 210 d,2008-07~2009-01 Jason-1 与 Jason-2 维持 180 d。利用上述期间 T/P 第 344~364 周期和 Jason-1 第 1~21 周期数据,以及 Jason-1 第 240~259 周期与 Jason-2 第 1~20 周期数据,校正 Jason-1/2 卫星相对 T/P 卫星的系统偏差,建立基于 T/P 卫星的统一海平面变化时间序列。

图 2 和图 3 分别给出了同轨期间 T/P 与 Jason-1、Jason-1 与 Jason-2 的全球海平面变化。结果显示,经过统一的地球物理改正后,卫星之间仍然存在一定的系统偏差,逐周期计算后得到 T/P 与 Jason-1 的偏差为 85.3 mm,Jason-1 与 Jason-2 的偏差为 74.8 mm。消除系统偏差后,T/P 与 Jason-1 的偏差均方根(RMS)为 3.13 mm,Jason-1 与 Jason-2 的偏差 RMS 为 2.25 mm。

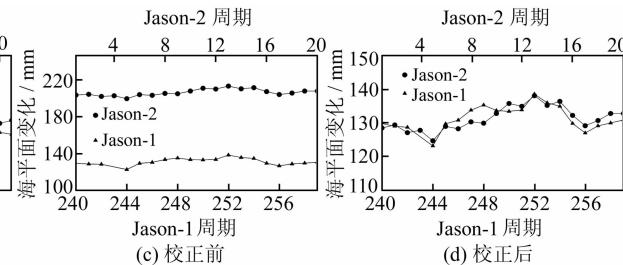


图 3 Jason-1 与 Jason-2 同步观测期间海平面变化

Fig. 3 Sea Level Anomaly of Jason-1 and Jason-2 During Tandem Mission

为  $-2.14 \pm 0.62 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,由于目前 Jason-2 卫星仅有 3 a 的数据,尚不能探测明显的海平面变化周年特征,在与验潮站的校准过程中可能会引入较大的误差。文献[4]认为研究卫星高度计的低频漂移时验潮站所处位置的陆地垂向运动不容忽视,其是影响高度计低频漂移的最大误差源,大约为  $0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。考虑到陆地垂向运动长期趋势的影响,T/P 与 Jason-1 监测的海平面变化与验潮站测得的同期海平面变化具有相当好的一致性。

### 2.3 全球平均海平面变化

根据卫星同轨观测期间的相互校正,以及验

潮站资料的验证,得到了以T/P卫星为基准的全球平均海平面变化。图5给出了1993-01~2011-07期间的全球平均海平面变化时间序列,采用 $\text{Acos}(\omega t - \theta)$ 谐波形式进行最小二乘拟合,计算出海平面季节性变化的振幅和相位(见表1)。扣除季节性信号,全球海平面以 $2.82 \pm 0.05 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率上升。考虑到在长时间尺度上冰期均衡调整(GIA)造成海洋盆地体积变化,导致全球平均海平面以 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率相对上升<sup>[7]</sup>,需要在海平面变化的长期性趋势中消除GIA的影响,最终得出近18 a全球海平面以 $3.12 \pm 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率上升。依照此速率,目前全球海平面相对1993年上升了56 mm,与政府间气候变化委员会第四次评估报告给出的结果基本一致。

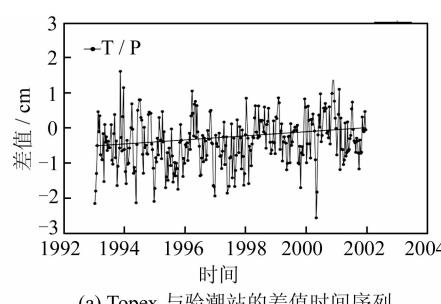
从图5中可以看到,2006年以后,全球平均海平面上升速率相对减缓,期间全球海平面变化为 $2.77 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而1993~2005年期间全球平均海平面的上升速度为 $3.54 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。文献[8]认为2003年以后热膨胀对海平面上升的贡献逐渐减小,海水质量的变化是海平面上升的主要原因,陆地冰川、极地冰盖的消融以及陆地水储量的变化在海平面上升中的贡献达到75%~80%。移除季节性变化和长期性趋势后,全球海平面变化表现出较强的年际变化特征。图6显示了全球

海平面年际变化与多变量ENSO指数(MEI)的比较结果。MEI考虑了热带太平洋上的海平面气压、地面纬向风、经向风、海温、海面气温和总云量6个因素的影响,能综合地监测ENSO事件。MEI为正值表征ENSO暖相位,异常偏高为El Niño, MEI越高El Niño越强烈;反之,为La Niña现象。结果表明,1997~2011年两者之间有较好的相关性,同步相关系数为0.66,相比La Niña现象,1993~2011年间海平面年际变化与El Niño有强相关性,相关系数达到0.76,其中1997~1998年发生了一个多世纪以来强度最大的一次El Niño现象,导致海平面上升15 mm;El Niño后期,海平面开始回落,在随后1999~2000年的La Niña期间,海平面持续下降直至转化为负异常。近年来,El Niño现象频繁发生,海平面变化尤为剧烈,在2010年,始于2009年的El Niño现象逐渐减弱,La Niña现象对全球变化的影响逐渐加强,全球海平面下降近了7 mm。

