

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.020

全球海水热含量变化规律及其对海平面变化的影响

谭伟, 左军成, 李娟, 杨逸秋, 陈美香

(河海大学物理海洋研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用 Ishii 温盐资料及 T/P 高度计资料, 分析上层 700 m 全球及区域海水热含量变化特征, 并探讨海平面变化与上层海水热含量的关系. 研究表明, 1945—2006 年全球大部分海域上层 700 m 海水热含量均处于上升趋势, 全球平均上升速率为 $2.1 \times 10^7 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 并表现出显著的年际和年代际变化, 尤其在湾流附近海域上升明显, 最大可达 $6.5 \times 10^7 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 但在黑潮延伸体海域、太平洋 40°S 附近的带状海域、西太暖池以及赤道印度洋附近海域, 海水热含量呈下降趋势, 最大下降速率可达 $6.0 \times 10^7 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 1993—2006 年, 海水热含量和海平面在南(15°S ~ 64°S)北(15°N ~ 64°N)半球均存在显著的季节变化, 且位相相反, 热带海域季节变化不明显, 表现出显著的半年周期信号. 在南半球低纬和高纬海域, 海水热含量和海平面的季节变化较弱, 热含量对海平面变化的影响较小. 北半球海水热含量和海平面的年际和年代际变化较一致, 而在南半球, 尤其是低纬海域, 海平面变化滞后海水热含量变化, 甚至有相反的变化规律.

关键词: 海水热含量; T/P 海平面; 上升趋势

中图分类号: P732

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)05-0589-06

在长期影响气候变化的诸多因素中, 最重要也是最难以直接测量的是海水热含量的变化, 而海水热含量比海表温度具有更大的稳定性. 海洋中大部分热量变化都发生在海洋上层, 海洋上层热含量与海洋上层的温度和盐度有关. 海水热含量的变化会引起密度的变化^[1], 利用热含量和密度的关系可以建立热含量变化与海面高度变化间的相关关系^[2].

Clara 等^[3]提出海水热含量的多少一定程度上暗示着海洋向大气放热的多少, 海洋对气候影响的重要性不仅体现在海洋对大气放热以热力作用驱动大气, 还在于洋流的热量输送. 海洋热输送的变化通过海洋环流影响整个海域的热状况再分布, 引起热含量的变化, 从而引起海气界面上热通量和水汽通量的变化, 进而影响气候. 为了弄清海洋在气候变化中起的作用, 有必要了解海水热含量的变化状况及其主要影响因素. 胡瑞金等^[4]提出赤道以北印度洋热含量变化项与经向热输送的季节变化特点类似. 在年际尺度上, 海水热含量的变化主要由经向热输送的变化引起. Hvassegawa 等^[5]指出, 阿留申低压加强后黑潮输送加强, 造成日本东南海域热含量异常偏多, 从而引起海面异常放热. Dong 等^[6-7]认为, 在湾流区域和西北大西洋海域上层热含量异常偏多, 导致海面异常放热. 蔡怡等^[8]用 Non-Boussinesq POP 模式模拟得到太平洋热含量从海表向下传播的速度先由快变慢, 到 170 m 再由慢变快, 到 500 m 达到最快, 在 500 m 深度以下又逐渐变慢.

1948—1998 年全球海洋的温度、海水热含量保持了持续的上升趋势, 其中大西洋的上升趋势最为明显. 在 20 世纪 50 年代中期至 90 年代中期, 全球的海水热含量增加了 $2 \times 10^{23} \text{ J}$ ^[7]. 1955—2003 年海洋上层 700 m 内由于热膨胀造成的海平面线性上升速率大约 0.33 mm/a , 造成这个趋势有大约一半的贡献来自大西洋, 约 1/3 的贡献来自太平洋. 1993—2006 年海洋上层 700 m 海水热膨胀造成的海平面线性上升趋势是 1.23 mm/a , 造成这个趋势大约有 60% 的贡献来自太平洋^[9].

