

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.014

# 基于多卫星融合数据的海平面特征分析

陈美香<sup>1,2</sup>, 王 蕾<sup>1</sup>, 左军成<sup>1</sup>, 张国胜<sup>1</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要** : 利用 1993—2008 年法国空间局的 AVISO 多卫星融合高度计资料, 采用随机动态、EOF 等方法分析全球海平面变化的长期趋势、变化幅度以及季节变化的空间分布特征。结果表明 (a) 1993—2008 年间太平洋海平面呈西升东降的形态, 印度洋绝大部分海区海平面呈上升趋势, 大西洋除湾流流域外的其他海区海平面的长期趋势以上升为主 (b) 全球海平面变化存在显著的年变化和半年变化等季节信号, 无论是半球平均还是洋盆平均, 北半球海平面季节变化的振幅明显大于南半球, 中纬度海区季节变化的振幅最大 (c) 北印度洋海平面季节变化的振幅高于同纬度带的北太平洋和北大西洋 (d) 太平洋、印度洋、大西洋三大洋受西边界流、赤道流系等强流影响的海域海平面变化幅度大于周围海域 (e) 赤道海域各大洋东、西边界和大洋内区海平面变化不同步, 可能受赤道海洋波动的影响较大 (f) 厄尔尼诺年, 西太平洋暖池和赤道太平洋中部海平面明显降低, 赤道东太平洋海域海平面明显升高, 赤道印度洋海域东、西边界的海平面变化与其相反。

**关键词** : 海平面变化 ; T/P 卫星高度计 ; 随机动态方法 ; 太平洋 ; 印度洋 ; 大西洋

**中图分类号** : P731.2      **文献标志码** : A      **文章编号** : 1000-1980(2012)03-0325-07

## Global sea level change characteristics based on multi-altimeter data

CHEN Mei-xiang<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZUO Jun-cheng<sup>1</sup>, ZHANG Guo-sheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou, 310012, China)

**Abstract** : Based on the AVISO multi-altimeter data obtained by the Centre National d'Études Spatiales of France during the period from 1993 to 2008, the spatial distributions of long-term change and seasonal change of the global sea level were studied using the stochastic dynamic and EOF methods. The results show the following : (a) From 1993 to 2008, the Pacific sea level rose in the west and dropped in the east ; the sea level of the Indian Ocean basically rose ; and the Atlantic Ocean had a sea level rise in most areas except the Gulf Stream. (b) The global sea level change was characterized by significant seasonal (annual and semi-annual) variation, which was more significant in the Northern Hemisphere than in the Southern Hemisphere. The most significant seasonal variation occurred in the mid-latitude area. (c) The seasonal sea level variation in the North Indian Ocean was more significant than in the North Pacific and North Atlantic in the same latitude band. (d) The sea level in the regions with strong flow, including the western boundary current and equatorial currents, showed larger variability than that in the surrounding area. (e) Affected by equatorial waves, the sea level change in the low-latitude area was not synchronous with that in the west and east. (f) During the El Niño year, the sea level dropped significantly in the western Pacific warm pool and the central equatorial Pacific, and rose significantly in the equatorial eastern Pacific, while the sea level in the equatorial Indian Ocean changed reversely.

**Key words** : sea level change ; T/P altimeter ; stochastic dynamic method ; Pacific Ocean ; Indian Ocean ; Atlantic Ocean

收稿日期 : 2011-04-18

基金项目 : 国家自然科学基金(40976006) ; 河海大学自然科学基金(2009427111) ; 中央高校基本科研业务费专项(2009B02614) ; 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金(SOED1109)

作者简介 : 陈美香(1981—), 女, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要从事气候与海平面变化研究。E-mail : chenmeixiang@hhu.edu.cn

海平面上升会对人类社会、经济和环境造成深远的影响.沿海城市是全球人口最稠密、经济最发达的地区,也是受海平面上升影响最大的地区.海平面上升不仅使海岸侵蚀加剧、盐水入侵增强、风暴潮灾害加剧,还会影响沿海地区海洋生态系统的正常运行,如红树林被淹没、珊瑚礁白化等<sup>[1]</sup>.

目前,海平面上升造成的危害已经引起国内外科学家和各国政府的高度关注.政府间气候变化专业委员会(IPCC)于1995年、1999年、2001年和2007年先后发布了4个全球变化评估报告,分析、预测全球温室气体变化、气温变化和海平面变化.海平面变化是全球变化的国际地圈-生物圈计划(ICBP)中近岸海陆相互作用(LOICZ)课题的4个核心问题之一.我国政府也非常重视海平面变化问题,多年来每年都发布中国海平面公报.国家自然科学基金委员会在全球变化和区域响应重大专项中已将海平面变化研究作为一个专门的方向.

