

西太平洋暖池热状况变化特征及其东传过程*

陈锦年^{1,2,3} 王宏娜^{1,2}

(1.中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2.中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071;
3.中国气象局广州热带海洋气象研究所 广州 510080)

提要 应用 JEDAC 海温和 SODA 再分析资料, 分析研究了西太平洋暖池(WPWP)的热状况变化特征, 探讨了 WPWP 的热含量变化与不同深度海温变化, 特别是与表层和次表层海温场之间的内在联系, 分析研究了 WPWP 异常海温东传过程中与温跃层变化之间的关系, 最后讨论了赤道潜流在异常海温东传过程的作用。结果表明, WPWP 区域的热含量变化与次表层的海温变化具有相同变化趋势。WPWP 区域的热含量变化与次表层海温达到(超过)99.9%信度检验的相关出现在次表层海温变化超前热含量变化的 12 个月至次表层海温变化滞后热含量变化 12 个月, 最佳相关出现在同期, 相关系数 $r=0.92$ (样本 $n=552$)。WPWP 区域的热含量变化与 SST 达到 99.9%信度检验的相关只出现在热含量滞后 SST 5 个月至同期。这一结果表明, WPWP 区域的热含量变化主要体现了次表层海温场的变化特征。由此认为, WPWP 区域热含量变化(次表层海温场)对气候变化的贡献主要体现在东向传播对 ENSO 的贡献上。由 WPWP 异常海温沿赤道东传过程和温跃层变化之间的关系可知, 温跃层变化滞后于 WPWP 区域东传的异常海温, 在 WPWP 区域异常海温东传过程中, 赤道潜流起了重要作用。

关键词 WPWP 热含量 次表层异常海温 SST 温跃层 赤道潜流

中图分类号 P731.21

近年的研究表明, 热带太平洋次表层存在“异常海温信号通道”(陈锦年等, 2002), 这一异常海温信号通道对 ENSO 循环过程具有重要贡献。而 WPWP 区域次表层异常海温变化和东传是“异常海温信号通道”中的重要枢纽, 也是导致 ENSO 循环过程的关键区域(李崇银等, 1999)。因此, 该区域次表层的海温异常变化将制约着 ENSO 循环的发生发展。所以, WPWP 区域次表层海温异常对气候的影响是不可忽视的重要因素。

近年来许多学者采用不同方法和途径分析研究 WPWP 区域的热状况, 有的使用热含量初步探讨了季风爆发以及与中国降水之间的关系(陈永利等, 2003; 张启龙等, 2003)。由大尺度海气相互作用理论可知, 对于季风爆发和中国降水过程与海洋表面热状况分布特征及其相伴随的热带大气环流结构存在密切关系。但这些工作未给出热含量影响海洋表面热

状况, 进而影响热带大气环流的可靠证据。本文中作者试图通过对 WPWP 区域热含量变化特征与海表面热状况(SST)和不同深度海温场的分析, 探讨它们之间的内在联系, 揭示热含量影响海温场的可能机制, 为深入研究海洋与大气相互作用过程提供理论依据。

1 资料来源

本文的分析资料来自美国 Scripps 海洋研究所环境数据分析中心(JEDAC; Joint Environmental Data Analysis Center, USA)和美国 Maryland 大学大气海洋科学系(SODA 1.4.3; the Data Set of Simple Ocean Data Assimilation, USA)的再分析海温和热含量资料。本文中作者重点分析了西太平洋暖池(以下简称 WPWP)的热含量、次表层海温以及 SST 的变化特征, 试图给出热含量与次表层异常海温和 SST 的内在联系, 为深入研究大尺度海气相互作用过程提供参考。

* 国家自然科学基金项目,40676017 号; 中国科学院知识创新工程重要方向项目,KZCX2-YW-Q11-02 号; KZCX2-YW-214 号。陈锦年, 研究员, 博士, E-mail:jnchen@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2008-12-15, 收修改稿日期: 2009-10-10

