

Doi 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.01.004

西太平洋暖池热盐结构温度场的时空变化

秦思思¹, 张启龙^{2,3}, 尹宝树^{2,3}

1. 国家海洋环境预中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081;
2. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237

摘 要: 基于 1950–2011 年间热带太平洋月平均温盐度资料, 以 28 °C 等温线作为暖池的定义标准, 分别计算了暖池区 (20°N–15°S, 120°E–140°W) 各网格点混合层、障碍层和深层的平均温度, 从而构成了暖池热盐结构的温度场。据此, 运用 EOF 分析法研究了暖池混合层、障碍层和深层温度距平场的时空变化特征, 并探讨了纬向风、纬向流和海面净热通量等要素对这 3 层温度场主要模态的影响。结果表明, 第一模态揭示了暖池中东部 3 层温度都具有显著的年际变化和长期变化趋势, 并在 1985 年前后经历了一次气候跃变, 而第二模态则基本反映了暖池西部 3 层温度皆存在着明显的年际变化和长期变化趋势, 并在 1995 年前后经历了一次气候跃变。暖池混合层 (包括障碍层) 温度场前两个模态的年际振荡主要是由纬向风和南赤道流 (SEC) 共同引起的, 而暖池深层温度场前两个模态的年际振荡则是由 SEC 和赤道潜流 (EUC) 共同调制的。

关键词: 西太平洋暖池; 热盐结构; 时空变化; ENSO

中图分类号: P731.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932 (2017) 01-0027-10

Spatial and temporal variability in temperature fields of the western Pacific warm pool thermohaline structure

QIN Si-si¹, ZHANG Qi-long^{2,3}, YIN Bao-shu^{2,3}

1. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
3. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract : Based on the monthly temperature and salinity data during 1950–2011, the averaged temperature fields in mixed layer (ML), barrier layer (BL) and deep layer (DL) of the western Pacific warm pool (WPWP) area (20 °N–15 °S, 120°E–140 °W) are calculated using 28 °C isotherm as the boundary of the WPWP. The spatial and temporal variability of temperature anomaly fields in the ML, BL and DL is analyzed using an empirical orthogonal function (EOF) analysis method, respectively. In addition, the influences of the zonal wind stress, zonal currents and sea surface heat fluxes in the WPWP on the first two modes of these anomaly fields are also examined, respectively. The analysis results show that the first mode suggests that the temperature fields at three layers in the WPWP all have strong interannual variability and long-term trend and undertake a regime shift before and after 1985, while the second mode indicates that the temperature fields at three layers in the western WPWP all have strong interannual variability and long-term trend and undertake a regime shift before and after 1995. The further analysis also indicates that the interannual variability in the first two modes of ML (including BL) temperature anomaly field is primarily controlled by zonal winds and South Equatorial Current (SEC), while the interannual variability in the first two modes of DL temperature anomaly field is mainly affected by SEC and Equatorial Undercurrent.

Keywords : western Pacific warm pool; thermohaline structure; spatial and temporal variability; ENSO

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-02-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2012CB41740)。

作者简介: 秦思思 (1990), 女, 博士研究生, 主要从事大洋环流与海气相互作用研究, 电子邮箱: qinsi.happyfamily@163.com。

通讯作者: 张启龙 (1954-), 男, 研究员。电子邮箱: qlzhang@qdio.ac.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

西太平洋暖池 (简称暖池。下同) 是全球大洋中最大的暖水团 ($SST \geq 28^\circ\text{C}$) 和淡水池 ($SSS \leq 3\text{‰}$)，也是一个对流强、风小、降水丰富的海域。丰富的降水使得暖池海域的盐跃层浅于温跃层，因而形成了障碍层，而障碍层的存在使得暖池具有独特的热盐结构。就其温、盐度的垂向分布特征而言，如果以 28°C 等温线作为暖池的定义标准，那么暖池大致呈现为 3 层结构，即混合层、障碍层和深层 (Qin et al, 2013)。其中，混合层 (即密度均匀层) 是海洋与大气相互作用的边界层，在海洋与大气之间的动量、能量和物质交换过程中起着至关重要的作用 (Boyer et al, 2013)；障碍层系指混合层与同温层间具有明显的盐度梯度的水层 (Lukas et al, 1991)，它能够阻碍太阳辐射通量的下传和下层冷水的上翻，并将风应力的作用限制在较薄的混合层内；暖池深层则为暖池障碍层与暖池底部间的水层，它的变化将直接影响到暖池障碍层的厚度及其热盐状况。已有研究表明，障碍层不仅有助于暖池的海表水温升高，而且还有利于暖池表层暖水的快速纬向运动 (Maes et al, 1997；Vialard et al, 1998)，而暖池暖水的这种快速纬向运动在 ENSO 的形成与发展过程中起着极为重要的作用 (Fu et al, 1986；Picaut et al, 1996；Maes et al, 2002；Maes et al, 2001；张启龙等, 2004, 2008)。因此，关于暖池障碍层的变化特征和形成机制已引起了人们的重视与关注，并对其进行了较深入的研究 (Maes et al, 2002, 2005；Vialard et al, 1998a；Liu et al, 2009；姜良红等, 2012)。最近，秦思思等 (2013) 分析了暖池热盐结构的基本特征和季节变化，并对暖池热盐结构厚度场和盐度场的时空变化与机制进行了较为系统的研究。研究发现，暖池混合层、障碍层和深层的厚度和温盐度都存在着明显的季节变化，而且 3 层的厚度场和盐度场皆有年际尺度的时空振荡 (秦思思等, 2013)。其中，厚度场的年际振荡主要是由赤道海域的纬向风、南赤道流、海面净热通量和降水共同引起的，而盐度场的年际振荡则是由纬向风、南赤道流和降水共同导致的 (秦思思等, 2013)。但应指出的是，有关暖池温度场的研究却相对较少，而且主要集中在表层。张启龙等 (2001) 基于 1950–1998 年间的月平均海表温度 (SST) 资料研究了暖池海域 SST 场的时空变化并指出，暖池海

域 SST 场存在着年 (主周期为 1 a)、年际 (主周期为准两年和 4.5 a) 和年代际变化 (主周期为 10 a) 3 个主要模态，而且暖池 SST 场的年际变化具有明显的区域性，全域大致以 160°E 为界分为东、西两部分，其中东、西部的 SST 在变幅、相位和周期方面皆存在着明显的差异 (张启龙等, 2001；Zhang et al, 2001)。