国内外学者先后利用全球长期验潮数据和T/P卫星高度计资料分析全球海平面变化,得到大量珍贵的研究成果<sup>[2-11]</sup>,其中海平面变化规律、海平面变化趋势预测对人类社会的发展有重要的现实意义.笔者主要利用随机动态分析方法,分析1993年1月至2008年12月全球不同区域海平面变化的特征,为进一步深入探讨区域海平面变化机制做准备.

1 资料来源及数据处理

采用法国空间局(CNES)的卫星海洋学存档数据中心(AVISO)多卫星(Jason-1&2,T/P,Envisat,GFO,ERS-1&2和Geosat)融合高度计资料,选用1993年1月至2008年12月的周平均海表面高度异常数据,资料的空间覆盖范围为0~360°,82°S~81°N,数据已处理成1/3°墨卡托网格形式.

对原始数据进行缺测值和奇异值订正后将原先周次的海表面高度异常数据进行时间平均,得到海表面高度异常的月均场.采用截断半径为200 km的hamming滤波器对月均海表面高度进行空间滤波后插值得到1°×1°的网格数据.

2 海平面变化特征

2.1 全球平均海平面变化特征

从1993—2008年全球月均海表面高度异常资料(图1)可以看出,全球平均海平面季节变化特征相当显著.利用随机动态方法<sup>[10]</sup>分析发现,季节变化信号以年周期为主,每年10月和4月分别出现海平面的最高值和最低值,年振幅约为0.98 cm.对同时段的全球海表面高度场进行正交函数分解,得到其前4个主要模态在海平面变化方差中占的比例分别为19.23%,11.95%,9.87%,5.68%.其中第1、第3模态是海平面的季节变化模态,从方差比重看季节变化对全球海平面变化的贡献约占了30%.南、北半球各纬度带海平面的季节变化不同步.从长时间尺度看,这种季节变化是叠加在显著的年际变化及持续上升趋势之上的.利用随机动态方法<sup>[10]</sup>得到1993—2008年全球平均海平面上升的线性速率为2.9 mm/a,该结果与1993—2003年全球平均海平面上升速率3.1 mm/a<sup>[12]</sup>相比略有减小,可能是受2003年以后全球海平面上升速率减慢的影响<sup>[13]</sup>,也说明时间段的选取对长期趋势的计算有重要影响.

2.2 太平洋、印度洋、大西洋海平面变化长期趋势的空间分布

利用随机动态方法<sup>[10]</sup>对全球1°×1°网格点的海平面时间序列进行线性拟合,得到全球各大洋海平面长期趋势的空间分布(图2).整体来看,1993—2008年间各大洋海平面以上升为主,上升区域远远大于下降区域.分区域来看,各大洋海平面长期趋势的空间形态

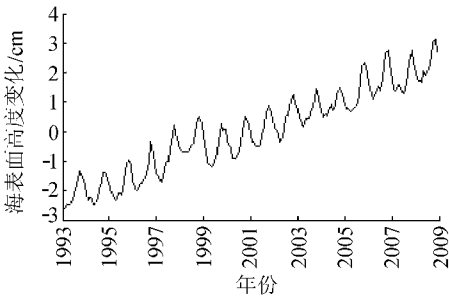


图1 1993—2008年全球月均海表面高度异常  
Fig. 1 Global monthly mean sea surface height anomaly during period from 1993 to 2008

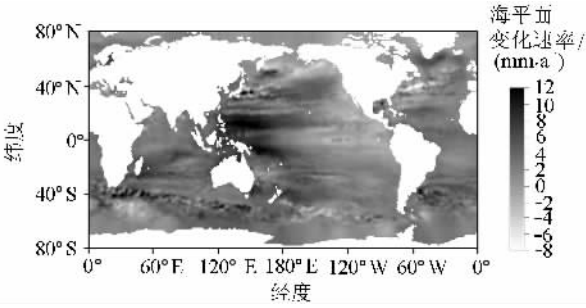


图2 1993—2008年全球海平面变化趋势  
Fig. 2 Global sea level trend from 1993 to 2008

呈现较大差异.

太平洋海平面呈西升东降的形态,上升区域的面积和上升强度均远远超过下降区域.上升区域自北向南存在 3 个条带的极值区域,第 1 条带位于日本以东黑潮延伸体及以东的广阔北太平洋中纬度海域,最大上升速率出现在黑潮延伸体,核心值达到 16.7 mm/a.第 2 条带位于西太平洋暖池延伸到夏威夷群岛的大片海域,该极值区不仅面积大,而且海平面上升速率快,核心值达到 13.8 mm/a.第 3 条带位于新西兰附近的西南太平洋中纬度海区,核心值达到 12.2 mm/a.东太平洋主要海域海平面呈下降趋势,其下降速率核心值为 6.4 mm/a.