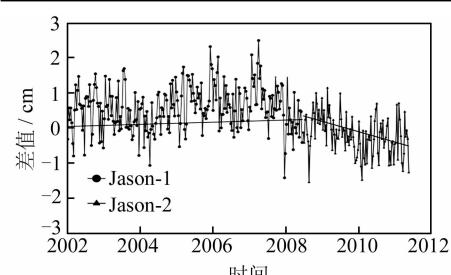
表1 全球平均海平面变化的季节性变化

Tab. 1 Seasonal Variations in Global Mean Sea Level

	周年振幅	周年相位	半周年振幅	半周年相位
本文	4.3	279	1.5	196
AVISO	6.4	299	1.7	236
CSIRO	5.3	288	1.6	231
GSFC	4.0	287	1.9	199
NOAA	5.7	299	1.6	226



(a) Topex与验潮站的差值时间序列



(b) Jason-1/2与验潮站的差值时间序列

图4 卫星高度计的差值时间序列

Fig. 4 Mean Sea Level Differences Between Altimeter and Tide Gauge Measurements

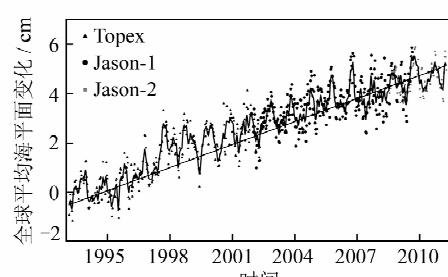


图5 1993~2011年全球平均海平面变化时间序列和线性趋势

Fig. 5 Global Mean Sea Level Time Series from 1993-01 to 2011-07 and Linear Trend

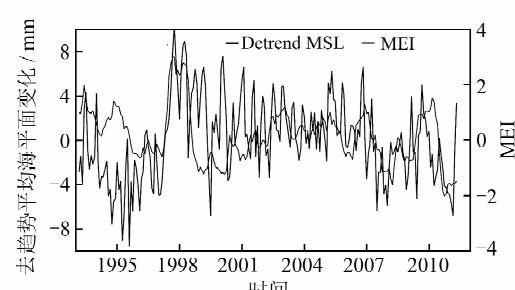


图6 去趋势全球平均海平面变化与MEI的比较

Fig. 6 Fig. 6 Comparison of Detrend Global Mean Sea Level Variation and MEI

### 3 结语

本文利用多代测高卫星 T/P、Jason-1 和 Jason-2 的海面高数据建立了统一的海平面变化时间序列, 研究了 1993-01~2011-07 期间全球平均海平面变化。通过全球分布的验潮站数据证明了卫星测高数据的长期稳定性, 在没有考虑陆地垂向运动的影响下, T/P 卫星高度计的低频漂移为  $0.58 \pm 0.15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , Jason-1 卫星高度计的低频漂移为  $0.36 \pm 0.22 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 目前现有的 Jason-2 测高数据尚不足以求得准确的低频漂移。经过 GIA 改正, 1993~2011 年全球平均海平面变化为  $3.12 \pm 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与其他学者采用多源测高数据所估计的全球平均海平面变化一致。

导致全球海平面变化的因素十分复杂, 随着卫星测高数据的积累以及重力卫星数据质量的提高, 联合多源数据研究陆地冰川的消融、极地冰盖质量平衡和陆地水储量的变化对全球海平面变化的影响, 以及海平面变化与全球气候变化的关系具有深远的意义。

### 参考文献

[1] 王正涛, 李建成, 晏定波, 等. 利用卫星测高数据研究海面高月异常变化与厄尔尼诺现象的相关性[J].

武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(8): 699-703

[2] 陈俊勇, 李建成, 晏定波. 用 T/P 测高数据确定中国海域及其邻海的海面高及海面地形[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(4): 321-326

[3] Nerem R S. Measuring Global Mean Sea Level Variations Using TOPEX/Poseidon Altimeter Data[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 25 135-25 151

[4] Mitchum G T. An Improved Calibration of Satellite Altimetric Heights Using Tide Gauge Sea Levels with Adjustments for Land Motion[J]. Marine Geodesy, 2000, 23: 145-166

[5] 金涛勇. 多源海洋观测数据确定全球海平面及其变化的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010

[6] 董晓军, 黄诚. 利用 TOPEX/Poseidon 卫星测高资料监测全球海平面变化[J]. 测绘学报, 2000, 29(3): 266-272

[7] Peltier W R. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-age Earth: the ICE-5G(VM2) Model and GRACE[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 2004, 32: 111-149

[8] Cazenave C, Lombard A, Llovel W. Present-Day Sea Level Rise: a Synthesis[J]. C R Geoscience, 2008, 340: 761-770

第一作者简介: 李大炜, 博士生, 从事卫星大地测量学研究。  
E-mail: lidawei123@gmail.com

## Monitoring Global Sea Level Change from 1993 to 2011 Using TOPEX and Jason Altimeter Missions

LI Dawei<sup>1</sup> LI Jiancheng<sup>1,2</sup> JIN Taoyong<sup>1,2</sup> HU Minzhang<sup>1</sup>

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

(2) Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Multi-satellite altimetry has provided a wealth of data for measuring the long-term sea level change, T/P, Jason-1 and Jason-2 construct a seamless record of global sea level change from 1993 to present. We present the results of our calibration activities, including data comparisons during the tandem period of the missions, during which we resolve the relative bias between the missions, as well as comparisons to independent tide gauge data. When the entire record is assembled, global mean sea level change from 1993-2011 is  $3.12 \pm 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , and interannual variation is strongly correlated to El Niño phenomenon.

**Key words:** satellite altimetry; tide gauge; global mean sea level