综上所述可知，虽然对暖池海表温度场的时空变化已有一些研究，但有关暖池混合层、障碍层和深层温度场的时空特征却鲜有研究，迄今尚未见到相关报道。因此，开展暖池热盐结构温度场的时空变化和机制研究，无论对加深了解暖池的结构特征和变异机制，从而提高暖池的模拟水平，还是对促进 ENSO 的预报研究都具有重要的科学意义和实践意义。为此，本文利用 1950–2011 年间的月平均温度资料，研究了暖池混合层、障碍层和深层温度场的时空变化特征及其与 ENSO 的联系，并探讨了纬向风应力、海流和海面热通量对各层温度场年际变化的影响，以期全面认识暖池的结构特征与变异机理提供重要的参考依据。

1 资料和分析方法

1.1 资料说明

全球海洋月平均温盐度资料取自于日本气象厅 1950–2011 年间的客观分析资料集 (Ishii et al, 2003, 2008)。该资料的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (经度 $\times$ 纬度)，垂向上共有 24 层 (0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400 和 1 500 m)。本文使用了 1950–2011 年间暖池区 (20°N – 15°S , 120°E – 140°W) 的温盐度资料。为了得到暖池热盐结构的温度场，将该区 0–200 m 间的温盐度值线性内插为垂向间隔为 1 m 的温盐度数据。

月平均海面风应力和纬向流速资料选用了美国马里兰大学提供的 2.1.6 版本 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 数据。该资料的覆盖范围为 0° – 360°E 、 60°S – 60°N ，水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (经度 $\times$ 纬度)，垂向共 40 层，时间序列为 1958 年 1 月–2008 年 12 月 (Carton et al, 2008)。由于暖池混合层、障碍层和深层的最大深度分别为 30 m、

90 m 和 120 m (Qin et al, 2015), 因此本文仅选用了 5 m、50 m 和 100 m 层的纬向流速数据。

月平均净热通量数据来源于伍兹霍尔海洋研究所 (WHO) OAF flux (Objectively Analyzed air-sea Flux) Project (Yu et al, 2008), 该资料的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (经度 $\times$ 纬度), 时间序列为 1984–2009 年。

ENSO 指数来自于美国国家海洋大气局 (<http://www.esrl.noaa.gov/data/climateindices/lis>)。其中, Niño3 和 Niño4 指数分别是 Niño3 (5°S – 5°N , 150°W – 90°W) 和 Niño4 (5°S – 5°N , 160°E – 150°W) 区 SST 异常平均值, 时间序列为 1950 年 1 月–2011 年 12 月。由于 Niño3 和 Niño4 指数可以分别有效地检测东部型 (El) 和中部型 (C) ENSO (El Niño–South Oscillation) 事件 (曹璐等, 2013; 袁媛等, 2012), 因此本文使用这两个指数来讨论温度场与不同类型 ENSO 间的关系。

1.2 分析方法

Qin 等 (2015) 在计算暖池同温层和混合层深度时使用了阈值法, 并对不同的温度阈值 ($\Delta T = -0.2^\circ\text{C}$ 、 -0.4°C 、 -0.5°C 和 -0.8°C) 进行了对比分析。他们认为, 利用月平均温盐资料计算暖池混合层和障碍层厚度时, 选用 $\Delta T = -0.4^\circ\text{C}$ 较为合适。于是, 本文利用该方法计算了 1950–2011 年间暖池区 (20°N – 15°S , 120°E – 140°W) 各网格点的混合层、障碍层和深层的平均温度, 从而得到了 3 层的温度场。

本文采用经验正交函数 (EOF) 分解法分析各温度场的时空变化, 利用功率谱分析法估计各温度场主要模态的变化周期, 并运用相关分析法探讨各温度场主要模态的变异机理。

2 暖池混合层、障碍层和深层温度场的时空特征

为了研究暖池热盐结构温度场年际尺度的时空变化, 本文首先对暖池混合层、障碍层和深层温度距平场进行了 13 个月滑动平均的 butter 滤波处理, 然后分别对这 3 层温度距平场进行了 EOF 分解。结果表明, 3 层温度距平场前两个模态的方差贡献皆较大 (两模态的方差贡献在 62%~67% 之间), 是各温度场的两个主要模态。因此, 本文着重分析前两个模态的时空特征。

2.1 混合层温度场的时空特征

暖池混合层温度场第一模态的方差贡献为 39.5%, 它揭示了 150°E 以东海域是暖池混合层温度场变异的关键区, 其高值中心 (>0.0) 位于 4.5°S 、 179.5°E 附近 (图 1a)。该模态除了有 2~4 a 的年际变化外, 还存在着显著的线性递增趋势, 特别在 1980 年代中期以后这种现象尤为明显 (图 1b), 这与暖池的增暖趋势相一致 (Cravatte et al, 2009)。滑动平均的 t 检验结果表明, 在 1985 年的 t 统计值 (7.42) 远超过了 0.001 的信度 (3.92) 检验。这意味着该模态在 1985 年前后经历了一次气候跃变。实际上, 暖池强度在 1976–1986 年前后就表现出了年代际突变特征, 即由 1976 年前的冷暖池转变为 1986 年后的热暖池 (邱东晓等, 2007)。而暖池的年代际突变可能与太平洋 10 a 涛动 (PDO) 现象有关, 因为 PDO 在 1947–1976 年间处于冷位相, 而在 1977 年至 20 世纪 90 年代中期则为暖位相。当 PDO 以暖位相形式出现时, 北美大陆附近海面的水温将异常升高, 而北太平洋的水温却异常降低 (Mantua et al, 2002)。与此同时, 太平洋高空气流由美洲和亚洲两大洲向太平洋中部移动。当 PDO 以冷位相形式出现时, 情况刚好相反。显然, PDO 的暖 (冷) 位相有利于暖池的增暖 (变冷)。因此, 在跃变前, 暖池中东部的温度处于偏低期, 而在跃变后则变为偏高期。由于在跃变前、后, 时间系数滞后 Niño4 指数 1 个月时两者间的关系最密切, 其时的相关系数分别为 0.88 和 0.90 (超过了 99% 的显著性检验), 因此可以认为, 暖池混合层温度的年际变化与中部型 ENSO 有密切的联系。也就是说, 在 El Niño (La Niña) 事件发生 1 个月后, 暖池中东部的混合层温度将显著升高 (降低)。