T/P 海平面变化与海水热含量变化之间存在良好的线性关系. 由 T/P 海平面变化计算出的海水热含量变化的误差为 $2.0 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7 \text{ J}$, 与海水热含量变化本身的量级 10^9 相比小 1 量级^[10].

目前, 关于海水热含量对海平面变化影响的研究较少. 因此本文分析上层 700 m 全球及区域(包括各纬

度带)长期海水热含量的变化规律,结合 1993—2006 年的 T/P 高度计资料,解释海平面变化与上层海水热含量的关系.

1 数据与方法

本文所用的高度计资料来源于法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋学存档数据中心(AVISO)提供的 T/P(Topex/Poseidon)和 Jason-1 高度计融合资料,覆盖范围为(81.5°S~81.5°N,0~360°),空间分辨率为 1/3°×1/3°.数据时段为 1993 年 1 月—2006 年 12 月.

计算海水热含量所用的海水温盐场资料来源于日本气象局提供的月均客观分析三维温盐场资料(Ishii, 2006),垂向有 16 个标准层,覆盖上层 700 m,空间覆盖范围为(89.5°S~89.5°N,0.5°E~359.5°E),水平分辨率为 1°×1°,时间为 1945 年 1 月—2006 年 12 月.

单层厚度为 H 的海水热含量为

$$C = C_p \rho TH \tag{1}$$

因而温度变化 ΔT 后海水热含量的变化量为

$$\Delta C = C_p \rho \Delta TH \tag{2}$$

式中; ρ —海水密度; T —平均温度; C_p —比热系数,J/(kg·°C). C_p 是 T , p (平均压强), S (盐度)的函数,其计算采用 Gilf^[1]给出的经验公式:

$$C_p(0,T,0) = 4217.4 - 3.720283T + 0.1412885T^2 - 2.654387 \times 10^{-3}T^3 + 2.093236 \times 10^{-5}T^4 \tag{3}$$

$$C_p(S,T,0) = C_p(0,T,0) + S(-7.6444 + 0.107276T - 1.3839 \times 10^{-3}T^2) + S^{3/2}(0.17709 - 4.0772 \times 10^{-3}T + 5.3539 \times 10^{-5}T^2) \tag{4}$$

$$\rho(S,T,0) = \rho_w + AS + BS^{3/2} + CS^2 \tag{5}$$

$$\rho(S,T,p) = \rho(S,T,0) \cdot \left[1 - \frac{(np)}{K(S,T,p)}\right]^{-1} \quad (n = 10^{-5}) \tag{6}$$

式中: $C_p(0,T,0)$ ——标准大气压下纯水的比热系数; $C_p(S,T,0)$ ——海面海水的比热系数; $\rho(S,T,0)$ ——海面海水的密度; ρ_w ——基准水密度,当作纯水参考标准; $\rho(S,T,p)$ ——某层海水的密度; $K(S,T,p)$ ——割线体积模量.

对各区域的定义如下:全球为(64°S~64°N,180°W~180°E),南半球为(64°S~15°S,180°W~180°E),热带为(15°S~15°N,180°W~180°E),北半球为(15°N~64°N,180°W~180°E).在计算不同纬度海平面对某个区域海平面上升的贡献时,需要进行面积因子订正(权重系数为数据所在格点纬度的余弦),运用随机动态分析方法^[12]分析全球及各个区域热含量的变化周期和长期变化趋势,利用相关分析探讨全球热含量与海平面的关系.

2 海水热含量的变化规律

2.1 全球及半球尺度海水热含量的变化规律

1945—2006 年南北半球、热带海区和全球海水热含量均呈明显的上升趋势(图 1),并具有显著的年际和年代际变化特征.南北半球和热带海区海水热含量均在 20 世纪 70 年代开始快速上升期,这与全球近半个世纪的变暖趋势是一致的(图 2).南、北半球海水热含量上升趋势比较明显,北半球上升速率为 7.71×10^{10} J/(m²·a),南半球为 7.36×10^{10} J/(m²·a),而热带海区海水热含量虽有一定的上升,但相对比较稳定.其中南半球海水的热含量变化与全球平均的变化比较同步,这与南半球海洋面积较大有关.