印度洋绝大部分海区海平面呈上升趋势,只是西北部阿拉伯海海平面上升速率稍小,赤道及南半球海域海平面上升速率较大.但在非洲东南侧的南极海域存在一个海平面下降的极值中心.

大西洋海平面长期趋势以上升为主,湾流流域存在显著的海平面下降区,极值出现在美国东北部,核心值可达 -10.3 mm/a.

2.3 海平面变化的多年平均幅度

图 3 给出了利用 1993—2008 年海表面高度异常数据计算得出的海平面变化多年平均幅度的全球空间分布.可以看出,整个赤道海区海平面变化比中高纬度海区剧烈,但海平面变化多年平均幅度的极值区主要分布在黑潮延伸体、湾流、阿根廷东侧的西南大西洋以及非洲好望角南侧的南极绕极流区,赤道海域海平面变化最剧烈的区域位于澳大利亚和新几内亚之间的小块海域.红海、波罗的海等地中海海域的海平面变化幅度比周围海域大,该结果是否与资料可信度有关有待进一步确认.全球海平面变化最剧烈的区域出现在黑潮延伸体海区,其核心值为 29.04 cm;其次是阿根廷东侧海域,其核心值为 21.74 cm.

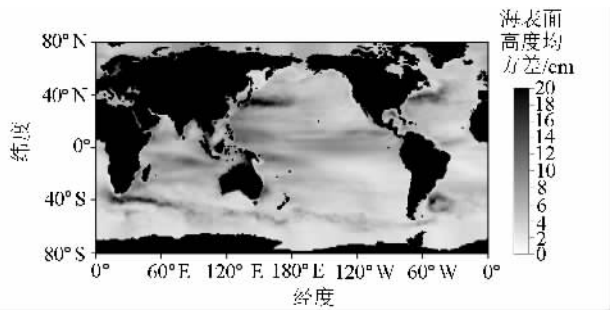


图 3 1993—2008 年海表面高度均方差

Fig. 3 STD of monthly mean sea surface height from 1993 to 2008

2.4 海平面季节变化的显著周期及振幅的空间分布

谱分析和经验正交模态分析结果均显示,无论是全球平均海平面还是单个水点的海平面,其变化信号中都包含显著的季节周期.随机动态分析得到全球平均海平面变化最显著的季节信号为年周期信号,其次是半年周期信号.笔者主要从年和半年的显著性周期及其振幅的空间分布 2 个方面分析全球海平面的季节变化特征.

图 4(a)中灰色区域即海平面变化显著性周期为 12 个月的海域.从整体上看,全球大部分海域海平面变化都存在 12 个月的显著性周期,该变化周期主要与太阳辐射有关.南大洋靠近非洲、澳洲、南美洲的大片海域,以及太平洋中、低纬度小范围海域的海平面变化中 12 个月的周期不显著.全球海平面变化半年周期的空间分布不如年周期分布广泛(图 4(b)中灰色区域).太平洋高纬度(35°N~60°N)和低纬度(15°N~15°S)海区、大西洋低纬度(30°N~30°S)海区、印度洋北部(20°N~30°S)海域的海平面存在半年的显性周期.值得一提的是,存在半年显著性周期的海域大多年周期都很显著.

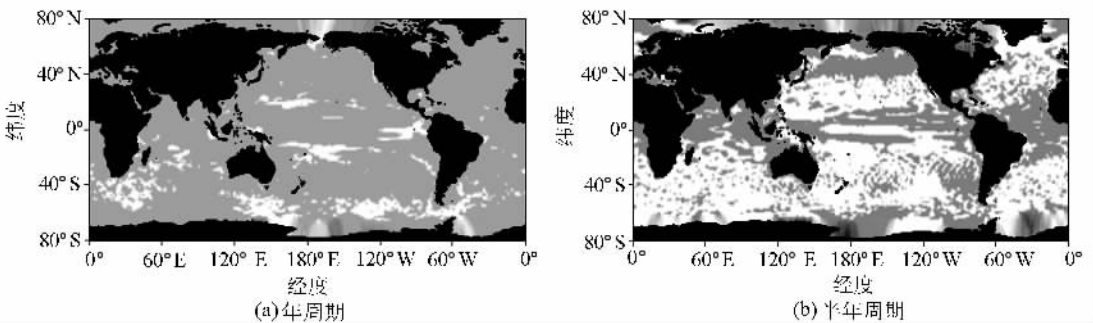


图 4 1993—2008 年海平面季节变化显著性周期的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of prominent period of seasonal sea level change from 1993 to 2008

