

西太平洋暖池水体振荡与赤道中东太平洋海表温度异常的关联性初探

齐庆华, 蔡榕硕

(国家海洋局第三海洋研究所 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 赤道中东太平洋海表温度异常是研究 ENSO (El Niño-South Oscillation) 的重要指标。本文利用海洋再分析数据, 着眼于西太平洋暖池暖水体三维结构的年际变异特征, 分析西太平洋暖池水体变动与赤道中东太平洋海表温度异常的关联性, 并从前期西太平洋暖池三维暖水体的结构演变及其在上层海洋质量与热量配置中的作用角度, 探究了赤道中东太平洋关键 Niño 分区海表温度异常变化的内在一致性, 以期为 ENSO 的预测预报提供新的思路和依据。分析表明, ENSO 尺度上西太平洋暖池三维结构变异主模态表现为暖水体平均约以 170°E 为轴的纬向时空振荡, 其可超前赤道中东太平洋海表温度异常变化约达 6 个月, 并以在赤道中东太平洋及附近海域形成双舌状异常“暖池”为显著特征。前期暖池暖水体的纬向振荡是赤道中东太平洋海表温度异常变化的重要前兆信息之一。作为海洋中 ENSO 暴发的重要源区和驱动因子, 西太平洋暖池纬向振荡通过在中东太平洋形成不同强度(泛指暖水量及其深度和范围等的大小)的异常“暖池”, 进而在上层海洋质量和热量的纬向配置中起关键性作用, 并且可能与不同 El Niño 事件的触发机制密切相关, 从这种意义上讲, 不同 ENSO 事件的发生和发展存在一定的同源一致性。

关键词: 西太平洋暖池; 三维结构; 水体振荡; ENSO(El Niño-South Oscillation); El Niño Modoki
中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2015)09-0077-09
doi: 10.11759/hyqx20140901002

关于 ENSO(El Niño-South Oscillation)的研究是具有明确应用的重要课题, 它已成为当今地球科学发展最快的领域之一。研究 ENSO 演变规律、探索其产生条件和形成机制、揭示其与全球气候变化的联系, 进而预测它的发生、发展, 构成了当代 ENSO 动力学的全部内容, 并成为气候研究特别是气候动力学研究以及探索年际气候预报最有希望的途径之一。目前, 科研工作者对 ENSO 呈现的复杂性和多样性已有足够深入的认识, 但探求 ENSO 发生、发展的内在本质性方面的工作仍在继续。自 20 世纪 60 年代末 Bjerknes^[1]首次用海气相互作用的观点进行解释以来, 已相继提出了信风张弛理论^[2]以及诸如延迟振子^[3], 西太平洋振子^[4], 充放电振子^[5]和平流反射振子^[6]等理论模型。Wang^[7]则尝试提出了一个综合性的 ENSO 振子, 以上各理论模型可作为它的一个特例。

ENSO 这一术语从广义上讲是大气-海洋系统各个方面均存在异常变化的一种综合而复杂的现象, 在海洋方面, 被称为 El Niño -La Niña 事件, 而海表温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)是

用来表征它的重要指标。就 SSTA 的变化来讲, 不同位相 ENSO 事件具有不同的类型^[8]。如 ENSO 暖事件, 可以主要地分为中部增温型(也称暖池型或 El Niño Modoki)和东部增温型(即传统型)^[9-12]。由于两种暖事件形成的大尺度海表温度分布及遥相关的差异, 它们会产生显著不同的气候环境效应^[10-11]。近期, 中部型增暖事件相对多的发生再次引起了人们关注^[13-14], 并掀起了有关中部型增暖事件本身及其气候和环境效应以及致灾影响研究的热潮^[15-17]。

西太平洋暖池作为展布于热带西太平洋上层海洋中的巨大暖水体, 拥有丰富的热含量。是全球海温最高的海区, 海气相互作用最为强烈。它可誉为是继南、北两极和青藏高原之后的地球上的“第四极”, 也