暖池混合层温度场第二模态的方差贡献为 27.0%, 其空间分布 (图 2a) 与第一模态 (图 1a) 有所不同, 全域大致可以位于 175°E 附近的零等值线为界分为东、西两部分。其中, 当时间系数为正时, 西部为负异常, 高值中心 (<-0.0) 位于赤道的 145°E 附近, 而东部则为正异常, 高值中心 (>0.0) 见于 7°S 、 165°W 附近。由于西部的变幅明显大于东部, 因此可以认为, 暖池西部是混合层温度场变异的关键区。该模态除了有 4~6a 的年际变化外, 还存在着明显的线性递减趋势, 特别在 1990 年代中

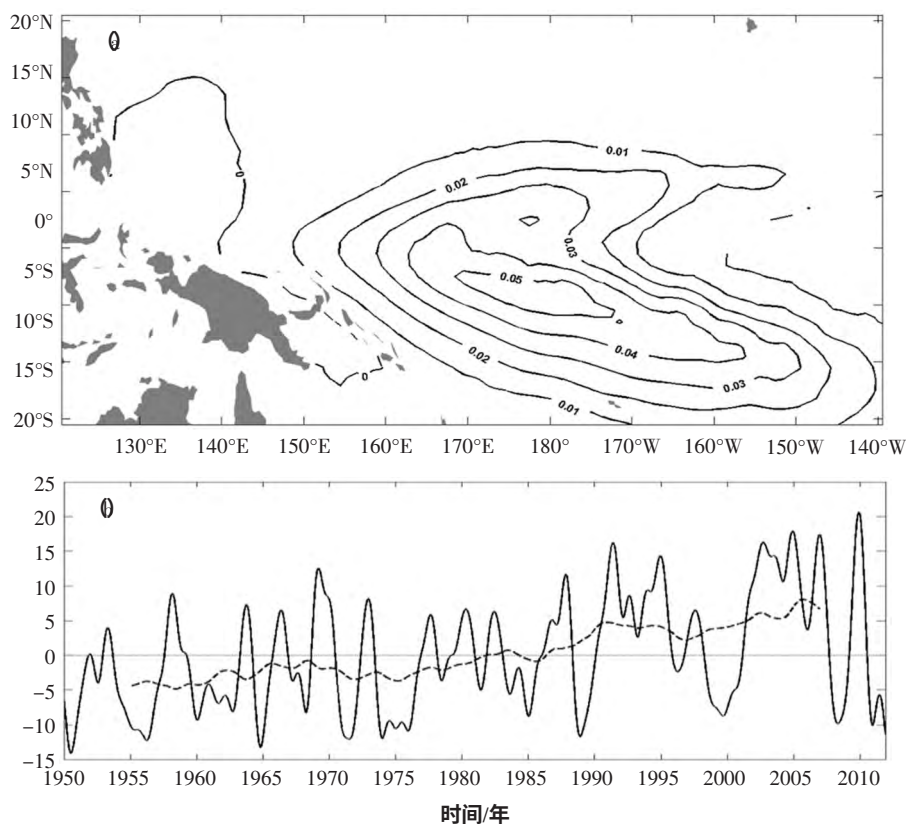


图1 暖池混合层温度场第一模态 (a) 及其时间系数 (b) 实线和虚线分别为时间系数的年际和年代际变化

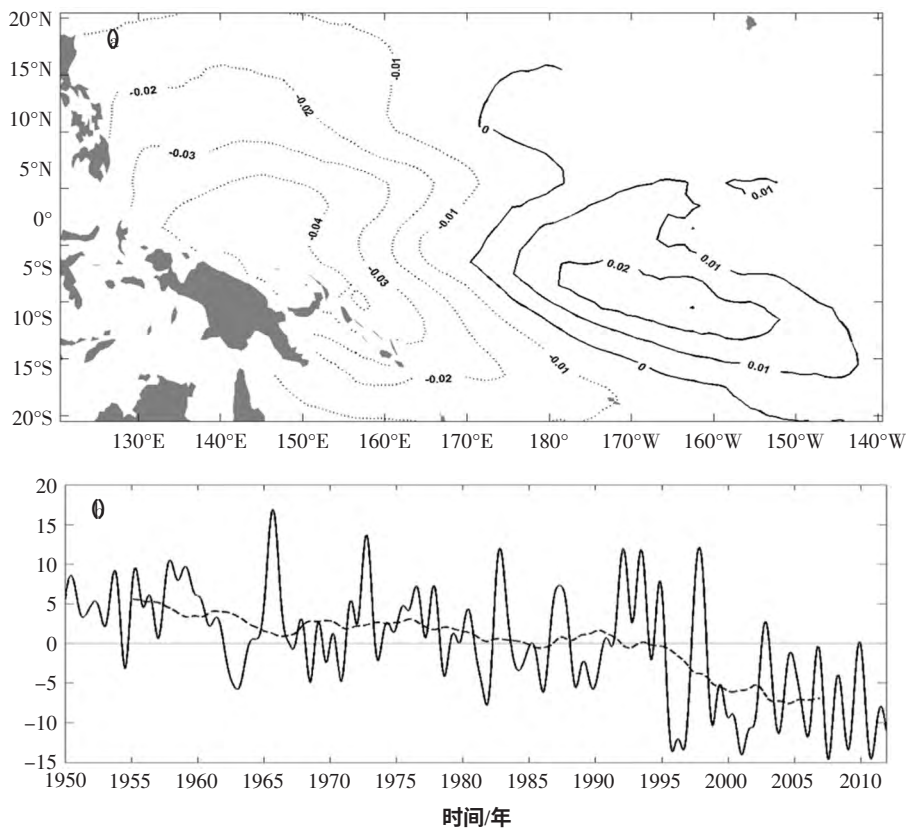


图2 暖池混合层温度场第二模态 (a) 及其时间系数 (b) 实线和虚线分别为时间系数的年际和年代际变化

期以后这种现象尤为明显 (图 2b)。由于在 1995 年时间系数的 t 统计值 (-10.064) 远超过了 0.001 的信度 (3.922) 检验, 因此可以认为, 该模态在 1995 年前后经历了一次气候跃变, 较第一模态落后了约 10 a, 这可能与 PDO 在 20 世纪 90 年代中期后转为冷位相有关。在跃变前, 暖池东 (西) 部的温度处于偏高 (低) 期, 而在跃变后则变为偏低 (高) 期。时滞相关分析表明, 在跃变后时间系数与 Niño3 指数间的关系 (其同期相关系数为 0.80) 较跃变前更密切 (其同期相关系数为 0.51, 超过了 99 % 的显著性检验)。这意味着, 暖池西部混合层温度的年际变化主要与东部型 ENSO 相联系, 特别在跃变之后两者间的联系更密切。在 El Niño (La Niña) 事件发生时, 暖池西部的混合层温度将显著降低 (升高)。