尽管全球绝大部分海域的海平面都存在显著的年变化周期,但是振幅却存在很大的空间差异

(图 5(a)). 整体来讲, 北半球海平面年变化振幅明显大于南半球. 北半球低纬度海域海平面年变化振幅的高值集中在  $0^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ : 太平洋呈带状分布, 东侧海平面年变化振幅较大, 最大值为  $13\text{ cm}$ ; 北印度洋的阿拉伯海海平面年变化振幅较大, 最大值约为  $14\text{ cm}$ . 中纬度海域海平面年变化振幅的高值区分布在黑潮延伸体及湾流附近, 最大振幅分别为  $20\text{ cm}$  和  $15\text{ cm}$ . 南半球海平面年变化振幅的高值区位于  $0^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{S}$  的印度洋东侧, 振幅最大值约为  $16\text{ cm}$ ; 巴西东部的大西洋赤道海域海平面年变化振幅也很大, 约为  $11\text{ cm}$ ; 阿根廷东南沿海海域有较大的海平面年变化振幅. 靠近南极的海区海平面年变化振幅除印度洋稍大外, 其他各大洋均很小.

与海平面年变化振幅情况不同, 海平面变化半年振幅的高值区位于低纬度海区(图 5(b)): 半年振幅的较大值位于印度洋, 为  $5 \sim 6\text{ cm}$ , 可能与该海域受季风影响有很大关系. 其次在巴西东部的大西洋赤道海域也有较小范围的大值区, 最大振幅在  $5\text{ cm}$  左右. 赤道太平洋中部的海平面变化半年振幅较大, 最大值约为  $4\text{ cm}$ . 另外在黑潮及其延伸体北侧、北大西洋的湾流附近以及阿根廷东南沿海都有小范围的海平面变化半年振幅较大值区. 整体来看, 全球海平面变化年振幅的量值及极值区范围均大于半年振幅的量值及极值区范围.

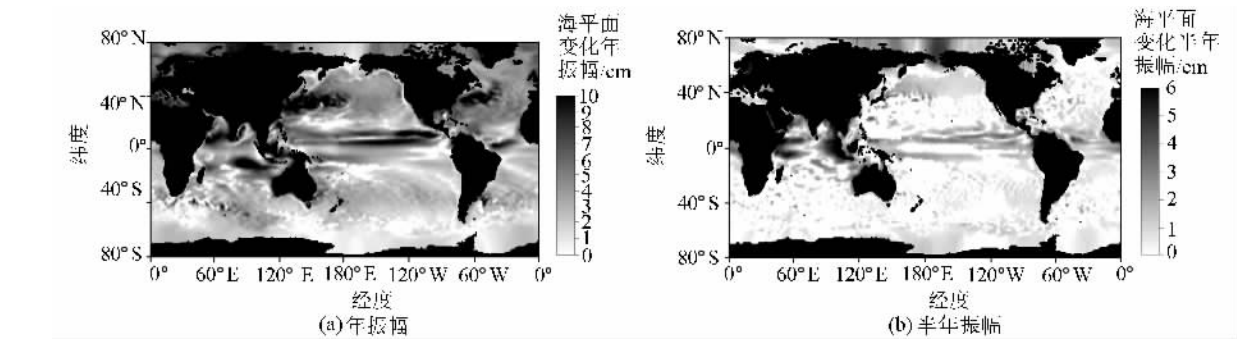


图5 1993—2008年海平面季节变化显著性周期的振幅分布  
Fig. 5 Amplitude distribution of prominent period of seasonal sea level change from 1993 to 2008

### 3 太平洋、印度洋、大西洋海平面变化特征

#### 3.1 三大洋整体纬度带平均海平面季节变化

太阳辐射是各大洋主要的热量来源, 由于太阳辐射随纬度变化, 导致海水比容以及海平面也存在随纬度而变化的特征. 因此, 笔者从赤道起把南北半球分别每隔  $10^{\circ}$  做纬度带的平均, 分析海平面在各个纬度带的变化情况. 在计算区域平均海平面变化时, 采用面积权函数(权重系数为数据所在格点纬度的余弦)体现不同位置水点对区域平均海平面变化的贡献.

纬带平均海平面变化存在明显的季节性特征(图 6). 南、北半球  $20^{\circ}$  以上的中高纬度海域海平面的季节变化以年周期为主, 振幅较大. 纬度  $20^{\circ}$  以下的赤道海域海平面季节变化中同时包含年信号和半年信号. 南北半球相同纬度带比较而言, 北半球的海平面变化幅度大于南半球. 北半球  $30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$  纬度带是北半球也是全球纬度带平均海平面季节变化最强的区域, 年平均振幅可达到  $6.6\text{ cm}$ ; 南半球  $30^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$  纬度带是南半球海平面季节变化最强的纬度带, 年变化振幅为  $3.1\text{ cm}$ .