收稿日期: 2014-09-01; 修回日期: 2014-10-18

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2013003); 中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放基金课题资助项目(KLOCAW1305); 海洋公益性行业科研专项资助项目(201005019-2); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201006021)
作者简介: 齐庆华(1978-), 男, 河北保定人, 博士, 主要从事海气相互作用与气候变化研究, 电话: 0592-2195661, E-mail: qqh_2002@163.com

即海洋中的“热极”。解释 ENSO 现象，必需认识热带海洋和大气运动以及它们相互作用的物理规律，而掌握西太平洋暖池的变异特征和规律就是首要的突破口之一。首先，在太平洋海域，由于海-气相互作用和海流运输的结果，使东、西太平洋海水热结构呈现明显不同的两种特性：西太平洋为暖池(>28 °C)，而东太平洋为冷舌(<24 °C)。一旦热带太平洋海气系统发生异常，这两种结构的水体会先在太平洋环流的作用下产生空间分布的变化，而且在 ENSO 事件期间，这两种水体的空间变化幅度最显著并达到极点。作为海气相互作用的一个偶极式气候平衡态，尤其是作为“热极”的暖池水体的维持和变化最能反映热带海洋和大气运动等海气异常以及它们相互作用的物理规律，因此也更能清楚地认识和解释 ENSO^[18-21]；其次，西太平洋暖池是一个极易诱发 ENSO 振荡的海域，暖池及其上空对流和与之相关的西风异常的变化(尤其是纬向变化)，以及暖池次表层海温异常的演变则是 ENSO 形成的根本所在，ENSO 的真正源区在西太平洋暖池^[19, 21-27]；最重要的是，暖池水体的变异是 ENSO 事件发生的一个重要的前兆信息^[18, 27-29]。西太平洋暖水堆积的多寡及温跃层的起伏，能充分反映出 ENSO 事件发展过程中暖水异常的输送，体现 ENSO 事件的发生发展；已有研究表明，在西太平洋，ENSO 冷暖事件可理解为暖池东边界的东伸和西缩^[30-34]。而针对西太平洋暖池自身整体的变化，暖池三维暖水体的振荡不仅体现在暖池东边界的纬向变动上，而且上层暖池暖水的运移也会通过辐聚、辐散等过程引起西太平洋暖池次表层海温异常，它们均通过不同的热动力机制对 ENSO 的演变起着不可忽视的作用^[25, 27]，因此，对于 ENSO 这一气候变化最显著的年际信号而言，整个暖池水体结构的变异也最能体现 ENSO 的本质特征^[25, 35-36]。这对 ENSO 事件发生的统一性认识大有裨益。

有关 ENSO 本质方面的研究表明，如以 SSTA 为同一的判别标准(判据不一定相同)，东部型的 ENSO 循环特征(冷暖事件的对称性)更显著，中部型的 ENSO 循环特征则较之并不明显^[37-38]，这表明 ENSO 冷事件类型单一。而从能量的角度有分析发现^[36]，虽然两类 ENSO 暖事件发生发展的受控因子和反馈机制不同，但均可从充放电振子理论的角度来解释。众所周知，ENSO 发生发展与西太平洋暖池变异密不可分。研究最近显示^[39]，两类暖事件都可归因于西太平

洋暖池暖水向东的平流运输和赤道东太平洋局地增暖的联合影响，这一点也与我们已往的研究结论相一致^[40]。而近期中部型暖事件的增多很可能是西太平洋暖池范围和质心纬向运移变化年代际差异的反映^[41]。可见，从海洋学角度，不同类型的 ENSO 事件具有统一性，并可能从西太平洋暖池整体，尤其是暖水体三维结构异常变化中得到深入认识，这可为 ENSO 发生发展的内在本质和机制研究提供新的研究思路。

因此，本文拟着眼于认识西太平洋暖池暖水体三维结构，尤其是其 ENSO 尺度的时空变化，分析研究赤道中东太平洋关键 Niño 分区的海表温度异常与西太平洋暖池三维水体结构变异的时滞关系，并从暖池变化在上层海洋质量和热量配置中的作用角度，选取海面高度、上层热含量等有关上层海洋质量和热量(垂向)指标，初步探究赤道中东太平洋海温异常变化与暖池水体变动的关联性和一致性，以期为复杂而多样的 ENSO 现象的内在本质和机制的深入研究以及预测预报提供必要基础和新依据。