2.2 各纬度带海水热含量的变化规律

各纬度带内的海水热含量均存在较明显的年际变化(图 3).中纬度海域上升趋势明显,30°N~40°N 上升速率为 1.39×10^{10} J/(m²·a),高纬海域也有一定的上升趋势,50°N~60°N 上升速率为 7.15×10^9 J/(m²·a),而赤道附近海域的上升趋势很弱,相对比较稳定.

2.3 三大洋海水热含量的变化规律

南北太平洋、大西洋和印度洋的海水热含量均表现出明显的上升趋势及年际变化(图 4),其中南印度洋海域热

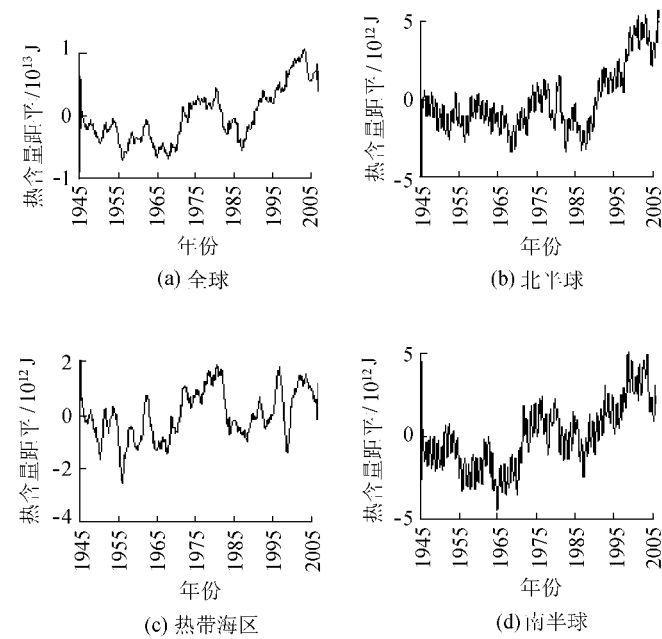


图 1 1945—2006 年各区域海水热含量距平

Fig. 1 Ocean heat content anomaly from 1945 to 2006

含量上升趋势比北印度洋明显,达 $1.30 \times 10^{10} \text{ J}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,太平洋和大西洋的海水热含量在南北半球变化规律相近,并且也是从 20 世纪 70 年代开始上升。

2.4 全球海水热含量变化趋势的空间分布

全球海水热含量变化存在显著的区域差异(图 5)。1945—2006 年全球绝大部分海域的热含量呈上升趋势,尤其在湾流附近海域上升十分明显,上升速率最高可达 $6.41 \times 10^7 \text{ J}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,而在黑潮延伸体海域、 40°S 附近、西太暖池,以及印度洋赤道附近海域的海水热含量呈下降趋势,并呈带状分布,但面积相对较小,对全球海水热含量的上升趋势影响不大。在北太平洋,上升最快和下降最快的海区位于黑潮和亲潮的交汇海域。

3 海平面变化与海水热含量变化的关系

3.1 海平面季节、年际变化与海水热含量的关系

3.1.1 半球尺度海平面季节、年际变化与海水热含量的比较

由于卫星高度计资料长度只有十几年,因此本文主要分析海平面高度与热含量的季节和年际变化尺度上的关系,在计算不同纬度带海平面对某个区域的海平面上升贡献时,需要进行面积因子订正(权重系数为数据所在格点纬度的余弦)。由 1993—2006 年间 T/P 数据分析指出,北半球海平面的季节变化最显著,振幅超过 5 cm(图 6),南半球的季节变化稍弱,振幅为 2 cm,并伴随着很明显的年际变化。北半球海平面最高和最低分别出现在夏末秋初(9 月)和冬末春初(3 月),南半球的情况相反,最高值在 3 月,最低值在 9 月。低纬海区的季节变化不明显,且振幅较小,表现出半年周期信号。全球海平面在 1993—2006 年季节变化明显,基本与北半球同步,但振幅较小,约 1 cm 左右。北半球($15^\circ\text{N} \sim 64^\circ\text{N}$)对全球海平面季节变化的贡献要大于南半球。