#### 3.2 三大洋各自纬度带平均海平面季节变化

太平洋、大西洋、印度洋的海平面变化均存在明显的季节信号(图 7). 整体而言, 北太平洋和北大西洋的纬度带平均海平面变化在大部分纬度带上的时间序列都很接近. 北太平洋和北大西洋的海平面季节变化振幅明显大于南太平洋和南大西洋, 而且两者的位相相反.

北印度洋海平面季节变化的振幅高于同纬度带的太平洋和大西洋. 太平洋和大西洋最强的海平面季节变化发生在北半球中纬度  $30^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$  海域, 年振幅分别为  $6.7\text{ cm}$  和  $6.5\text{ cm}$ . 南半球三大洋最强的海平面季节变化信号也出现在  $30^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$  海域, 年振幅在  $3\text{ cm}$  左右.

#### 3.3 区域平均海平面变化

在太平洋  $60^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$  每  $10^{\circ}$  宽纬度带上的东、西边界和太平洋内区分别取  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  的区域(中心位置见图 8), 分析同一纬度带不同区域海平面变化的差异. 大西洋由于东西向较狭窄, 因此只选择东、西边界的区域进行分析. 印度洋南北跨度小, 选取的纬度带范围则为  $60^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$ .

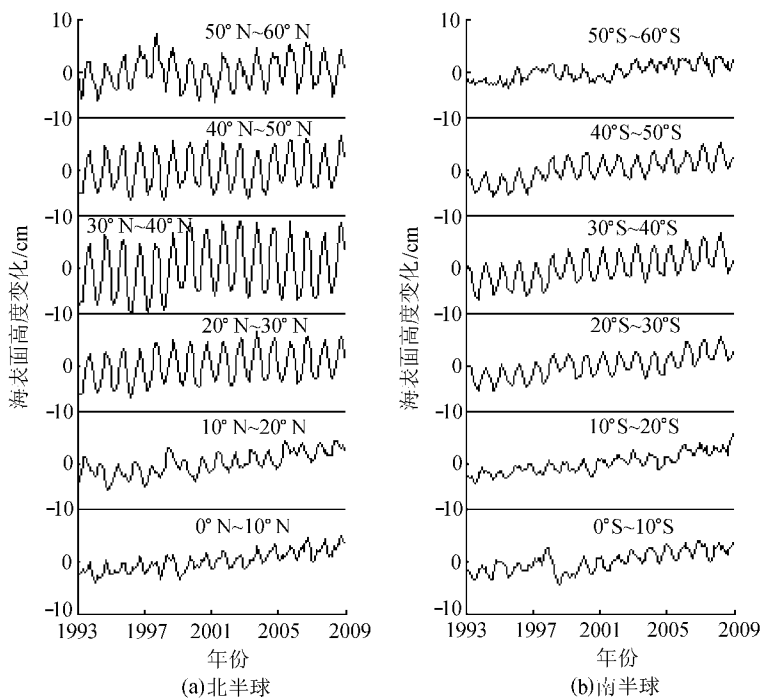


图 6 1993—2008 年全球每 10° 宽纬度带上月均海表面高度异常

Fig. 6 Global monthly mean sea surface height anomaly in latitude band of 10° from 1993 to 2008

在太平洋,赤道南北纬 10° 之间的热带海域和 30°N ~ 40°N 的北太平洋中纬度海域所选水点的海平面变化幅度大于周围海域,这些位置正是赤道流系、黑潮延伸体等强流流经之处.其他站位的海平面变化幅度均较小.在所有的站位中,北太平洋 30°N ~ 40°N 区域内站位的海平面变化振幅最大;受黑潮延伸体强流的影响,该纬度带西边界海域海平面变化比东边界和太平洋内区的变化剧烈;3 个位置的海平面变化基本没有位相差.南北纬 10° 之间的热带海域东、西边界和大洋内区海平面变化不同步,可能受赤道海洋波动的影响较大.在厄尔尼诺年,西太平洋暖池和赤道太平洋中部海平面明显降低,而赤道东太平洋海域海平面明显升高.南太平洋南极绕极流以北中低纬度海域西边界海平面变化的振幅明显大于东边界和大洋内区,在一定程度上显示了海流的西向强化对海平面变化的影响(图 9).

大西洋相同纬度带的东、西两侧海平面变化特征与太平洋类似,其西侧海平面变化幅度均大于东侧,海平面变化幅度最大的区域都位于 30°N ~ 40°N 纬度带内,该纬度带内站位的海平面变化振幅居整个洋盆之首,受强西边界流湾流的影响,其流域西边界海平面变化幅度远远大于东边界.低纬度海域大西洋东、西边界海平面变化的差异主要是位相不同步.