2.2 障碍层温度场的时空特征

暖池障碍层温度场第一模态的方差贡献为 38.6 %。与混合层温度场第一模态的空间分布类似, 障碍层温度场第一模态的空间分布也揭示了 150°E 以东海域是暖池障碍层温度场变异的关键区, 其核心区 (>0.00) 位于 5°S、175°E 附近 (图略)。而且, 该模态也存在着与混合层温度场第一模态相同的年际变化、线性递增趋势和气候跃变时间。时滞相关分析结果也显示, 在跃变前、后, 时间系数在滞后 Niño4 指数 1 个月时两者间的关系最密切, 其时的相关系数分别为 0.87 和 0.88, 都超过了 99 % 的显著性检验。由此可见, 暖池中东部障碍层温度的年际变化也与中部型 ENSO 相联系。在 El Niño (La Niña) 事件发生 1 个月后, 暖池中东部的障碍层温度将显著升高 (降低)。

暖池障碍层温度场第二模态的方差贡献为 27.7 %, 其空间分布与混合层温度场第二模态非常相似 (图略)。而且, 该模态也存在着与混合层温度场第二模态相同的年际变化、线性递减趋势和气候跃变时间 (图略)。从时滞相关分析结果可知, 在跃变前、后时间系数与 Niño3 指数间的同期关系最密切, 其时的相关系数分别为 0.51 和 0.85, 都超过了 99 % 的显著性检验。这表明, 暖池西部障碍层温度的年际变化也与东部型 ENSO 相联系, 特别在跃变后两者间的联系更密切。在 El Niño (La Niña) 事件发生时, 暖池西部的障碍层温度将显著降低 (升高)。

2.3 暖池深层温度场的时空特征

暖池深层温度场第一模态的方差贡献为 38.2 %。与暖池混合层温度场第一模态的空间分布略有不同, 暖池深层温度场的第一模态呈现为全域同位相变化特征, 其高值中心 (>0.00) 位于 4.5°S、166.5°E 处 (图 3), 较混合层温度变异中心西移了约 13 个经度。而且, 该模态的时间系数具有 2~6 a 的年际变化和线性递增趋势 (图 3), 并在 1985 年前后经历了一次气候跃变。这也与 PDO 现象有关。从时滞相关分析结果可以看到, 在跃变前 (后), 时间系数在滞后 Niño4 指数 3 (0) 个月时两者间的关系最密切, 其时的相关系数为 0.60 (0.53), 超过了 99 % 的显著性检验。这表明, 暖池深层温度的年际变化也与中部型 ENSO 有较密切的联系。在 El Niño (La Niña) 事件发生 2~3 个月, 暖池深层温度将明显升高 (降低)。

暖池深层温度场第二模态的方差贡献为 24.5 %, 其空间分布 (图 4) 与混合层温度场第二模态 (图 2) 类似, 也揭示了暖池东、西部深层温度呈反位相的变化特征。其中, 西部的高值中心 (<-0.00) 位于 4°N、142°E 附近, 而东部的高值中心 (<0.00) 则见于 5°S、175°W 附近。显然, 这两个区域皆应是暖池深层温度变异的关键区。而且, 该模态存在着 2~4 a 的年际变化和线性递减趋势 (图 4), 并在 1995 年前后经历了一次气候跃变, 这也与 PDO 现象有关。在跃变前, 暖池东 (西) 部的深层温度基本处于偏高 (低) 期, 而在跃变后则变为偏低 (高) 期。时滞相关分析表明, 在跃变前 (后), 时间系数在滞后 Niño3 (Niño4) 指数 2 (0) 个月时两者间的关系最密切, 其时的相关系数为 0.57 (0.83), 超过了 99 % 的显著性检验。这意味着, 该模态在不同时期与不同类型的 ENSO 相联系, 特别在跃变后其与中部型 ENSO 的联系更密切, 这主要与暖池东部深层温度在跃变前后与 ENSO 间的关系不同有关。由相关分析结果可知, 暖池东部深层温度在跃变前后分别与东部型 ($R=0.60$) 和中部型 ENSO ($R=0.83$) 的关系较密切, 而暖池西部在跃变前后皆与东部型 ENSO 相联系。在 El Niño (La Niña) 事件期间, 暖池东部的深层温度将显著升高 (降低), 而西部的深层温度则将显著降低 (升高)。