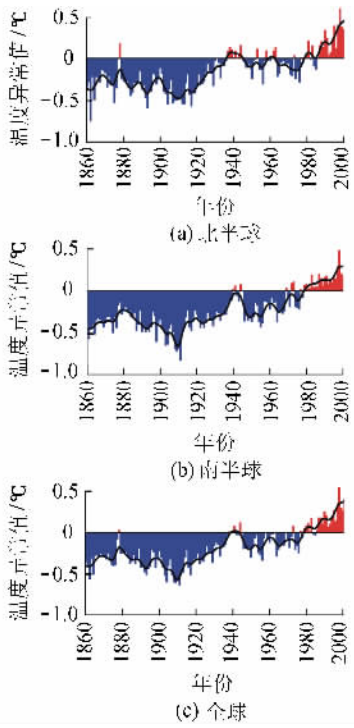


图 2 长期温度异常值(由美国国家海洋和大气局 NOAA 提供)

Fig. 2 Long-term temperature anomalies supplied by National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

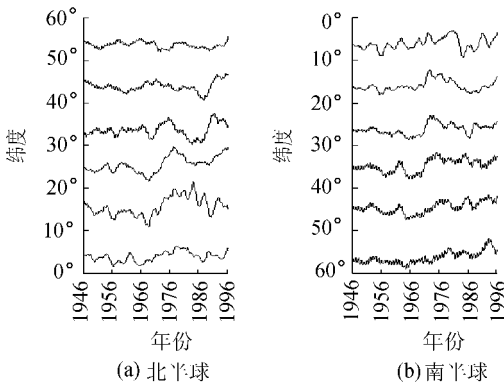


图 3 1945—2006 年 $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$ 每 10 度纬度带内海水热含量距平变化

Fig. 3 Ocean heat content anomaly variation for every 10 degrees of latitude from 60°S to 60°N during 1945 to 2006

