

# 利用温度剖面资料结合海面高度估算 全球海洋上层热含量异常

刘增宏<sup>1,2</sup>, 许建平<sup>1,2</sup>, 孙朝辉<sup>2</sup>

1. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

**摘要:** 利用全球海洋约 200 万条温度剖面结合海面高度资料, 估算了 1993—2009 年全球海洋 0—750m 层的热含量异常。分析表明, 仅使用剖面温度资料估算的全球海洋上层热含量可以反映出大部分海区热含量的十年变化信号, 除了资料稀疏的海区(如南大洋)。全球 0—750m 海洋上层在 1993—2009 年的平均增暖速率约  $1.17\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 增暖最显著的海区出现在  $40^\circ\text{S}$  附近。全球海洋热储年际变化中大的信号基本上与厄尔尼诺南方涛动(ENSO)相关。热带海洋的热含量变化相对比较稳定。中、高纬海区, 特别是南大洋中、高纬海区的热含量增加速度在 2001 年后超过了热带海区。随着全球 Argo 实时海洋观测网的建成, 其资料量将大大超过过去几十年的总量, 结合 Jason/TOPEX 卫星高度计资料数据, 可以用来精确估算全球海洋上层热含量的变化, 为全球气候变化系统研究提供重要科学依据。

**关键词:** Argo 资料; 卫星高度计; 热含量; 全球海洋

中图分类号: P731.11 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2013)06-0009-07

## Combining sea surface height data with temperature profile data to estimate global upper ocean heat content anomaly

LIU Zeng-hong<sup>1,2</sup>, XU Jian-ping<sup>1,2</sup>, SUN Chao-hui<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

2. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** Altimetric sea surface height data was combined with ~2000000 temperature profiles to estimate global upper 750m ocean heat content anomaly. The results showed that most of the 10-year variation signals could be resolved by in-situ temperature profiles alone, but in the regions where in-situ data were sparse (e.g., the Southern Ocean), the temperature data were not enough to resolve the changing signals. The global upper ocean had a warming rate of about  $1.17 \text{ W/m}^2$  from 1993 to 2009, and the most significant oceanic warming occurred near  $40^\circ\text{S}$ . Most of the interannual variability in the global ocean heat storage was related to the El Niño and Southern Oscillation (ENSO). The variability of heat content in the tropical oceans was relatively steady, but that in the mid and high latitudes, especially in the Southern Ocean, exceeded that of the tropical oceans after 2001. As the Argo global ocean real-time observing array is fully complete, the amount of in-situ data at any moment will dramatically exceed the total amount of the data in the past decades. Combining with Jason and TOPEX/Poseidon altimeter data, the Argo data is able to estimate the variability of the global upper ocean heat content, thus providing important scientific evidence for global climate change.

**Key words:** Argo data; altimeter data; heat content; global ocean

---

收稿日期: 2012-09-21; 修订日期: 2013-01-08。殷波编辑

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201005033); 科技部科技基础性工作专项(2012FY112300); 国家自然科学基金(41206022); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(JT0804)

作者简介: 刘增宏(1977—), 男, 江苏省无锡市人, 副研究员, 物理海洋调查与分析。E-mail: davids\_liu@263.net

海洋是全球气候系统中拥有最大热容量的组成部分,主导着过去40多年全球热容量的变化<sup>[1]</sup>,因此,研究海洋在全球气候系统中扮演的角色,对认识全球气候变化至关重要。过去研究认为,由气候变化引起的地球变暖信号主要存在于海洋上层<sup>[2-3]</sup>,为了认识过去及现在全球变暖趋势,并为预测这种趋势提供可靠数据,有必要准确估算全球海洋上层热含量异常。Levitus等<sup>[3]</sup>利用历史观测资料计算了全球海洋0—3000m的热含量,发现1955—1998年期间,全球海洋上层热含量增加了 $14.5 \times 10^{22}$ J,相当于以 $0.20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的速度增暖;而Willis等人<sup>[4]</sup>利用Argo等剖面资料结合卫星高度计资料的计算结果显示,1993—2003年全球海洋上层(0—750m)的平均增暖速度约 $0.86 \pm 0.12\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;Lyman等<sup>[5]</sup>的结果为1993—2003年全球海洋0—700m的增暖速度为 $0.63 \pm 0.28\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。气候模式结果表明,约85%的海洋热储发生在750m以上,750m以下的平均吸热约 $0.11\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[2]</sup>。虽然近年来全球海洋观测系统建设取得了长足的发展,但在估算海盆或全球尺度的海洋变化上仍面临巨大的挑战,特别是估算的误差依然相当大。