为了进一步了解暖池热盐结构温度场主要模态

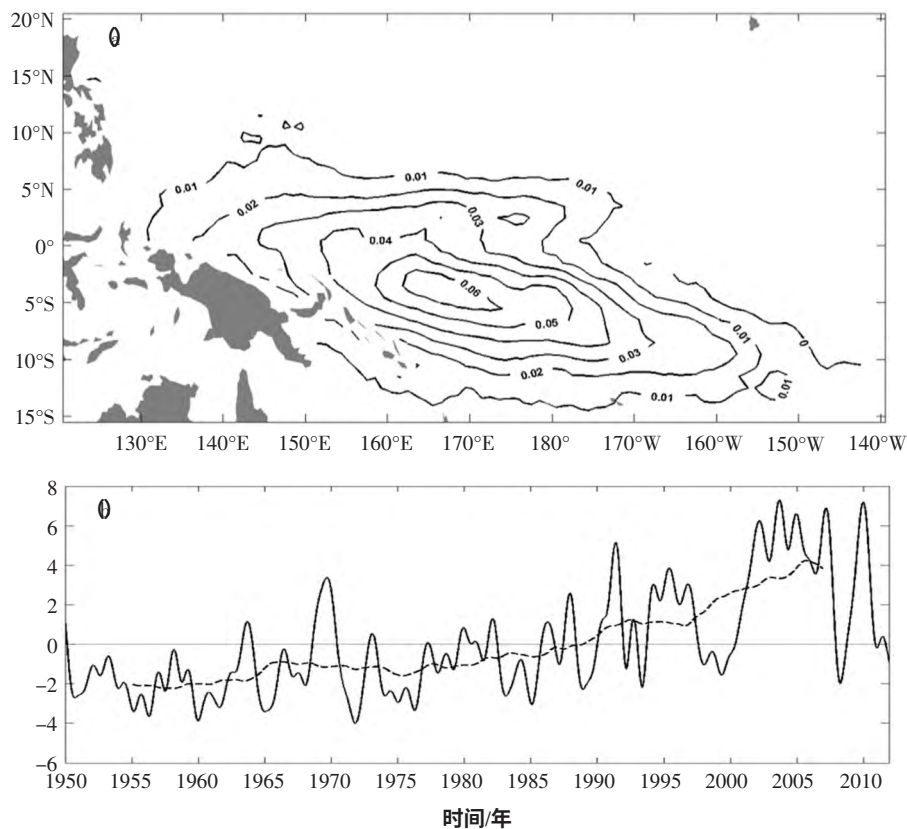


图3 暖池深层温度场第一模态 ① 及其时间系数 ② 实线和虚线分别为时间系数的年际和年代际变化

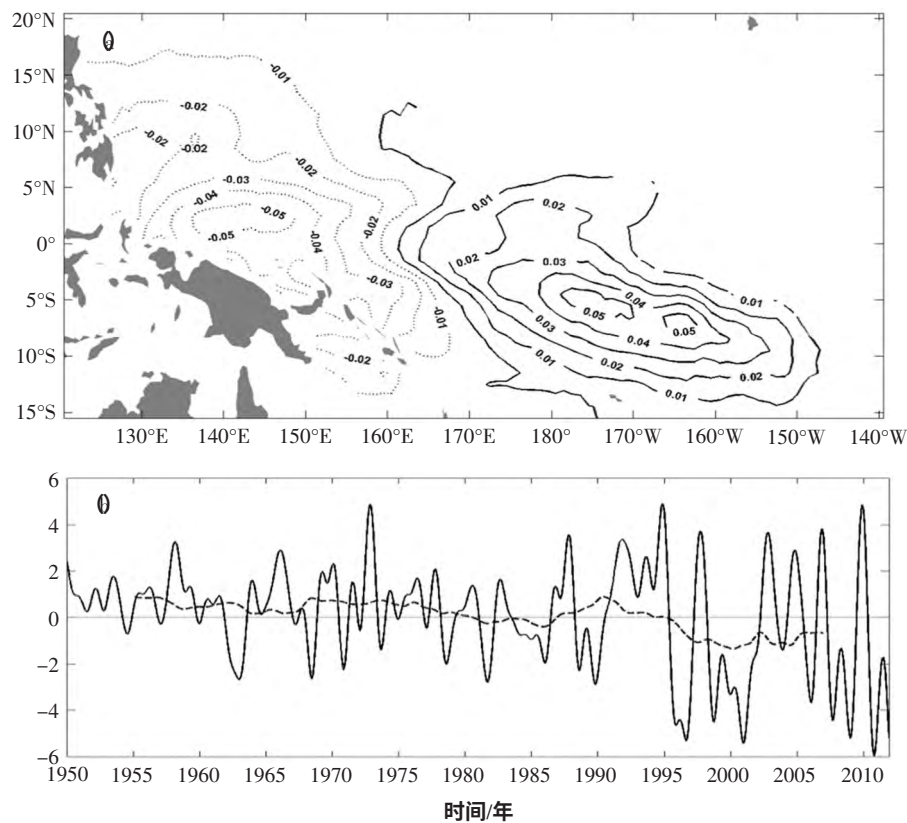


图4 深层温度场第二模态 ① 及其时间系数 ② 实线和虚线分别为时间系数的年际和年代际变化

之间的相互关系, 对各层温度场主要模态进行了时滞相关分析。结果表明, 暖池混合层与障碍层温度场第一模态时间系数间的关系非常密切, 其同期相关系数高达 0.996, 而暖池障碍层与深层温度场第一模态间的关系也较密切, 其同期相关系数为 0.84; 暖池混合层和障碍层温度场第二模态间的关系也非常密切, 其同期相关系数高达 0.996, 而暖池障碍层与深层温度场第二模态间的关系也较密切, 其同期相关系数为 0.83。

3 暖池热盐结构温度场第一模态的年际变异机理

从前面的分析可知, 暖池混合层和障碍层温度场第一模态皆存在着非常一致的年际振荡和长期变化趋势, 并在 1985 年前后经历了一次气候跃变。这说明, 它们的年际变异机理应该是相同的。可是, 暖池深层温度场第一模态的空间结构却与混合层温度场有所不同, 这意味着其变异机理可能有别于混合层温度。因此, 本节分别探讨暖池混合层和深层温度场第一模态的年际变异机理。

3.1 混合层温度场第一模态的年际变异机理

由于暖池区的垂向运动较弱, 而且暖池三维结构的年际变化主要是由热带太平洋的纬向风异常、赤道 Kelvin 波和 Rossby 波引起的纬向流异常与 Ekman 输送共同导致的 (秦思思 等, 2013), 因此本文重点分析纬向风、纬向流和海面净热通量对混合层温度变化的影响。分别对暖池混合层温度场第一模态时间系数在 1985 年前后与暖池区的海面纬

向风应力、5 m 层纬向流和海面净热通量进行了超前和滞后相关分析。结果表明, 当时间系数滞后纬向风 1-2 个月、纬向流 2 个月和净热通量 0 个月时, 它们间的关系最密切 (图 5)。但应指出的是, 由于 1985 年前的海面净热通量资料较少, 本文仅探讨了 1986 年以后热通量与时间系数间的相关情况。如图 5 所示, 在跃变后, 纬向风与时间系数间的高相关区 ($R \geq 0.6$) 位于暖池中部的赤道区 ($7.5^{\circ}\text{N}-5^{\circ}\text{S}$, $140^{\circ}\text{E}-170^{\circ}\text{W}$) (图 5a), 纬向流与时间系数间的高相关区 ($R \geq 0.4$) 主要位于赤道附近的南赤道流 (SEQ) 区 (图 5b), 而时间系数与净热通量间的高相关区 ($R \leq -0.6$) 则位于赤道中东部海域 (图 5c), 这些相关系数皆超过了 99% 的显著性检验。需要说明的是, 在跃变后纬向风与时间系数间的高相关区较跃变前西移了约 15 个经度。由于净热通量与时间系数间的关系是同期的, 因此可以认为, 暖池混合层温度场第一模态的年际变化主要是由纬向风和 SEC 共同引起的。具体讲来, 当暖池上空盛行东 (西) 风时, 这对应于中部型 La Niña (El Niño) 事件, SEC 随之增强 (减弱甚至转向东流), 迫使大量的暖水由东 (西) 向西 (东) 流, 因而使得暖池东部的暖水减少 (增多), 于是暖池中东部的混合层温度随之降低 (升高)。