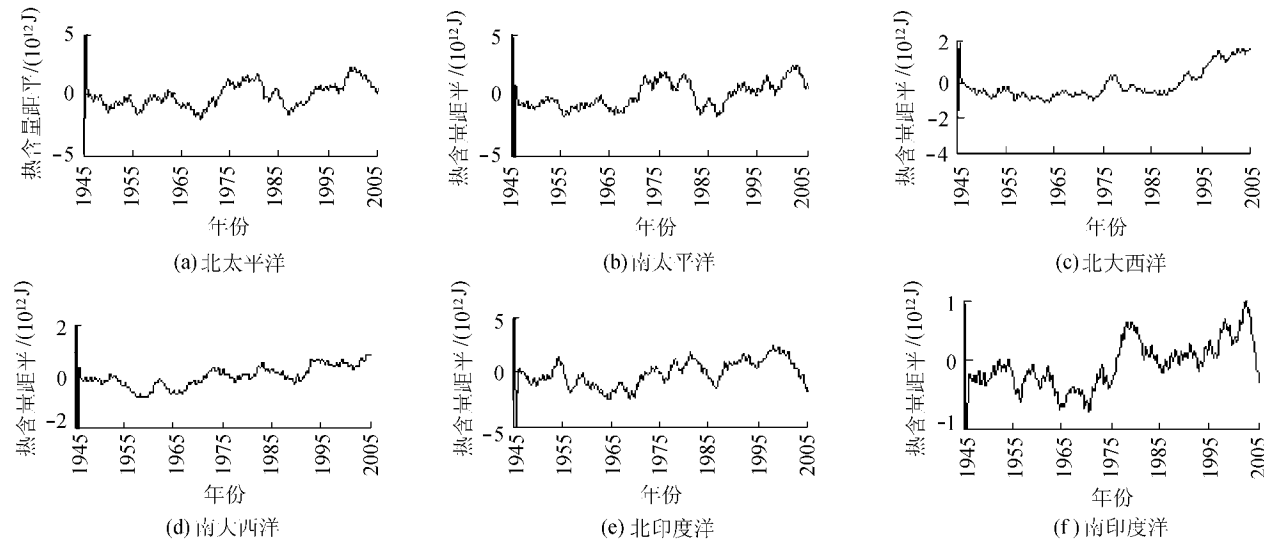


图 4 1945—2006 年南、北太平洋、大西洋和印度洋海水热含量距平的年际变化

Fig. 4 Interannual variations of ocean heat content anomaly in South and North Pacific ,

Atlantic and Indian Ocean from 1945 to 2006

北半球(15°N~64°N)的海平面季节变化与海水热含量的季节变化规律一致,南半球二者的变化规律也大致相同,但热含量没有表现出和海平面一样的上升趋势,而热带海域的季节变化并不明显,1 年出现 2 个高值,表现出半年周期.全球的海水热含量季节变化基本与南半球同步,最高值出现在冬末春初(3 月),最低值出现在夏末秋初(9 月),并与 T/P 海平面季节变化的位相几乎相反,全球海平面变化比海水热含量的变化滞后 7 个月.全球海水热含量在 2003 年后开始下降,表现出明显的年代际变化,而 T/P 海平面却表现出上升趋势.