印度洋海平面变化的振幅由低纬度到高纬度逐渐递减,0°N ~ 10°N 区域内站位的海平面变化振幅最大;受季风影响,该纬度带西侧海域的海平面变化比东侧剧烈.与太平洋、大西洋类似,赤道印度洋海区东、西边界的海平面变化也存在不同步现象.厄尔尼诺年,赤道印度洋西边界和大洋内区的海平面明显升高,东边界海平面降低.

## 4 结 论

a. 全球海平面季节变化特征显著,这种季节变化叠加在一个持续上升趋势之上,1993—2008 年全球海平面上升的线性速率为 2.9 mm/a.

b. 海平面变化趋势的空间分布具有很强的区域性特征.太平洋海平面呈西升东降的形态,印度洋绝大部分海区海平面呈上升趋势,大西洋除湾流外海平面长期趋势以上升为主.黑潮延伸体、湾流、非洲好望角南侧的南极绕极流海域、阿根廷东侧的西南大西洋等海域的海平面变化比较剧烈.

c. 全球绝大部分海域的海平面变化存在显著的年周期性,存在显著半年周期性海平面变化的海域主要位于赤道及高纬度海域,北半球海域海平面年振幅明显大于南半球,极值区分布在黑潮延伸体、湾流、阿拉伯海、阿根廷以东等海域,海平面变化半年振幅的最大值出现在赤道印度洋海域.