过去,估算全球海洋热含量变化主要使用现场观测资料<sup>[1,6]</sup>,或结合卫星高度计与回归系数<sup>[7]</sup>等,如Willis等<sup>[4]</sup>及Lyman和Johnson<sup>[8]</sup>使用了现场观测和卫星高度计资料,得到了较为精确的全球海洋上层热含量。尽管卫星海面高度场并不能真正覆盖全球,存在不定的误差,并且包含了淡水和深层变化的信号<sup>[4,9]</sup>,但其观测资料与海洋上层热含量异常有着很好的相关性<sup>[4,7,10]</sup>,而且该资料具有连续、高分辨率及准全球等优点。Carton和Giese<sup>[11]</sup>利用分辨率 $10\text{d}$ 的简易海洋同化(SODA)再分析资料以及最优插值和三维变分方法<sup>[12]</sup>计算了0—700m海洋上层热含量,同样取得了较好的效果。无论是观测的结果还是同化的结果,都能反映十年际的变化趋势,但一些气候模式的结果并没有显示出这种变化趋势,可能与模式排除了像日照、火山爆发等自然变化有关<sup>[13-14]</sup>。模式和观测结果的不一致表明,由于计算方法的差异,估算热含量产生的误差可能非常大。

文中采用Willis等人<sup>[4]</sup>的计算方法,利用XBT、CTD、Argo等现场观测资料,并结合卫星高度计资料,制作了全球海洋上层热含量异常场,其空间分辨率为 $0.33^\circ \times 0.18^\circ$ ,时间分辨率为 $1/4$ 年,通过对全球热含量的积分,探讨全球海洋平均热含量变化特

征及其与ENSO事件的关系。与Willis的工作相比,我们把热含量异常的时间延长至2009年,可以分析最近几年海洋热含量的变化趋势,同时在热带太平洋对热含量进行了经验正交函数(EOF)分析,并与尼诺(NINO)3.4指数进行了相关分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 剖面资料

文中使用的温度剖面观测资料主要包含了XBT、CTD、Argo剖面浮标以及锚定浮标(主要来自热带大气和海洋计划,即TAO)等现场观测资料,时间自1993年1月—2009年10月,约200万条温度剖面。这些资料主要来源于美国海洋数据中心(NODC)的世界海洋数据2005(WOD2005)<sup>[15]</sup>以及全球温盐度剖面项目(GTSPP),另外还使用了世界海洋环流试验(WOCE)和中国Argo实时资料中心(<http://www.argo.org.cn>)收集的全球Argo剖面浮标资料,其中WOCE中的Argo资料主要分布在大西洋,使用了早期的ALACE剖面浮标(1994—2001年),而2000年实施的全球Argo计划使用的是APEX、SOLO和PROVOR型等浮标。这些数据集中可能包含有重复的剖面,如GTSPP和WOD2005数据集中收集了部分Argo剖面资料,所以有必要对这些数据进行筛选以剔除重复资料。文中把观测时间差小于 $2.5\text{h}$ 且观测位置间距离小于 $1\text{km}$ 的剖面认为是重复剖面。图1显示了1993—2009年剖面数量分布,不难看出,随着Argo计划的实施,2002年以后的剖面数量明显增加,如2008年的剖面数量超过21万条,且剖面的分布基本能覆盖全球大洋。

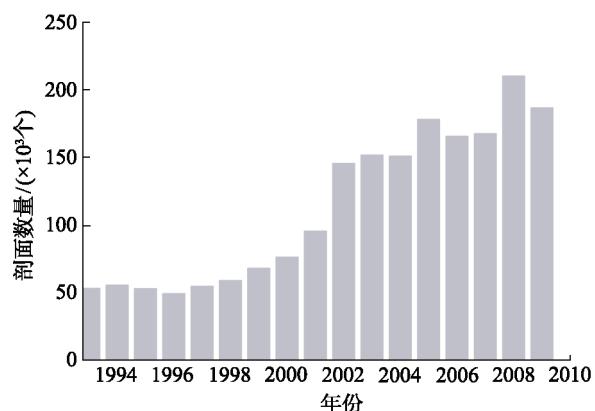


图1 1993年1月—2009年10月间温度剖面数量逐年分布  
Fig. 1 Time series of yearly profile availability from January 1993 to October 2009