3.1.2 各纬度带海平面季节、年际变化与海水热含量的关系

纬度带平均的海平面季节和年际变化随纬度不同变化明显(图 7).北半球中纬度(30°N~40°N)海平面季

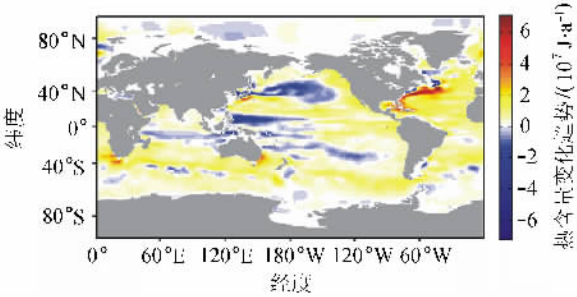


图 5 1945—2006 年全球海水热含量变化趋势

Fig. 5 Variation trend of global ocean heat content from 1945 to 2006

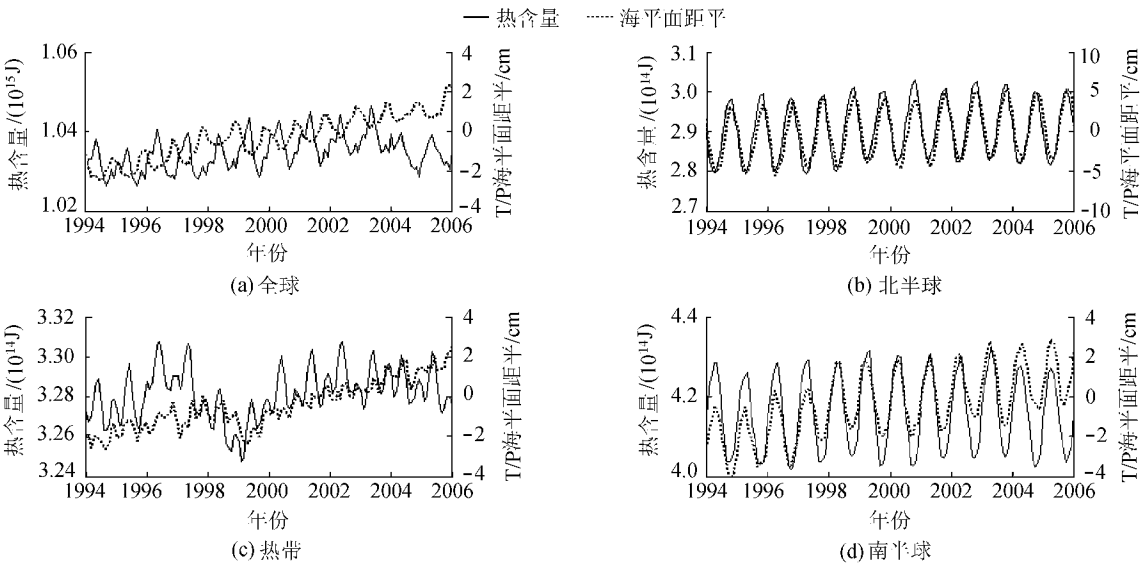


图 6 1993—2006 年海平面异常与海水热含量关系

Fig. 6 Sea level anomaly (dotted line) and ocean heat content (solid line) from 1993 to 2006

节变化最强, 振幅约 6 cm, 南半球中纬度(30°S ~ 40°S)次之, 振幅为 2 ~ 3 cm. 在南极绕极流和南半球低纬海域(0°S ~ 10°S 和 10°S ~ 20°S)季节变化几乎消失, 但存在较强的年际变化. 南北半球中高纬度海平面与海水热含量变化的一致性最好, 尤其在北半球中纬度几乎同步.

3.2 海平面变化趋势的空间分布与海水热含量的关系

1993—2006 年全球海水热含量的变化趋势具有显著的区域差异(图 8). 太平洋近十几年的变化趋势几乎与 1945—2006 年的变化趋势相反, 如 1993—2006 年东太平洋海水热含量呈下降趋势, 而 1945—2006 年呈上升趋势, 而在北太平洋, 上升最快和下降最快的海区依然位于黑潮和亲潮的交汇海域. 在其他海域, 北大西洋北部格陵兰附近海域表现出不同于长期的显著上升趋势, 最大可达 $3.86 \times 10^8 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 而湾流附近海域的热含量与 1945—2006 年的变化趋势相反, 下降趋势明显.

1993—2006 年间大部分海域的 T/P 海平面在上升(图 9), 典型的下降区域如北太平洋中高纬海域、北太平洋东部海域、阿拉伯海以及湾流附近海域. 北半球尤其是北太平洋的海平面变化趋势与海水热含量的变化趋势非常一致, 如黑潮和亲潮的交汇海域以及湾流附近海域, 而在南半球二者的变化差异较大. 说明海水热含量的变化对北半球的海平面影响较大.

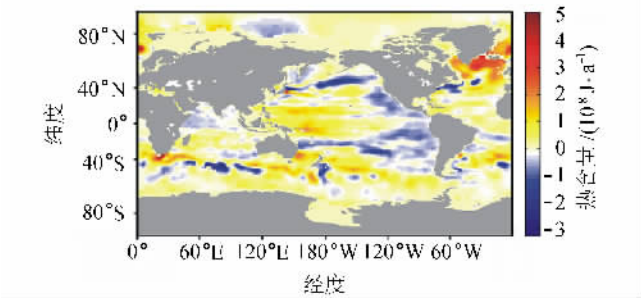


图 8 1993—2006 年全球海水热含量变化趋势
Fig. 8 Variation trend of global ocean heat content from 1993 to 2006