2 WPWP 区域热状况变化特征

以前对 WPWP 的特征及其相关的研究,人们大多依据 28.0°C 定义的区域进行分析(Wyrtki, 1975)。作者通过对 1950 年以来的热带太平洋海温资料进行分析研究发现,采用 28.0°C 定义的西太平洋暖池区域出现与东太平洋暖池合为一体现象。特别是在 70 年代出现气候突变后,在气候平均场的 6—8 月均出现东、西太平洋暖池合并现象,这一现象对深入研究西太平洋暖池(或东太平洋暖池)的时空变化特征、形成机理以及对气候的研究过程带来不便。为了能够从赤道太平洋暖池分离出西太平洋暖池,有时不得不加以人为限定(赵永平等, 2002)。

鉴于上述原因,作者在对长序列(1950—2004 年)热带太平洋海温资料分析研究的基础上,给出了 WPWP 的新界定,即以 28.5°C 等温线所包围的海表面区域定义为 WPWP。图 1 是新界定的 WPWP 表层海温不同季节的变化特征。由图 1 可以看出,新界定的 WPWP 更为客观地反映了 WPWP 的变化特征,避免了由 28.0°C 定义的 WPWP 与东太平洋暖池合为一

体的现象,同时也避免了由 29.0°C 定义出现季节变化偏小的问题。由研究表明,新界定的 WPWP 在三维形态变化中,具有明显的季节变化特征,在冬春季节,WPWP 经向(南北)偏小,位置偏东,其范围基本维持在 10°S—10°N, 140°E—140°W。在夏秋季节,WPWP 经向(南北)变大,位置偏西,其范围基本维持在 10°S—20°N, 120°E—160°W。WPWP 的最大深度基本盘踞在南半球 5°S, 180°, 多年平均最大深度基本为 130m 左右。

根据上述分析,选取 10°S—16°N, 130°E—180° 的范围来表征 WPWP 特征,为了探讨 WPWP 热状况的变化,选取了 500m 以浅的热含量以及 120m 和温跃层曲面上的最大异常海温进行分析(图 2),由图 2 可以看出,WPWP 区域的热含量和次表层海温以及温跃层曲面上的最大异常海温的变化基本一致。为了进一步说明 WPWP 区域热含量与不同深度海温之间的关系,对 WPWP 区域热含量和该区不同深度的海温场进行了相关分析(图 3)。由图 3 可知,WPWP 区域热含量与不同深度的海温变化存在较大差异,它们之间的最大相关场出现在次表层(120—200m),在同期的