所有的温度剖面被线性插值到 0—840m、间隔为 2m 的深度上, 以  $10^\circ \times 10^\circ$  的方区进行划分, 并把剖面数量过少的方区与其邻近的方区合并, 共计 310 个方区。由于这些资料的质量参差不齐, 对资料进行必要的质量控制十分重要。质量控制过程包括: 1)计算出每个方区的平均温度剖面, 剔除超出平均值 6 倍标准偏差的观测值; 2)剔除重复的温度剖面; 3)对于 25m 以浅没有观测数据的剖面, 假设该剖面存在混合层, 则用 25m 以下第一个温度观测值代替混合层温度; 4)剔除 350m 以浅没有观测数据的剖面, 而对于 350—750m 没有数据的剖面, 则采用 Smeed 和 Alderson<sup>[16]</sup>的线性回归方法及利用 Levitus 温度资料<sup>[17]</sup>, 把剖面延伸到 750m。

## 1.2 海面高度资料

文中使用了法国空间局提供的 AVISO、TOPEX/Poseidon、Jason、ERS-1/2 和 Envisat 数据的准实时融合产品<sup>[18]</sup>, 为相对于 1993—1999 年平均海面高度的异常值, 其时间分辨率为 7d, 空间分辨率为  $0.33^\circ \times 0.18^\circ$ , 年限为 2001—2009 年。由于该实时产品的起始时间为 2001 年 8 月, 所以另选取了 AVISO 提供的海面高度异常延时产品, 其时间分辨率为 7d, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 年限为 1993—2009 年, 并通过线性插值方法把延时海面高度异常插值到与准实时产品相同的网格。由于海面高度异常与热含量间存在很强的相关性<sup>[4,7,10,19]</sup>, 因此可以把海面高度异常当做热含量的“替代品”。

## 1.3 热含量异常计算

为了研究热含量的年际变化和年代际变化趋势, 去除了高度计资料和现场观测资料的时间平均及季节性信号。根据 Willis 等人<sup>[4]</sup>的方法, 首先把所有海面高度场去除 1993—2003 年海面高度异常的十年平均, 这样可以减小由大地水准面的不确定度引起的误差, 然后再去除该时间段内的季节平均(3 个月平均)。同时, 使用 2001 年世界海洋图集(WOA01)资料计算年和季节平均场, 并把现场观测资料去除由 WOA01 计算获得的时间平均和季节性信号。

热含量异常场的计算使用 Willis 等人<sup>[20]</sup>开发的方法:

$$\langle \text{OHCA} \rangle_{\text{estimates}} = \langle \text{OHCA} - (\alpha \text{AH}) \rangle + \langle \alpha \text{AH} \rangle \quad (1)$$

其中, OHCA 代表需要估算的热含量异常( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ), AH 代表海面高度(m),  $\alpha$  为海面高度相对于热含量异常的平均回归系数, 尖括号表示客观映射(objective mapping)。式(1)中, 右边第二项表示用海面高度资料估算的热含量异常, 即把  $\alpha \text{AH}$  作为所

求热含量异常的初始估计。在剖面观测资料比较多的海区, 客观映射把该初始估计拖向观测值, 而在没有剖面资料的区域, 热含量异常趋于与  $\langle \alpha \text{AH} \rangle$  (即只使用高度计资料估算的热含量)一致。

利用现场温度观测剖面计算 0—750m 海水热含量的公式为  $\int_0^{750} \rho C_p T(z) dz$ , 其中  $C_p$  为海水比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ),  $\rho$  为海水密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $T(z)$  为海水位温( $^\circ\text{C}$ )。

利用上述方法计算得到的全球热含量场, 其时间范围为 1993—2009 年, 分辨率为 1/4 年, 水平分辨率与 AVISO 提供的海面高度异常相同, 约  $0.33^\circ \times 0.18^\circ$ 。

## 2 结果分析

图 2 显示了 1993—2009 年全球海洋 0—750m 平均热含量的变化。结果表明, 近 16 年全球海洋上层平均增暖速度约  $1.17 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 全球海洋 0—750m 热含量平均增加了约  $18.1 \times 10^{22} \text{J}$ , 而由高度计资料(synthetic estimate)估算的同时期增暖速度为  $1.38 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 略高于结合两者估算的结果。过去利用不同形式的同化方法, 或结合观测数据与模式输出结果计算得到 1960—2001 年全球海洋 0—750m 热含量分别增加了  $12.3 \times 10^{22} \text{J}$ <sup>[11]</sup> 和  $16.4 \times 10^{22} \text{J}$ <sup>[12]</sup>。从图 2 可见, 2003—2005 年全球海洋有变冷的趋势, 2005—2008 年增暖速度明显增加, 而 2008 年以后全球热含量又呈下降趋势。Willis 等人<sup>[4]</sup>计算的 1993—2003 年全球海洋 0—750m 平均增暖速度约  $0.86 \pm 0.12 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , Trenberth<sup>[21]</sup>的最新结果为 1993—2008 年全球海洋增暖速度约  $0.64 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 均小于文中计算结果。这些差异是由于最近几年全球海洋上层增