3.2 深层温度场第一模态的年际变异机理

由于障碍层阻碍了太阳辐射通量的下传, 并将风应力的作用限制在混合层内, 因此这里重点探讨纬向流对暖池深层温度场年际变化的影响。分别对暖池深层温度场第一模态时间系数在跃变前后与暖

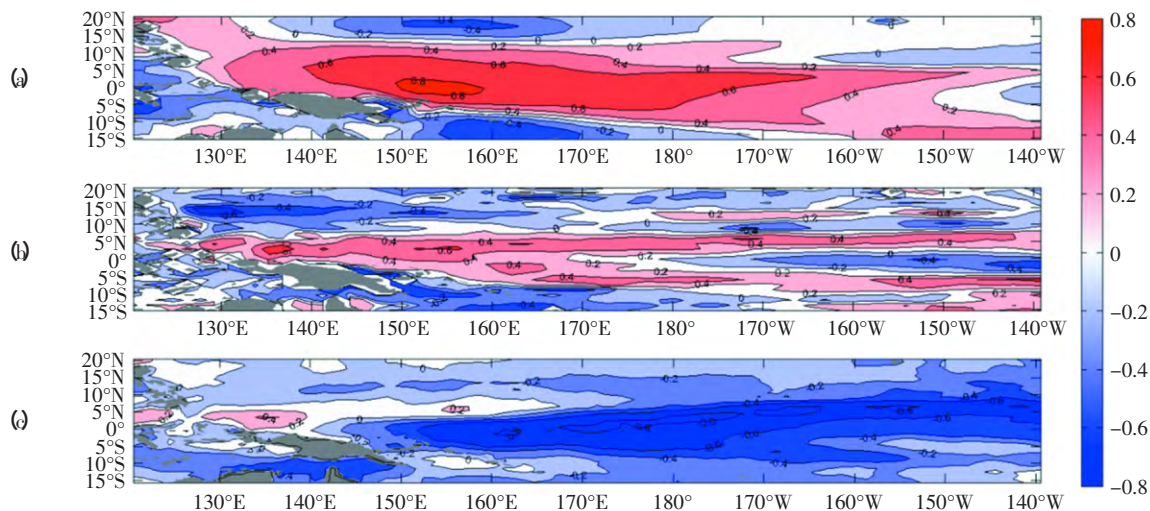


图 5 跃变后混合层温度场第一模态时间系数与纬向风 (a)、纬向流 (b) 和海面净热通量 (c) 间的相关场

池区 100 m 层纬向流进行了超前和滞后相关分析。结果表明,在跃变前后时间系数在滞后纬向流 1 个月时两者间的关系最密切(图 6)。其中,在跃变前纬向流与时间系数间的高相关区($R \geq 0.4$)主要位于 SEC 区(图 6a),而在跃变后高相关区分别出现在 SEC 区($R \geq 0.4$)和赤道潜流(EUC)区($R \leq -0.4$)(图 6b),这些相关系数皆超过了 99% 的显著性检验。因此可以认为,暖池深层温度场

第一模态的年际振荡主要是由 SEC 和 EUC 共同引起的,特别在跃变后 EUC 的作用明显增大。具体讲来,当西向的 SEC 增强(减弱甚至转向东流)时,东向的 EUC 增强(减弱甚至消失),这对应于中部型 La Niña (El Niño) 事件(Johnson et al, 2002),因而从赤道两侧进入暖池的低温水增多(减少),而从赤道东流的暖水也增多(减少),于是暖池的暖水减少(增多),因而深层温度将降低

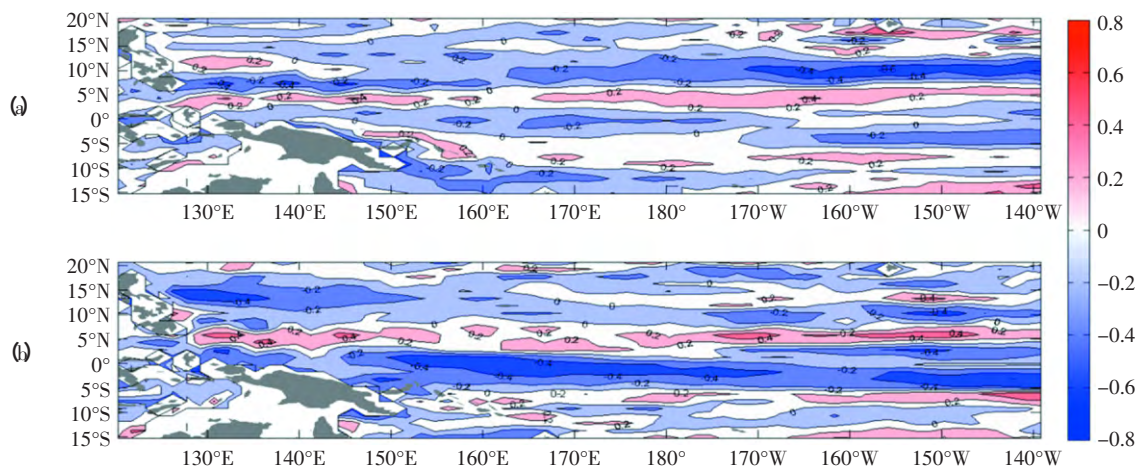


图 6 跃变前 (a)、后 (b) 深层温度场第一模态时间系数与 100 m 层纬向流间的相关场

升高。

4 暖池热盐结构温度场第二模态的年际变异机理

由于暖池混合层和障碍层温度场的第二模态存在着非常一致的年际振荡,并在 1995 年前后发生了一次气候跃变,因此可以认为,它们的年际变异机理应是相同的。但是,暖池深层温度场第二模态的空间结构却与混合层温度场第二模态略有不同,这意味着它们的变异机理可能也并不完全一致。因此,本文重点探讨暖池混合层和深层温度场第二模态的变异机理。