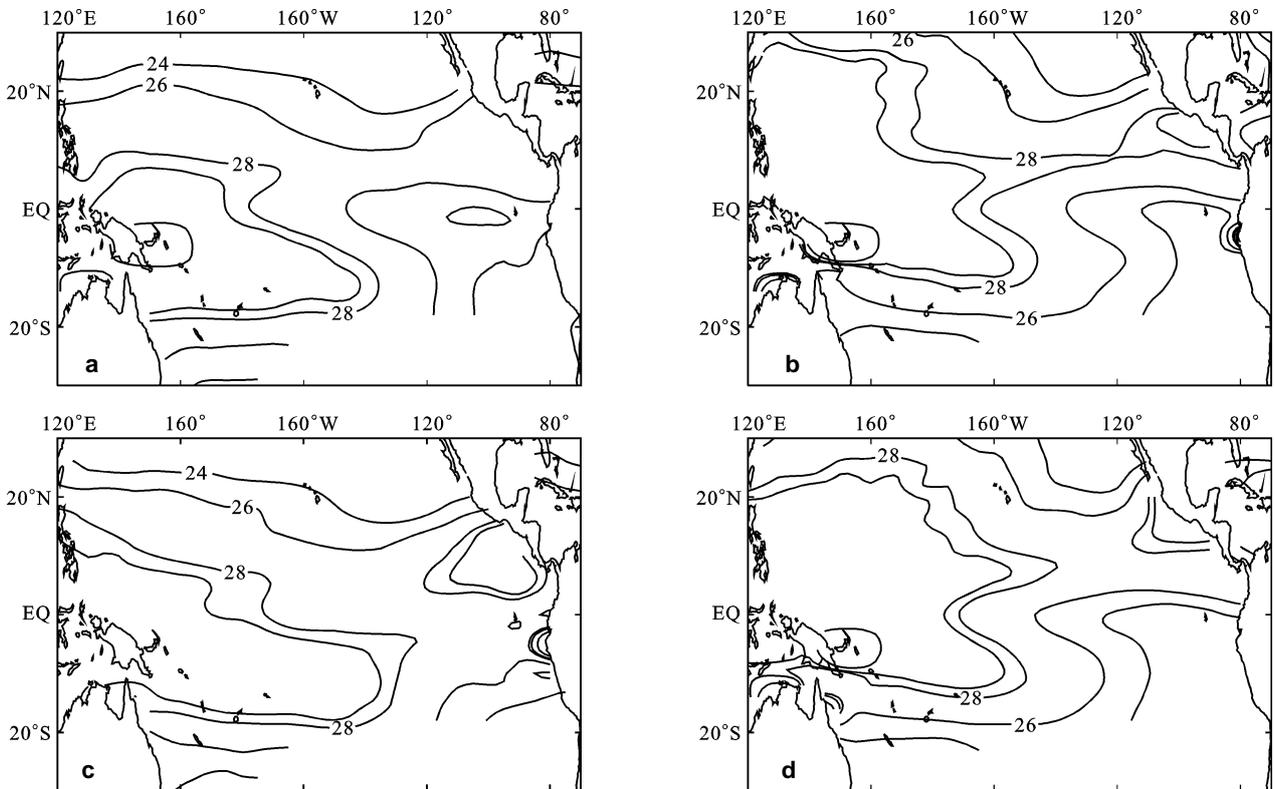


图 1 热带太平洋海温场气候变化特征(1955—2002)
a.1 月; b. 7 月; c.4 月; d.10 月

Fig.1 The feature of variation in ocean temperature in tropical Pacific (1955—2002)

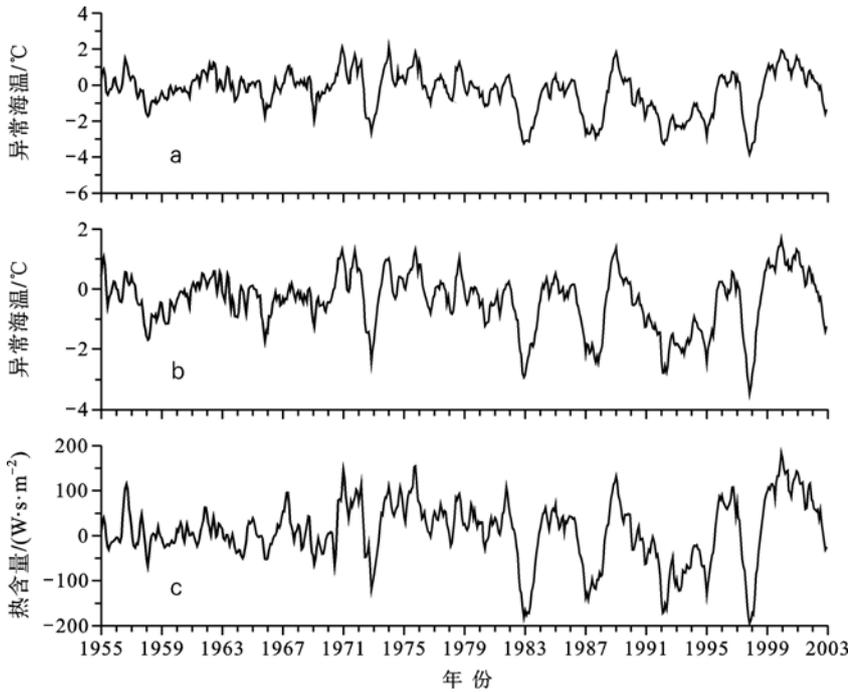


图2 西太平洋暖池区域温跃层最大异常海温(a)、120 m 海温(b)和热含量(c)变化曲线

Fig.2 The variation curves of anomalous ocean temperatures at thermocline (a) and 120 m (b), and that of heat storage(c) in WPWP