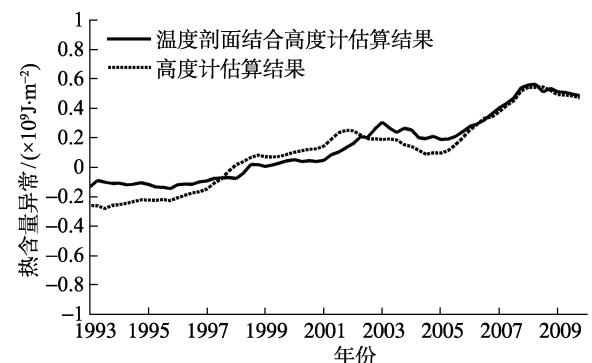


图 2 1993—2009 年全球海洋 0—750m 平均热含量变化

Fig. 2 Globally averaged heat content variability above 750 m during 1993–2009. The solid line indicates the estimate from the *in-situ* profiles combined with altimetric data; the dashed line represents the estimate from the altimetric data alone

暖速度有加快的趋势, 还是不同类型的观测资料存在着不同的系统误差导致的, 有待进一步的研究和探讨。随着2007年全球Argo观测网的全面建成, 特别是Argo浮标在南大洋的覆盖率增加, 2007年后剖面观测资料结合卫星高度计的计算结果与仅使用卫星高度计资料的计算结果吻合良好(图2)。

我们使用温度剖面结合卫星高度计资料, 以及仅使用剖面观测资料(即现场估算结果), 分别计算了1995—2005年全球海洋热含量的变化, 用来比较使用和不使用卫星高度计资料计算结果之间的差异。需要指出的是, 现场估算结果是由每个温度剖面计算的热含量并通过客观映射获得。从图3可以发现, 现场估算结果与剖面资料结合高度计资料的估算结果所反映的十年变化信号基本一致, 只是现场估算结果反映的变化信号弱于后者。从热含量的纬向积分(每个网格内的值乘以网格纬向距离后的积分, 陆地除外)可以发现, 仅使用剖面资料的现场估算结果可基本分辨出热含量十年变化信号, 南大洋由于剖面资料相对较少(图3c), 现场估算结果的

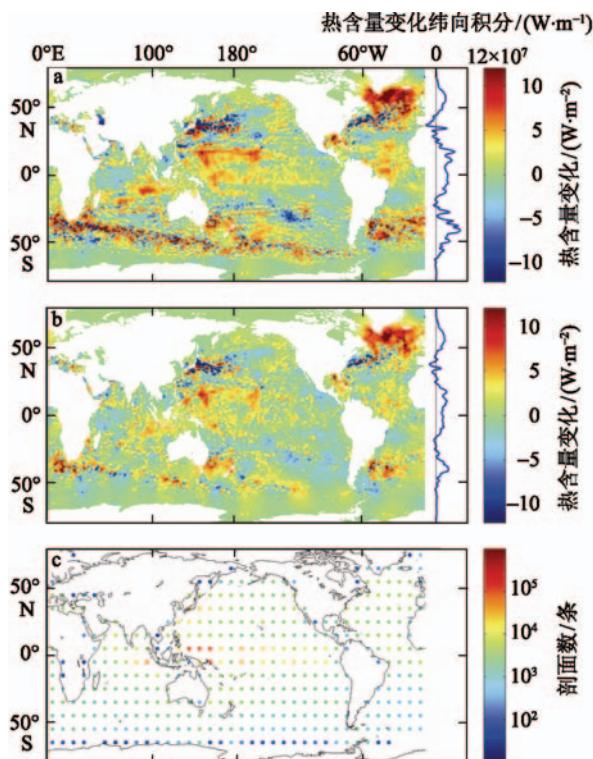


图3 全球海洋热含量十年(1995—2005年)变化

a. 使用剖面资料结合卫星高度计资料的估算结果; b. 仅使用剖面观测资料的估算结果; c.  $10^{\circ}\times10^{\circ}$ 网格内温度剖面的数量

Fig. 3 Maps of 10-year (1995-2005) change in heat content in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . (a) Estimate from combining altimeter and *in-situ* data. (b) Estimate from *in-situ* data alone. The curves on the right-hand side show the zonal integral of the map in watts per meter per latitude. (c) Number of *in-situ* profiles per 10-degree box