4.1 混合层温度场第二模态的年际变异机理

同样,分别对该模态时间系数在跃变前后与暖池区纬向风、5 m 层纬向流和海面净热通量进行了超前和滞后相关分析。结果表明,在跃变前(图 7),当时数系数滞后纬向风 1 个月、纬向流 1 个月和净热通量 0 个月时,它们间的关系最密切(图 7)。因篇幅所限,图 7 中未给出跃变前的相关场。纬向风与时间系数间的高相关区($R \geq$

0.6) 皆位于暖池中东部的赤道海域(图 7a),纬向流与时间系数间的高相关区($R \geq 0.6$)主要位于赤道附近的 SEC 区(图 7b),而净热通量与时间系数间的高相关区($R \leq -0.6$)则位于 165°E 以东的赤道海域(图 7c)。这些相关系数皆超过了 99% 的显著性检验。值得注意的是,在跃变后纬向风与时间系数间的关系更密切($R \geq 0.8$),而且高相关区向西扩展至暖池的西北部。由于净热通量与时间系数间的关系是同期的,因此可以认为,暖池混合层温度场第二模态的年际变化也是由纬向风和 SEC 共同引起的,特别在跃变后纬向风的作用明显增大。具体讲来,当暖池上空盛行东(西)风时,这对应于东部型 La Niña (El Niño) 事件,SEC 随之增强(减弱甚至转为东向流),于是有更多(少)的暖水由东(西)向西(东)输送,使得暖池西部的暖水增多(减少),于是混合层温度随之升高(降低)。

4.2 深层温度场第二模态的年际变异机理

由暖池深层温度场第二模态时间系数与 100 m 层纬向流的时滞相关分析结果可知,在跃变前(图 8)时间系数在滞后纬向流 1 个月时两者间的

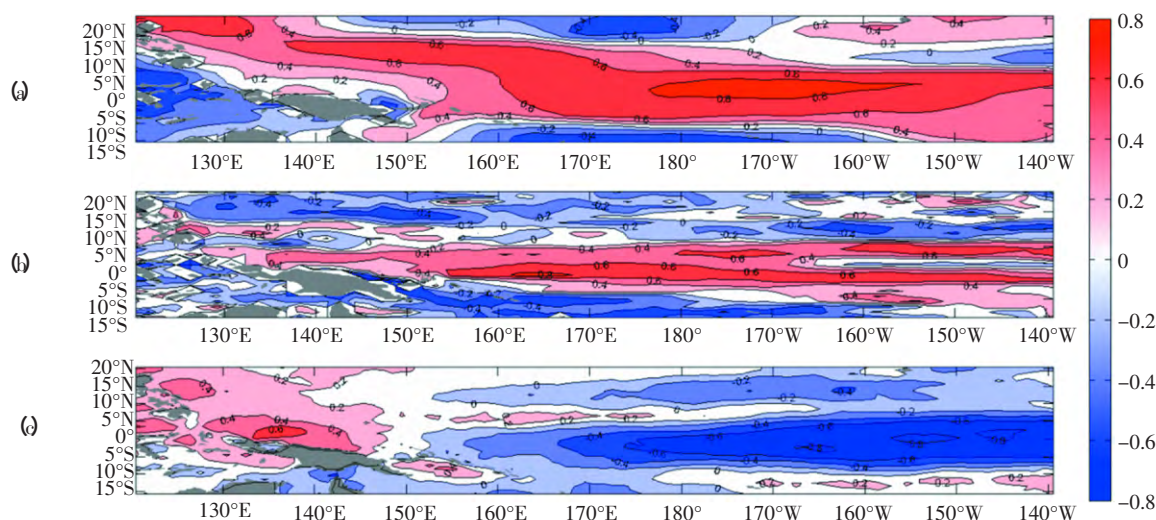


图 7 跃变后混合层温度场第二模态时间系数与纬向风 (a)、纬向流 (b) 和净热通量 (c) 间的相关场

关系最密切 (图 8)。其中, 在跃变前, 纬向流与时间系数间的高相关区 ($R \geq 0.4$) 主要位于 SEC 区 (图 8a), 而在跃变后, 除了正的高相关区仍然出现在 SEC 区外, 在赤道中东部的 EUC 区还出现了一负高相关区 ($R \leq -0.4$) (图 8b)。这些相关系数皆超过了 99% 的显著性检验。由此可以认为, 暖池深层温度场第二模态的年际振荡主要是由 SEC

和 EUC 共同引起的, 特别在跃变后 EUC 的作用明显增大。当 SEC 增强 (减弱甚至转向东流) 时, 这对应于中部或东部型 La Niña (El Niño) 事件, 有更多的暖水在暖池西部辐合 (辐散), 而当 EUC 增强 (减弱) 时, 则有更多 (少) 的暖水东流, 这有助于暖池西部的暖水增多 (减少)、东部的暖水减少 (增多), 于是暖池西部的深层温度将升高

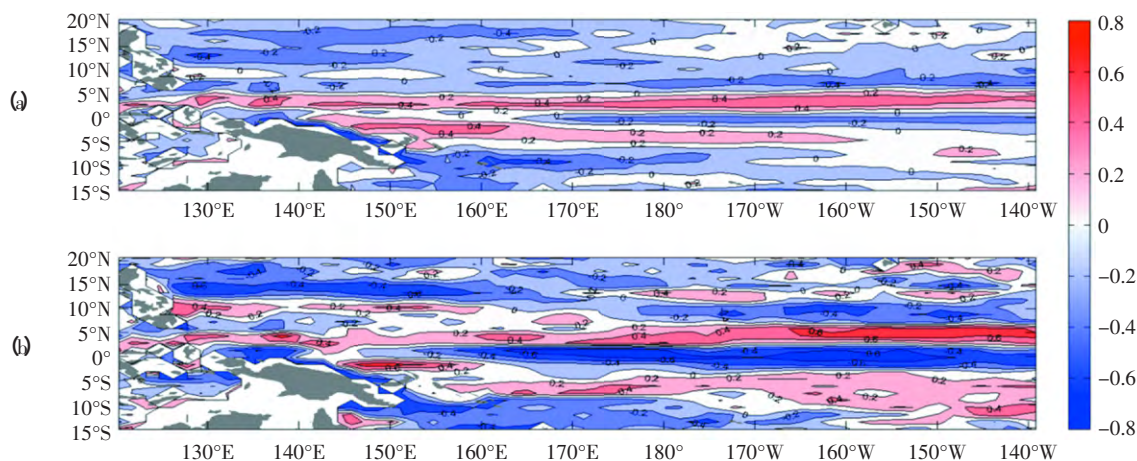


图 8 跃变前 (a)、后 (b) 暖池深层温度场第二模态时间系数与纬向流间的相关场

降低, 而东部的深层温度则降低 (升高)。

5 结论

1) 暖池混合层和障碍层温度场第一模态皆有 2~4 a 的年际变化和线性递增趋势, 并在 1985 年前后经历了一次气候跃变, 在跃变前暖池中东部的温度处于偏低期, 而在跃变后则变为偏高期, 而且该