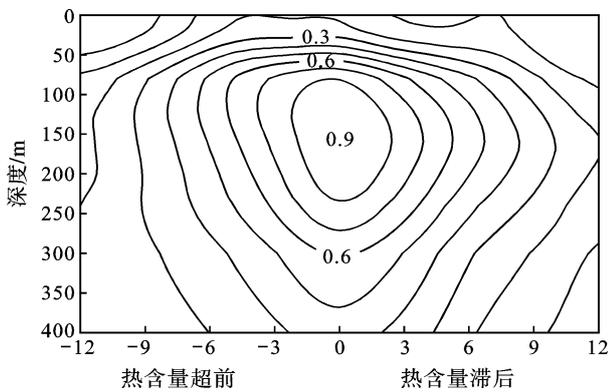


图3 WPWP 区域热含量与不同深度海温时滞相关

Fig.3 The lag correlation between the heat storage and ocean temperature of different depths in WPWP area

最大相关系数为 $r=0.92$ (样本 $n = 552$), 远远超过 99.9% 信度检验水平。而在表层, 热含量与 SST 的相关较弱, 相关系数仅为 0.3。另外, 在次表层, 从热含量超前海温变化的 10 个月到热含量滞后海温变化的 10 个月, 相关系数均超过了 99.9% 的信度检验水平。这一结果说明, 热含量变化与次表层的海温场之间存在显著而稳定的密切联系。相反, 热含量与 SST 之间的联系不太密切。

为了进一步分析 WPWP 热含量与 SST 和次表层

海温变化之间的关系, 选择了 WPWP 区域的热含量与热带太平洋海表面温度和次表层海温进行相关分析, 结果发现(图 2), WPWP 区域的热含量与热带太平洋海温场的相关存在以西太平洋和中、东太平洋为主的正和负的相关分布特征。前者的相关关系表明, WPWP 区域的热含量主要受前期位于西太平洋 SST 的影响, 当 SST 出现高(低)时, WPWP 区域的热含量也会相应出现大(小), 其影响可以追溯至 SST 超前 1 年的时间。后者的相关关系表明, WPWP 区域的热含量变化与中东太平洋 SST 存在反位相关关系。当中、东太平洋 SST 出现高(低)时, WPWP 区域的热含量会出现偏小(大), 这种现象与次表层异常海温东传有关。值得注意的是, 当 SST 滞后热含量变化时, 西太平洋热含量与 SST 相关不显著。上述结果表明, WPWP 区域的热含量变化主要体现的是次表层海温场的变化, 在热带太平洋, 最大的海温异常发生在温跃层曲面上, 因此, 在热带太平洋次表层异常海温信号通道(陈锦年等, 2002)中, 来自于北赤道流区域的异常海温信号传播到 WPWP 区域次表层时, 使得 WPWP 区域次表层出现异常冷(暖)海温, 从而导致热含量的减少(增加)。由本文的分析结果表明, WPWP 区域的 SST 对局地热含量也存在一定的贡献。

3 WPWP 区域次表层海温异常与温跃层变化

WPWP 区域次表层异常海温沿赤道东传是导致 ENSO 事件的重要机制(李崇银等, 1999)。由上述分析可知, WPWP 区域次表层异常海温变化与该区域热含量变化存在相同的变化趋势, 即 WPWP 区域的热含量变化特征实质上反映了次表层异常海温场的变化特征。因此, WPWP 区域热含量变化或次表层海温场对气候变化的贡献主要体现在东向传播对 ENSO 的影响上。

为了进一步探讨 WPWP 区域次表层异常海温东传与温跃层变化的内在联系, 应用 WPWP 区域次表层异常海温与热带太平洋温跃层变化(20°C 等深面)进行时滞相关分析(图略)。结果表明, 在 WPWP 区域次

表层海温滞后温跃层变化 8 个月至同期, 存在较好的相关关系, 同期最为显著。这说明 WPWP 区域次表层异常海温变化主要是受温跃层变化的影响, 而在温跃层滞后 WPWP 区域异常海温的 4—12 个月, 正的相关区域明显沿赤道向东扩展。当温跃层变化与 WPWP 区域异常海温为同期时, 最大相关出现在 WPWP 区域, 但达到 99.9% 信度的相关场位于中太平洋; 当温跃层变化滞后 WPWP 区域异常海温 4 个月时, 达到 99.9% 信度的相关场可达赤道东太平洋 140°W; 当温跃层滞后 8 个月时, 达到 99.9% 信度的相关场已东移到 110°W; 当温跃层滞后 12 个月时, 达到 99.9% 信度的相关场已达东海岸。这种相关场的演变过程大致用时 1 年。由这一相关关系可知, 位于 WPWP 区域的异常海温沿赤道东传时, 导致沿赤道的温跃层出现相应的变化, 温跃层的深度变化与异常海温东传的时空分布相一致, 无论是异常海温还是温跃层变化, 从西太平洋暖池区域到赤道东太平洋, 大约需要时间为 1 年左右, 这一传播速度与赤道潜流流速相当。