纬向积分与后者的结果相比差别较大。从热含量十年变化分布来看, 格陵兰岛以南、西太平洋暖池及南大洋海区是增暖比较明显的区域, 而 $40^{\circ}\text{S}$ 附近是全球海洋增暖最明显的海区。在南极绕极流和西边界流区, 热含量场则呈现了许多小尺度变化。

为了分析热含量的年际变化特征, 画出了每一年的全球海洋热储变化图(图4), 即相邻2年热含量差随时间的变化。从图4中可以清晰地看出年际变化信号, 其中以1997—1998年厄尔尼诺(El Niño)爆发和消亡引起的变化信号最为明显。全球海洋热储的年际变化受热带海洋, 特别是热带太平洋与印度洋的影响非常明显。实际上, 全球海洋热储的年际变化大部分与El Niño和南方涛动(ENSO)有关<sup>[4]</sup>。如1995年, 热带西太平洋的持续增暖标志着持续多年(自20世纪90年代开始)的El Niño事件的结束; 而1999年相同的增暖出现在热带西太平洋, 预示着拉尼娜(La Niña)事件的爆发; 2007年, 热带西太平洋海水变暖, 而热带东太平洋变冷, 为中等强度的

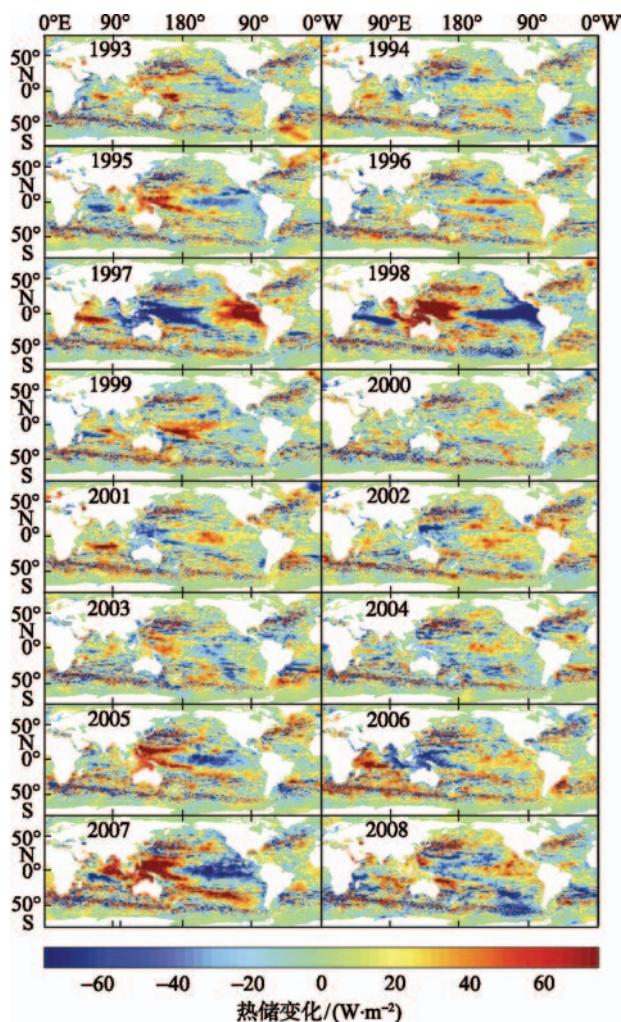


图4 1993—2008年全球海洋热储变化

Fig. 4 Maps of heat storage variability in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  from 1993 to 2008

La Niña 事件; 2008 年, 热带东太平洋开始变暖, 似乎预示着新一轮 El Niño 事件的爆发。

图 5 为全球海洋热含量纬向积分随时间的变化, 这里使用纬向积分而不是纬向平均, 是由于前者更能反映每一个纬度带对全球海洋的贡献。图 5 中最为明显的是, 2003 年以来, 南大洋增暖趋势十分显著, 其中以 2006—2009 年  $10^{\circ}\text{S}$ — $45^{\circ}\text{S}$  间的增暖最为明显, 占全球海洋增暖很大的比例。Levitus 等人<sup>[3]</sup>利用 WOD2001 数据集计算 1955—2003 年全球海洋热含量后发现, 南大洋以  $40^{\circ}\text{S}$  为中心, 热含量呈线性增长的趋势; 而 Willis 等人<sup>[4]</sup>利用现场观测资料结合卫星高度计也得到了相似的结论, 即 1993—2003 年, 南大洋以  $40^{\circ}\text{S}$  为中心, 海水温度呈线性增长趋势。虽然, Roemmich 和 Gilson<sup>[22]</sup>利用 Argo 资料与 WOA01 气候态资料比较发现, 2004—2008 年北半球的纬向温度平均比南半球的温度平均增长更多, 但是, 由于北半球  $40^{\circ}\text{N}$  以北的海洋面积比南半球  $40^{\circ}\text{S}$  以南小得多, 所以并不能反映热含量的纬向积分变化。2007—2009 年  $10^{\circ}\text{N}$  附近的变暖趋势也十分明显。从图 5 中可以清晰分辨出 1997—1998 年