1 资料和方法

1.1 数据资料和分析方法

考虑到暖池暖水厚度场(一般定义为 28°C 等温线所在的深度^[2])的变化能够直接体现暖池整体三维形态(犹如高程可表示三维地形)和范围(垂向和水平的)的时空演变特征，而且其变化能反映暖池暖水的水量、来源和运动趋向以及暖池整体热状况，本文以暖池厚度场作为西太平洋暖池暖水体三维结构变化的研究指标，同时，利用海面高度场和上层热含量场等作为上层海洋质量和热量的研究指标。本文数据资料主要源自 SODA 再分析数据^[42]，其中上层热含量 Q_c 按公式 $Q_c = \rho C_p \int_{-h}^0 T dz$ 计算，其中， ρ 、 C_p 和 T 分别为海水密度，定压比热和海温。 h 为起算深度，这里取 400 m 以浅水层。Niño 指数取自美国的气候预报中心(CPC, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)。文中采用的分析方法主要为经验正交函数分解 EOF 法以及时滞回归分析和相关分析等。

1.2 赤道中东太平洋海表温异常序列选取

从现实意义来讲，监测和诊断 ENSO 事件需要相应的 ENSO 指标。在海洋领域，主要以 Niño 区海表温度(SST)异常来表征，具体的 Niño 分区见图

1a。近期也有许多区别传统 ENSO 事件的指标体系提出^[11-12, 14, 37]，且多通过 Niño 分区海表温度指标的线性重构而成，具体分类和判据本文在此不作讨论。如前所述，针对 ENSO 暖事件的发生位置，主要分为中部型和东部型等两种。因此，本文主要以 Niño3、Niño3.4 和 Niño4 海表温度异常序列指标(以下简称

Niño 指数)为依据分析探讨问题。文中所指赤道中东太平洋海表温异常变化也主要发生在以上 Niño 分区等关键海域。首先对各 Niño 指数(见图 1b)作同期相关分析，结果表明各指数显著相关(表 1)，可见，各分区的海表温度异常变化具有显著一致的海气(耦合的)热动力学背景。

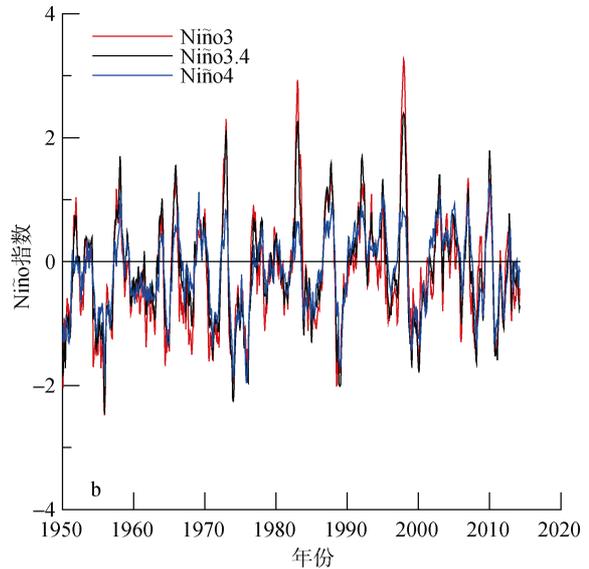
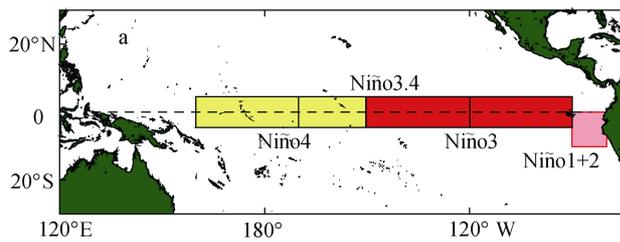


图 1 主要的 Niño 分区示意图(a)和相应 Niño 指数变化曲线(b)