4 WPWP 区域海温场变化与 ENSO 循环

为了探讨 WPWP 区域异常海温变化与 ENSO 循环之间的关系, 对它们分别对其进行小波分析, 试图给出它们的周期变化特征。结果表明, WPWP 次表层海温(80—227m)与 NINO3 指数变化周期基本一致, 所不同的是它们的变化呈反位相关关系。在 50—60 年代中期, 存在 2—3 年和 5—9 年的周期, 年代际变化特征不明显。在 60 年代中期以后, 周期发生了明显变化, 以 3—7 年的周期为主, 同时也出现了明显的 10—13 年的年代际变化周期。值得注意的是, 从 1958—2004 年间, 只有 3—6 年的周期通过了 95% 信度的检验。从年际和年代际变化来看, 它们存在锁相现象。这种现象发生在 1982/1983, 1986/1987, 1990—1995 和 1997/1998 El Niño 事件发生年(图略)。

上述分析结果表明, 在温跃层表面上的 WPWP 海温变化与 ENSO 循环过程存在密切关系, WPWP 次表层异常海温影响 ENSO 循环过程的主要途径是沿温跃层东传, 而且普遍认为认为是以 Kelvin 波的形式向东传播所致(李崇银等, 2000; 巢纪平等, 2003)。作者曾对赤道太平洋异常海温东传与赤道潜流之间的关系进行初步分析(陈锦年等, 2005), 认为赤道潜流变化对 WPWP 次表层异常海温东传有重要的作用。为进一步给出赤道潜流在 ENSO 循环过程中的作用, 选取

6 次 El Niño 事件(1972, 1976, 1982/1983, 1986/1987, 1991/1992, 1997/1998)和 6 次 La Niña 事件(1970/1971, 1973/1974, 1984/1985, 1988/1989, 1998/1999), 分别进行了合成分析。在 El Niño 发生前到结束, 赤道东太平洋潜流出现明显变化, 这种变化主要体现在, 第一阶段(El Niño 孕育期), 西太平洋暖池区域暖水堆积, 潜流最大中心位于中东太平洋, 潜流流速开始增大。第二阶段(El Niño 形成期), 西太平洋暖池区域的暖水开始东传, 赤道东太平洋潜流仍保持强势。第三阶段(El Niño 事件强盛期), 位于赤道东太平洋的潜流开始减弱。在 La Niña 事件过程中, 赤道潜流的变化与 El Niño 事件过程中存在明显差异。第一阶段(La Niña 孕育期), 西太平洋暖池区域已堆积了大量冷水, 中西太平洋的赤道潜流开始加强。第二阶段(La Niña 形成期), 赤道中西太平洋赤道潜流仍然保持较强, 且最大流速中心向赤道东太平洋扩展和移动。第三阶段(La Niña 事件强盛期), 赤道东太平洋潜流较前期更为强盛, 为下次 El Niño 事件提供条件。

由上面分析结果表明, 在 ENSO 循环过程中, 除了 Kelvin 波的东传作用外, 沿赤道的潜流变化对异常海温的东传起到重要作用。至于赤道潜流和 Kelvin 波在 ENSO 循环过程中的贡献占多大比重, 将是今后深入研究的问题。

5 讨论和结论

通过对重新界定的 WPWP 区域热状况(热含量、次表层和海表温度)时空变化特征进行分析, 探讨了它们之间的内在联系, 再次论证了 WPWP 次表层海温变化与 ENSO 循环的关系。同时, 进一步强调了赤道潜流在 WPWP 区次表层异常海温东传过程中起重要作用。