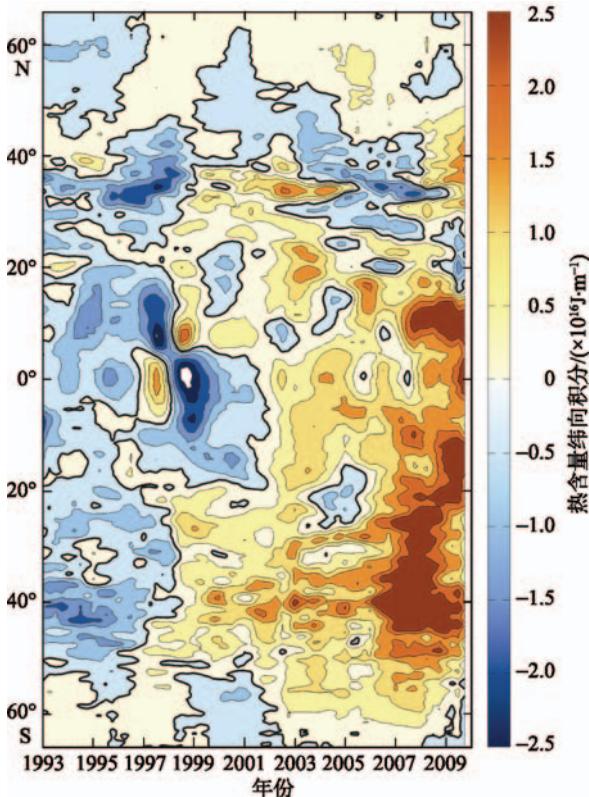


图 5 全球海洋热含量纬向积分随时间的变化  
粗线表示等值线, 间隔为  $0.5 \times 10^{16} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$

Fig. 5 Time-latitude plot of zonally integrated heat content in the units of  $1 \times 10^{16}$  Joules per meter per latitude. The contour interval is  $0.5 \times 10^{16} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$ , and the thick contour is the zero contour

的 El Niño 事件引起的热含量异常变化特征来。北半球的增暖主要发生在 2003 年以后, 范围为  $0$ — $20^{\circ}\text{N}$  间。另外,  $40^{\circ}\text{N}$  附近也出现增暖趋势, 时间为 1999—2003 年和 2008—2009 年, 但范围不大, 可能由北大西洋的升温引起<sup>[6]</sup>。

为了分析热带海洋对全球海洋变暖的贡献, 我们把热带海洋( $20^{\circ}\text{S}$ — $20^{\circ}\text{N}$ )的热含量积分后与全球的进行比较。从图 6 可见, 热带海洋的热含量变化相对比较稳定, 而全球海洋热含量变化在 2003 年和 2008 年有 2 个峰值。2001—2003 年及 2005—2008 年 2 个时间段内, 全球海洋热含量增加最快, 而 2003—2005 年及 2008 年以后, 热含量明显下降, 但 2008 年以后热带海洋并没有出现热含量的明显下降, 说明该时间内热含量减少发生在中、高纬度海区。从图 5 也可看出, 该时间段内的热含量下降主要发生在北半球。总体上看, 2001 年以后的中、高纬海区特别是南大洋中、高纬海区热含量增长速度超过了热带海区。

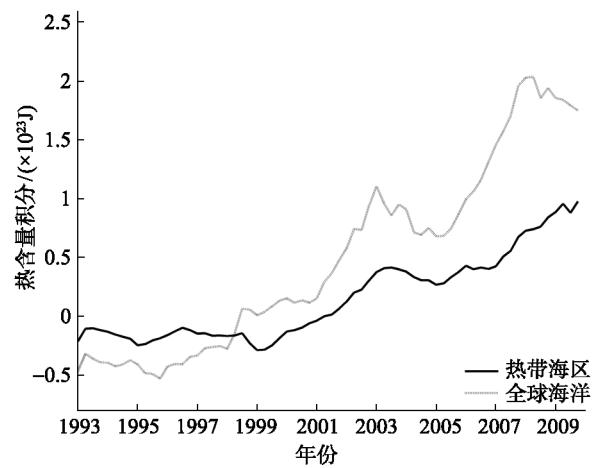


图 6 全球海洋热含量积分(灰线)及热带海洋热含量(黑线)积分随时间的变化

Fig. 6 Interannual variability in heat content integrated over the region from  $20^{\circ}\text{N}$  to  $20^{\circ}\text{S}$  (dark line) and over the entire globe (gray line)