模态还与中部型 ENSO 有较密切的联系。暖池混合层和障碍层温度场第二模态都有 4~6 a 的年际变化和线性递减趋势, 并在 1995 年前后经历了一次气候跃变, 在跃变前暖池西部的温度处于偏低期, 而在跃变后则变为偏高期, 但该模态与东部型 ENSO 相联系。

2) 暖池深层温度场第一模态揭示了全域具有同位相变异特征, 其年际变化、长期变化趋势和气

候跃变时间皆与混合层温度场第一模态相同,也与中部型 ENSO 相联系。暖池深层温度场第二模态表明了全域具有纬向的反位相变异特征,它具有 2–4 a 的年际变化和线性递减趋势,并在 1995 年前后经历了一次气候跃变,在跃变前暖池东(西)部的温度处于偏高(低)期,而在跃变后则变为偏低(高)期,但在跃变前(后)该模态与东(中)部型 ENSO 相联系。

3) 暖池混合层(包括障碍层)温度场第一、二模态的年际变化皆是由纬向风和 SEC 共同引起的,而暖池深层温度场第一、二模态的年际变化则是由 SEC 和 EUC 共同导致的,在跃变后 EUC 的作用明显增大。

参 考 文 献

- Carton J A, Giese B S, 2008. A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136: 2 999–3 017.
- Cravatte S, Delcroix T, Zhang D, et al, 2009. Observed freshening and warming of the western Pacific Warm Pool. *ClimDyn*, 33: 565–589.
- de Boyer M C, Madec G, Fischer A S, et al, 2004. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile based climatology. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 109: C12003.
- Fu C, H F Diaz, J O Fletcher, 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 114: 1 716–1 738.
- Ishii M, Kimoto M, Sakamoto K, et al, 2006. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *Journal of Oceanography*, 62: 155–170.
- Ishii M, Kimoto M, Kachim M, 2003. Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Monthly Weather Review*, 131: 51–73.
- Johnson G C, Sloyan B M, Kessler W S, et al, 2002. Direct measurements of upper ocean currents and water properties across the tropical Pacific during the 1990s. *Progress in Oceanography*, 52: 31–61.
- Liu H L, Grodsky S A, Carton J A, 2009. Observed Subseasonal Variability of Oceanic Barrier and Compensated Layers. *Journal of Climate*, 22: 6 104–6 119.
- Lukas R, Lindstrom E, 1991. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 96: 3 343–3 357.
- Maes C, Belamari S, 2011. On the impact of salinity barrier layer on the Pacific Ocean mean state and ENSO. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 7: 91–100.
- Maes C, Delecluse P, Madec G, 1997. Impact of westerly wind bursts on

the warm pool of the TOGA–COARE domain in an OGCM. *Climate Dynamics*, 14: 55–70.

- Maes C, Picaut J, Belamari S, 2002. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model. *Geophysical Research Letters*, 29 (24): 59–1–59–4.
- Maes C, Picaut J, Belamari S, 2005. Importance of salinity barrier layer for the buildup of El Niño. *Journal of Climate*, 18: 104–118.
- Mantua N, Hare S R, 2002. The Pacific decadal oscillation. *J Oceanogr*, 58: 35–44.
- Picaut J, Ioualalen M, Menkes C, et al, 1996. Mechanism of the zonal displacements of the Pacific Warm Pool, implications for ENSO. *Science*, 274: 1 486–1 489.
- Qin S S, Zhang Q L, Yin B S, 2015. Seasonal variability in thermohaline structure of the Western Pacific Warm Pool. *Acta Oceanologica Sinica*, 34 (7): 44–53.
- Vialard J, Delecluse P, 1998a. An OGCM study for the TOGA decade. Part I: Role of salinity in the physics of the western Pacific fresh pool. *Journal of Physical Oceanography*, 28: 1 071–1 088.
- Vialard J, Delecluse P, 1998b. An OGCM study for the TOGA decade. Part II: Barrier layer formation and variability. *Journal of Physical Oceanography*, 28: 1 089–1 106.
- Yu L, X Jin, R A Weller, 2008. Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air–sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. Woods Hole Oceanographic Institution, OAFlux Project Technical Report. OA–2008–01: 64.
- Zhang Q L, Weng X C, Cheng M H, 2001. Regional features of long-term SST variation in the western Pacific Warm Pool area. *Journal of Oceanography and Limnology*, 19 (4): 312–318.
- 曹璐, 孙丞虎, 任福民, 等, 2013. 一种综合监测两类不同分布类型 ENSO 事件指标的研究. *热带气象学报*, 29 (1): 66–74.
- 姜良红, 陈大可, 2012. 热带太平洋障碍层厚度时空特征分析. *海洋学研究*, 30 (1): 14–20.
- 齐庆华, 张启龙, 侯一筠, 2008. 西太平洋暖池纬向变异及其对 ENSO 的影响. *海洋与湖沼*, 39 (1): 65–73.
- 秦思思, 张启龙, 尹宝树, 2015. 西太平洋暖池三维结构的季节和年际变化. *海洋科学进展*, 33 (4): 451–459.
- 秦思思, 张启龙, 尹宝树, 2016. 西太平洋暖池热盐结构盐度场的主模态. *应用海洋学学报*, 35 (3): 303–310.
- 邱东晓, 黄菲, 杨宇星, 2007. 东印度洋–西太平洋暖池的年代际变化特征研究. *中国海洋大学学报*, 37 (4): 525–532.
- 袁媛, 杨辉, 李崇银, 2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响. *气象学报*, 70 (4): 467–378.
- 张启龙, 翁学传, 侯一筠等, 2004. 西太平洋暖池表层暖水的纬向运移. *海洋学报*, 26 (1): 33–39.
- 张启龙, 翁学传, 颜廷壮, 2001. 西太平洋暖池海域 SST 的时空特征. *海洋与湖沼*, 32 (4): 349–354.

(本文编辑: 袁泽轼)