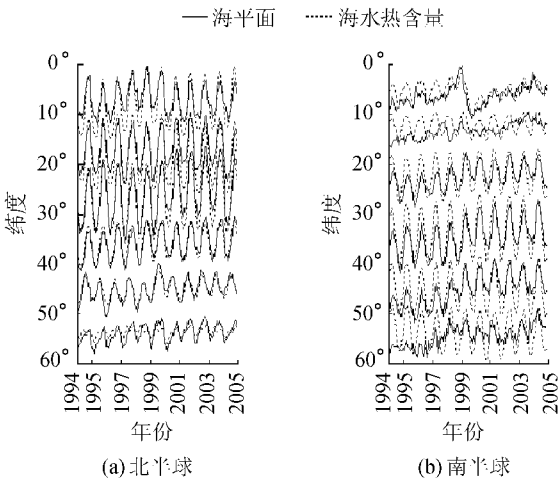


图 7 1994—2005 年 60°S ~ 60°N 每 10 度纬度带 T/P 海平面和海水热含量变化

Fig. 7 T/P sea level anomaly and ocean heat content for every 10 degrees of latitude from 60°S to 60°N during 1945 to 2006.

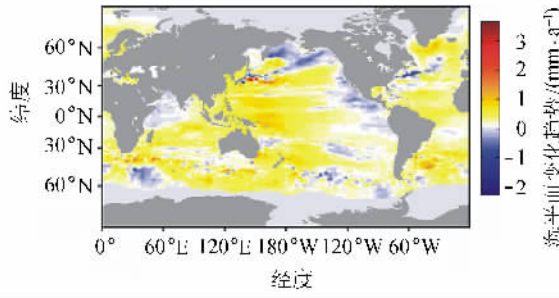


图 9 1993—2006 年全球海平面变化趋势
Fig. 9 Variation trend of global sea level from 1993 to 2006

4 结果和讨论

1945—2006 年全球海水热含量平均上升速率为 $2.1 \times 10^7 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其结果与 Domingues 等^[13]的研究结果一致, 并表现出显著的年际和年代际变化, 尤其在湾流附近海域上升明显, 最大可达 $6.5 \times 10^7 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 但在黑潮延伸体海域、太平洋 40°S 附近的带状海域、西太暖池以及赤道印度洋附近海域, 热含量呈下降趋势, 最大可达 $6.0 \times 10^7 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 1993—2006 年, 海水热含量和海平面在南、北半球均存在显著的季节变化, 且位相相反, 热带海域季节变化不明显, 但表现出显著的半年周期信号. 经研究发现在南半球低纬和高纬海域, 热含量和海平面的季节变化较弱, 热含量对海平面变化的影响较小. 北半球海水热含量和海平面的年际和年代际变化较一致, 而在南半球, 尤其是低纬海域, 海平面滞后热含量, 甚至有相反的变化规律.

热含量反映的是海洋热状况, 是影响气候的一个重要因素, 所以有必要对全球及各典型海域的热含量机制深入研究.

参考文献:

[1] GILL A E, NIILER P P. The theory of seasonal variability in the ocean[J]. Deep Sea Research, 1973, 20 :141-177.