为了研究热含量异常与 ENSO 事件的关系, 我们选取了热带太平洋  $120^{\circ}\text{E}$ — $80^{\circ}\text{W}$ 、 $5^{\circ}\text{S}$ — $5^{\circ}\text{N}$  范围内的热含量异常进行了 EOF 分析, 获得 EOF1(第一模态方差贡献率为 65.4%)时间系数与 NINO3.4 指数作归一化处理后进行对比。由图 7 可以看出, NINO3.4 指数与热含量异常的变化有着很好的相关, 两者的相关系数可达 0.88, 与吴晓芬<sup>[23]</sup>利用美国 Scripps 海洋研究所提供的 Argo 网格化资料得到的结果非常一致。

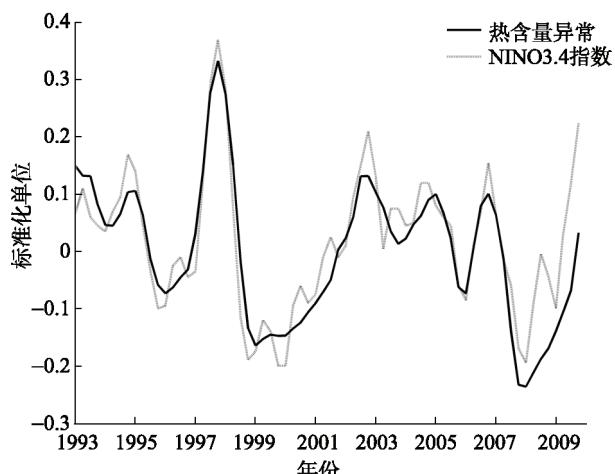


图 7 热带太平洋热含量异常与 NINO3.4 指数的相关关系

Fig. 7 Correlation between heat content anomaly in the tropical Pacific and the NINO3.4 index

### 3 小结与讨论

利用 XBT、CTD、Argo 等剖面温度资料,结合卫星海面高度资料,估算了 1993—2009 年全球海洋 0—750m 层热含量异常场。这期间,全球海洋以平均  $1.17\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  的速度增暖,即 16 年来,全球海洋热含量平均增加了约  $18.1\times 10^{22}\text{J}$ , 与 Levitus 等人<sup>[6]</sup>计算得到的过去 40 年(20 世纪 50 年代至 90 年代)海洋热含量变化基本一致。然而,文中计算得到的平均增暖速度比他们的结果( $0.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )似乎要大很多,比 Trenberth<sup>[21]</sup>、Willis 等人<sup>[4]</sup>以及 Lyman 等<sup>[5]</sup>的结果也略大,这是否是真实的海洋增暖加剧还是不同类型观测资料中存在的系统误差,还有待我们做进一步的研究。

仅使用现场剖面资料的估算结果可以基本分辨出热含量十年(1995—2005 年)变化信号,只是现场估算结果反映的变化信号弱于结合卫星高度计资料的估算结果。南大洋由于现场剖面资料相对较少,现场估算结果的纬向积分与后者的结果相比差别较大。为此,国际 Argo 计划组织一直在鼓励各国尽量在 Argo 浮标相对较少的南大洋海域布放浮标,使该

观测网能真正实现对全球海洋的实时监测。热含量的十年变化分布表明,格陵兰岛以南、西太平洋暖池及南大洋海区是增暖比较明显的区域,而 40°S 附近海区最为显著。

全球海洋热储的年际变化大部分与 ENSO 有关,以 1997—1998 年 El Niño 爆发和消亡引起的变化信号最为明显。2003 年以来,南大洋变暖趋势较为明显,其中以 2006—2009 年  $10^{\circ}\text{S}$ — $45^{\circ}\text{S}$  间的增暖最显著,占全球海洋增暖比例最大。北半球的增暖主要发生在 2003 年以后  $0$ — $20^{\circ}\text{N}$  范围内。另外,40°N 附近也出现增暖趋势,时间为 1999—2003 年及 2008—2009 年,但范围不大,可能由北大西洋的升温引起。