(1) 分析研究了 WPWP 不同深度的海温变化特征, 进一步证明了 WPWP 次表层异常海温东传是导致 ENSO 循环的重要原因, 而其表层海温对 ENSO 循环过程贡献较小。

(2) 由小波分析知, WPWP 的次表层海温与 NINO3 海温变化周期非常一致, 自 60 年代以来, 它们呈现明显的年际和年代际变化特征, 它们分别出现在 3—7 年和 10—13 年的两个主要频段上。

(3) 通过对赤道潜流和赤道太平洋上层海温变化的相关分析, 认为赤道潜流的增强和减弱对 ENSO 循环过程有重要贡献, 与赤道 Kelvin 波协同完成 WPWP 次表层异常海温东传, 最终导致 ENSO 循环过程。

参 考 文 献

- 张启龙, 翁学传, 程明华, 2003. 西太平洋暖池海域热含量场的变异及其影响. *海洋与湖沼*, 34(4): 389—396
- 李崇银, 穆明权, 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋次表层海温异常. *大气科学*, 23(5): 513—521
- 李崇银, 穆明权, 2000. 东亚冬季风-暖池状况-ENSO 循环的关系. *科学通报*, 45(7): 678—685
- 陈永利, 白学志, 赵永平, 2003. 山东夏季降水与西太平洋暖池地区海洋热状态及夏季风异常. *海洋科学集刊*, 45:29—38
- 陈永利, 胡敦欣, 2003. 南海夏季风爆发与西太平洋暖池地区热含量及对流异常. *海洋学报*, 25(3): 20—31
- 陈锦年, 吕心艳, 胡敦欣, 2005. 赤道太平洋潜流变化特征及其与异常海温东传. *水科学进展*, 16(6): 792—798
- 陈锦年, 何宜军, 许兰英等, 2002. 赤道太平洋次表层海温异常的信号通道. 见: 台湾大学, 中山大学, 海洋大学等编. 2002 年第 5 届海峡两岸台湾邻近海域海洋科学研讨会论文集. 基隆: 台湾海洋大学, 211
- 赵永平, 吴爱明, 陈永利等, 2002. 西太平洋暖池的跃变及其气候效应. *热带气象学报*, 18(4): 317—326
- 巢纪平, 袁绍宇, 巢清尘等, 2003. 热带西太平洋暖池次表层暖水的起源——对 1997 / 1998 年 ENSO 事件的分析. *大气科学*, 27(2): 145—151
- Wyrtki K, 1975. El Niño—The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanog*, 5: 572—584

THE VARIATION OF HEAT STATUS IN THE WEST PACIFIC WARM POOL AND ITS EASTWARD PROPAGATION

CHEN Jin-Nian^{1,2,3}, WANG Hong-Na^{1,2}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;*

2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves(KLOCAW), Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;*

3. *Institute of tropical and Oceanic Meteorology China Meteorological Administration, Guangzhou, 510080)*

Abstract Based on the reanalysis of JEDAC datasets and the assimilation of SODA, the authors studied the variation of the heat status in the West Pacific Warm pool (WPWP) and discussed the ocean temperature variety in the heat content at different depths, the inherent relations between ocean temperatures at surface and subsurface, the eastward propagation of anomalous ocean temperature and the thermocline variation, and the influence of equatorial undercurrent (EUC) on the eastward propagation. The result indicates that the variation tendency of heat storage is the same as that of subsurface ocean temperature. The correlation result has shown the variation at the subsurface ocean temperature led that of heat storage by 12 months, and lagged that of SST by 12 months. The SST variation lagged behind that of the heat storage by 5 months. These results indicate that the heat storage variation reflects mostly the variation at the subsurface ocean temperature in WPWP. It is therefore believed that the contribution of the variation of the heat storage (in subsurface ocean temperature field) in WPWP to climate change is mostly shown in the eastward propagation and then the influence on ENSO. The relation between the eastward propagation of the ocean temperature anomalies and the thermocline variation along the equator tells that the temperature variation at thermocline lags behind the eastward propagation during which the EUC plays an important role.

Key words WPWP, Heat storage, Sub-surface anomalies ocean temperature, SST, Thermocline, EUC