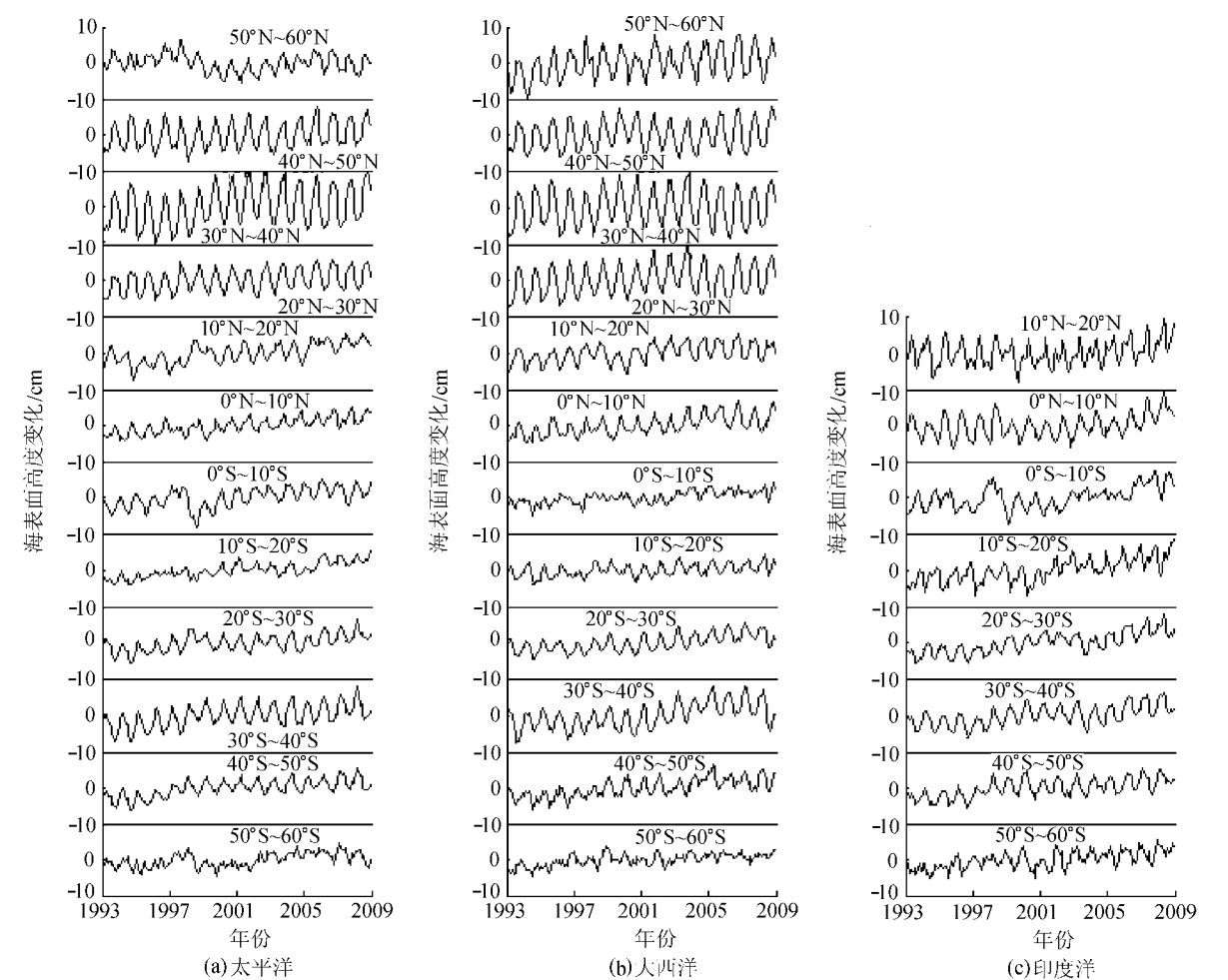


图7 1993—2008年三大洋每10°宽纬度带上月均海表面高度异常

Fig. 7 Monthly mean sea surface height anomaly in latitude band of 10° for Pacific Ocean , Atlantic Ocean and Indian Ocean from 1993 to 2008

d. 南、北半球中纬度海域的海平面变化年振幅较大，相同纬度带北半球海平面变化振幅大于南半球。

e. 太平洋、印度洋、大西洋三大洋受西边界强流、赤道流系影响的海域海平面变化振幅较大；三大洋热带海域东、西边界和大洋内区海平面变化不同步，可能受赤道海洋波动的影响较大，厄尔尼诺年，西太平洋暖池和赤道太平洋中部海平面明显降低，赤道东太平洋海域海平面明显升高，赤道印度洋海域东、西边界的海平面变化与其相反。

5 结 语

- a. 由于 T/P 卫星高度计资料的时间序列短而且在近岸浅海区域精度差，因此有待于收集同时段验潮站资料验证上述结论并做进一步研究。
- b. 全球大部分海域海平面存在显著的年变化及半年变化，而对全球各海区海平面季节性极值出现时间的问题有待于进一步研究。
- c. 笔者从全球及区域平均的角度分析了海平面的变化特征，并对其变化原因进行了初步解释。关于海平面变化机制的研究，将是下一步需要做的工作。