- [2] WHITE W B ,TAI C K. Inferring interannual changes in global upper ocean heat storage from TOPEX altimetry[J]. J Geophy Res ,1995 , 100(C12) 943-954.
- [3] CLARA D ,MICHAEL A A ,MICHAEL S ,et al. Understanding the persistence of sea surface temperature anomalies in midlatitudes[J]. Journal of Climate 2003 ,16 57-76.
- [4] 胡瑞金 ,刘秦玉 ,孟祥凤. 北印度洋的经向热输送与热收支的季节与年际变化[J]. 中国海洋大学学报 ,2005 ,35(3) :363-369.(HU Rui-jin ,LIU Qin-yu ,MENG Xiang-feng. The seasonal and interannual variabilities in the meridional heat transport and heat budget in the Northern Indian Ocean[J]. Journal of Ocean University of China 2005 ,35(3) :363-369.(in Chinese))
- [5] HASEGAWA T ,YASUDA T ,HANAWA K. Multidecadal variability of the upper ocean heat content anomaly field in the North Pacific and its relationship to the aleutian low and the Kuroshio transport[J]. Papers in Meteorology and Geophysics 2007 ,58 :155-166.
- [6] DONG Shen-fu ,KELLY K. Heat budget in the gulf stream region :the importance of heat storage and advection[J]. Journal of Physical Oceanography 2004 ,34 :1214-1231.
- [7] DONG Shen-fu ,SUSAN L H ,KATHRYN A K. Interannual variations in upper-ocean heat content and heat transport convergence in the Western North Atlantic[J]. Journal of Physical Oceanography 2007 ,37 2682-2697.
- [8] 蔡怡 ,李海. 全球变暖背景下最近 40 年太平洋海面高度和热容量变化数值模拟[J]. 热带海洋学报 ,2006 ,25(4) :14-19. (CAI Yi ,LI Hai. Simulation of sea level and heat content of Pacific Ocean based on global warming during last 40 year[J]. Journal of Tropical Oceanography[J]. 2006 ,25(4) :14-19.(in Chinese))
- [9] ANTONOV J I ,LEVITUS S ,BOYER T P. Thermosteric sea level rise ,1955—2003[J]. Geophys Res Lett ,2005 ,32(L12602) ,doi : 10.1029/2005GL023112.
- [10] CHAMBERS D P ,TAPLEY B D ,STEWART R H. Long-period ocean heat storage rates and basin-scale heat fluxes from TOPEX[J]. Journal of Geophysical Research ,1997 ,102 :10525-10533.
- [11] GILL A E. Atmosphere-ocean dynamics international geophysics series[J]. London :Academic Press ,1982 362.
- [12] 左军成 ,陈宗镛 ,戚建华. 太平洋海平面变化及与埃尔尼诺的关系[J]. 青岛海洋大学学报 :自然科学版 ,1997 ,27(4) :446-452.(ZUO Jun-cheng ,CHEN Zong-yong ,Qi Jian-hua. Sea level variation characteristics in the Pacific Ocean and its relationship with EL Nino phenomenon[J]. Journal of Ocean University of Qingdao ,1997 ,27(4) :446-452.(in Chinese))
- [13] CATIA M ,DOMINGUESJOHN A C ,NEIL J ,et al. Improved estimates of upper-ocean warming and multidecadal sea-level rise[J]. Nature 2008 ,453 :1090-1096.

Variation of global ocean heat content and its effect on sea level change

TAN Wei , ZUO Jun-cheng , LI Juan , YANG Yi-qiu , CHEN Mei-xiang

(Institute of Physical Oceanography , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the Ishii temperature and salinity data and T/P altimeter data , the variation characteristics of the global and regional ocean heat content of upper 700 m were studied , and the relationship between the sea level variation and upper ocean heat content was examined . The results show that from 1945 to 2006 , most global ocean heat content of upper 700 m rises at a average rising rate of $2.1 \times 10^7 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, especially near the Gulf Stream where the maximum rising rate is $6.5 \times 10^7 \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and it shows obvious interannual and interdecadal changes . The ocean heat content decreases in the Kuroshio extension region , zonal area near 40°S in the Pacific Ocean , Western Pacific Warm Pool , and sea area near the Equatorial Indian Ocean , and the maximum decline rate is $6.0 \times 10^7 \text{ J} / \text{a}$. From 1993 to 2006 , the ocean heat content and sea level show obvious seasonal variations in both southern and northern hemispheres with opposite phases , show no obvious seasonal variation and a notable semiannual period in the tropical sea areas , show weak seasonal variation in the low-and high-latitude areas in the southern hemisphere . The heat content has little effect on the sea level in the low-and high-latitude area in the southern hemisphere . The interannual and interdecadal variations of the ocean heat content agree with those of sea level in the northern hemisphere , while in the southern hemisphere , especially in the low-latitude sea areas , the sea level variation lags behind the heat content variation , and their evolutions are even opposite .

Key words : ocean heat content ; T/P sea level ; upward trend