比较热带和全球海洋热含量积分的年际变化发现,热带海洋的热含量比全球的热含量变化更加稳定。2001—2003 年及 2005—2008 年 2 个时期,全球海洋热含量增加最快,而 2003—2005 年及 2008 年以后,热含量呈下降趋势,但热带海洋 2008 年以后并没有出现热含量的明显下降。2001 年以后,中、高纬海区特别是南大洋中、高纬海区的热含量增加速度超过了热带海区。热带太平洋热含量异常的变化与 NINO3.4 指数存在很大的相关性,表明热带太平洋热含量异常的年际变化与 ENSO 事件有很好的一致性。

随着全球海洋观测系统的发展,特别是全球 Argo 实时海洋观测网的全面建成,使我们可以获取更多不同类型的观测资料,如何结合这些不同类型的资料来精确评估海洋的变化过程显得非常重要。文章是在前人工作的基础上,利用现场剖面观测资料结合卫星遥感资料获得的全球海洋上层年际变化的产品。两者必须有效结合起来才能获得更为精确的产品,因为卫星遥感资料具有覆盖广、同步等优势,而近几年建成的全球 Argo 实时海洋观测网具有高分辨率、深层次和准实时等优点,是对卫星观测的有效补充。

### 参考文献

- [1] LEVITUS S, ANTONOV J I, WANG J, et al. Anthropogenic warming of Earth's climate system[J]. Science, 2001, 292: 267–270.
- [2] HANSEN J, NAZARENKO L, RUEDY R, et al. Earth's energy imbalance: confirmation and implications[J]. Science, 2005, 308: 1431–1435.
- [3] LEVITUS S J, ANTONOV I, BOYER T P. Warming of the world ocean, 1955–2003[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32: L02604.
- [4] WILLIS J K, ROEMMICH D, CORNUELLE B. Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales[J]. J Geophys Res, 2004, 109: C12036.
- [5] LYMAN J M, SIMON A G, VIKTOR V G, et al. Robust warming of the global upper ocean[J]. Nature, 2010, 465: 334–337.

- [6] LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. Warming of the world ocean[J]. *Science*, 2000, 287: 2225–2229.
- [7] WHITE W, TAI C K. Inferring interannual changes in global upper ocean heat storage from TOPEX altimetry[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100 (C12): 24943–24954.
- [8] LYMAN J M, JOHNSON G C. Estimating annual global upper-ocean heat content anomalies despite irregular in situ ocean sampling[J]. *J Climate*, 2008, 21: 5629–5641.
- [9] WUNSCH C, PONTE R M, HEIMBACH P. Decadal trends in sea level patterns: 1993–2004[J]. *J Climate*, 2007, 20: 5889–5911.
- [10] GILSON J, ROEMMICH D, CORNUELLE B, et al. Relationship of TOPEX/Poseidon altimetric height to steric height and circulation in the North Pacific[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 27947–27965.
- [11] CARTON J A, GIESE B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 2999–3017.
- [12] DAVEY M. Enhanced ocean data assimilation and climate prediction[R]. UK: Met Office, 2005: 1–79.
- [13] GREGORY J M, BANKS H T, STOTT P A, et al. Simulated and observed decadal variability in ocean heat content[J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L14614.
- [14] ACHUTAR K, ISHII M, SANTER B D, et al. Simulated and observed variability in ocean temperature and heat content[J]. *Proc Na Acad Sci*, 2007, 104: 10768–10773.
- [15] BOYER T P, ANTONOV J I, GARCIA H, et al. World ocean database 2005, Chapter 1: Introduction[R]/LEVITUS S. NOAA Atlas NESDIS 60[R]. Washington D C: Government printing office, 2006: 1–182.
- [16] SMEED D A, ALDERSON S G. Inference of deep ocean structure from upper ocean measurements[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1997, 14(3): 604–665.
- [17] STEPHENS C, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. World ocean atlas 2001, Volume 1: Temperature[R]/LEVITUS S. NOAA Atlas NESDIS 49. Washington D C: Government Printing Office, 2002: 1–167.
- [18] DUCET N, LE TRAON P Y, REVERDIN G. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C8): 19477–19498.
- [19] LYMAN J M, WILLIS J K, JOHNSON G C. Recent cooling of the upper ocean[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L18604.
- [20] WILLIS J K, ROEMMICH D, CORNUELLE B. Combining altimetric height with broadscale profile data to estimate steric height, heat storage, subsurface temperature, and sea-surface temperature variability[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(C9): 3292.
- [21] TRENBERTH K E. The ocean is warming, isn't it?[J]. *Nature*, 2010, 465: 304.
- [22] ROEMMICH D, GILSON J. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program[J]. *Prog Oceanogr*, 2009, 82: 81–100.
- [23] 吴晓芬. 基于 Argo 资料的热带西太平洋上层海洋热含量研究[D]. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 2010: 1–91.