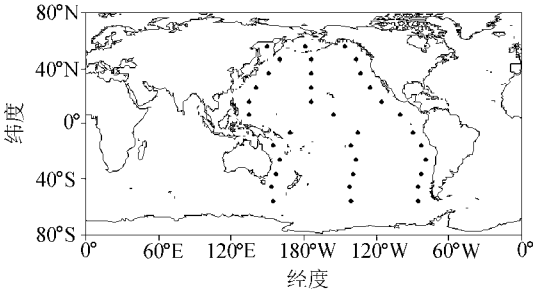


图8 太平洋每10°宽纬度带上所选区域的中心位置

Fig. 8 Center of selected areas in latitude band of 10° in Pacific Ocean

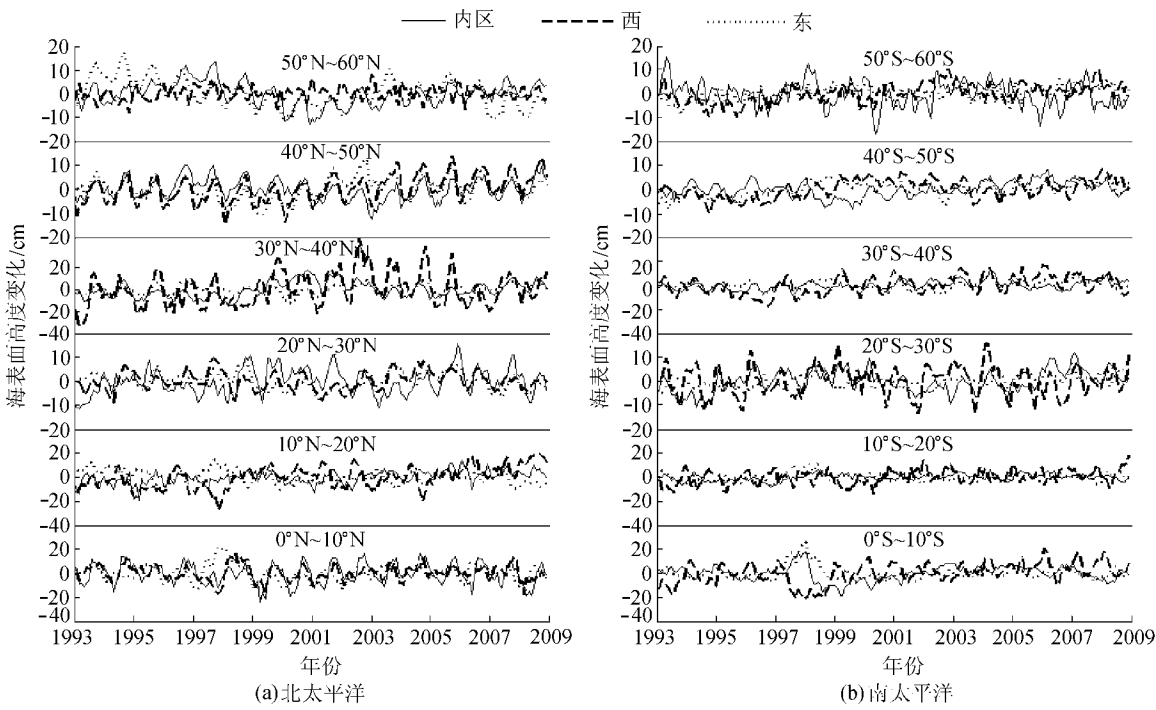


图 9 1993—2008 年太平洋每 10°宽纬带上东、西边界和太平洋内区所选区域的月均海表面高度异常

Fig. 9 Monthly mean sea surface height anomaly in latitude band of 10° at western and eastern boundaries and interior of Pacific Ocean from 1993 to 2008

致谢 :感谢法国空间局 (CNES) 卫星海洋学存档数据中心 (AVISO) 为本文提供数据支持.

参考文献 :

[ 1 ] CHEN J L , WILSON C R , TAPLEY B D , et al. Contributions of hydrological processes to sea level change[ J ]. Physics and Chemistry of the Earth 2002 27 :1439-1443.

[ 2 ] CHURCH J A , WHITE N J , COLEMAN R , et al. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950—2000 period [ J ]. J Climate , 2004 ,17 2609-2625.

[ 3 ] DOUGLAS B C. Global sea rise : a redetermination[ J ]. Surveys in Geophysics , 1997 ,18 279-292.

[ 4 ] LEULIETTE E , NEREM R S , MITCHUM G T. Calibration of Topex/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change[ J ]. Mar Geod 2004 27 :79-94.

[ 5 ] NEREM R S. Measuring global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data[ J ]. J Geophy Res ,1995 ,100( 12 ) : 25135-25151.

[ 6 ] 黄立人 , 马青. 近几十年来的全球海平面变化[ J ]. 海洋学报 ,1993 ,15( 6 ) :76-82.( HUANG Li-ren , MA Qing. The global sea level changes in recent decades[ J ]. Acta Oceanologica Sinica ,1993 ,15( 6 ) :76-82. ( in Chinese ))

[ 7 ] 容增瑞 , 刘玉光 , 陈满春 , 等. 全球和南海海平面变化及其与厄尔尼诺的关系[ J ]. 海洋通报 2008 27( 1 ) :1-8.( RONG Zeng-rui , LIU Yu-guang , CHENG Man-chun , et al. Mean sea level change in the global ocean and the South China Sea and its response to ENSO[ J ]. Marine Science Bulletin 2008 27( 1 ) :1-8. ( in Chinese ))

[ 8 ] 申辉 , 郭佩芳 , 钱成春 , 等. 1993—2001 年全球海平面高度变化特征[ J ]. 海洋与湖泊 2002 33( 3 ) :225-232.( SHEN Hui , GUO Pei-fang , QIAN Cheng-chun , et al. Sea surface level variations during 1993—2001[ J ]. Oceanologia Et Limnologia Sinica 2002 33( 3 ) : 225-232. ( in Chinese ))

[ 9 ] 张建立. 全球海平面变化规律及比容贡献[ D ]. 青岛 : 中国海洋大学 2006.

[ 10 ] 左军成 , 陈宗镛 , 周天华. 中国沿海海平面变化的一种本征分析与随机动态的联合模型[ J ]. 海洋学报 ,1996 ,18( 2 ) :7-14. ( ZUO Jun-cheng , CHEN Zong-yong , ZHOU Tian-hua. An eigen analysis and stochastic dynamic joint model of China 's coastal sea-level change[ J ]. Acta Oceanologica Sinica ,1996 ,18( 2 ) :7-14. ( in Chinese ))

[ 11 ] 颜梅. 全球海平面变化的热力学机制研究[ D ]. 青岛 : 中国海洋大学 2008.

[ 12 ] SOLOMON S , QIN D , MANNING M , et al. Climate change 2007 : the physical science basis[ M ]. Cambridge : Cambridge University Press 2007.

[ 13 ] CAZENAVE A , DOMINH K , GUINEHUT S , et al. Sea level budget over 2003—2008 : a reevaluation from GRACE space gravimetry , satellite altimetry and Arg[ J ]. Global and Planetary Change 2009 65 83-88.