Fig.1 The sketch map of major Niño regions (a) and the variations of Niño indexes (b)

Niño 1+2: (0~10°S)(90°~80°W); Niño 3: (5°N~5°S)(150°~90°W);
Niño 4: (5°N~5°S)(160°E~150°W); Niño 3.4: (5°N~5°S)(170°~120°W)

表 1 各类 Niño 指数与西太平洋暖池水体纬向振荡相关系数

Tab.1 The correlation coefficients between the Niño indexes and western Pacific warm pool(WPWP) zonal oscillation

	Niño3	Niño3.4	Niño4	WPWP-T
Niño3	1			
Niño3.4	0.94	1		
Niño4	0.76	0.91	1	
WPWP-T	-0.77	-0.86	-0.86	1
WPWP-T(6)	-0.36	-0.43	-0.48	-

注: 各相关系数通过 99%的显著性检验;WPWP-T(6)表示西太平洋暖池纬向振荡提前 6 个月

2 西太平洋暖池水体三维时空年际变化特征

以 3、6、9、12 月份简单作为 4 个季节的代表月，图 2 给出了暖池水体三维结构季节变化。厚度场所揭示的暖水体三维结构显示，西太平洋暖池水体

垂向和水平结构整体性较好。暖水体以赤道为界，基本由南北分支构成。垂向深度由北向南逐步加深，赤道以南深于 100 m。春季暖池北向分支不明显。夏季暖水主要向北扩展，南北分支明显，同时北支继而向东扩展。秋季赤道以北暖池暖水可出现 2 个分支，此时，赤道以北暖池暖水向西回退，南北范围达最大。冬季暖池暖水基本保持形态不变，但随着时间的推移，赤道以北暖池暖水向西、向南回退，最终过渡到春季。总之，西太平洋暖池整体暖水的季节变化明显，主要体现在赤道以北的暖池分支上，而赤道以南的水平范围和垂向深度季节变化相对不明显(图 2)。为消除西太平洋暖池水体整体结构的季节变化，并突出 ENSO 时间尺度的变化特征，将暖池厚度场作 13 个月的滤波处理，然后进行 EOF 分析。

分析表明，西太平洋暖池三维水体结构异常变化的第一模态方差贡献率约为 46%，是西太平洋暖池暖水体结构变异的最主要模态，其空间分布(图 3)呈现出东西向的反位相振荡特征。振荡零线平均约

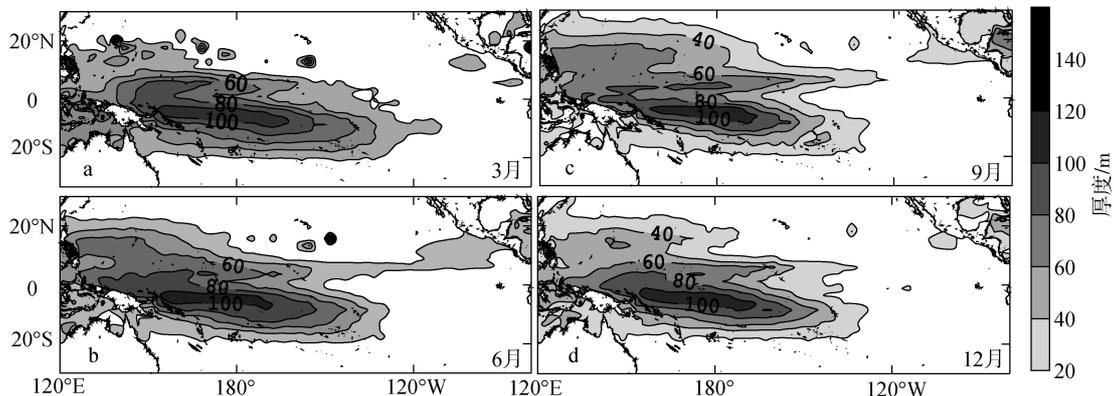


图2 西太平洋暖池三维水体结构季节变化示意图

Fig.2 The sketch map of seasonal variation of three-dimensional structure of WPWP warm water

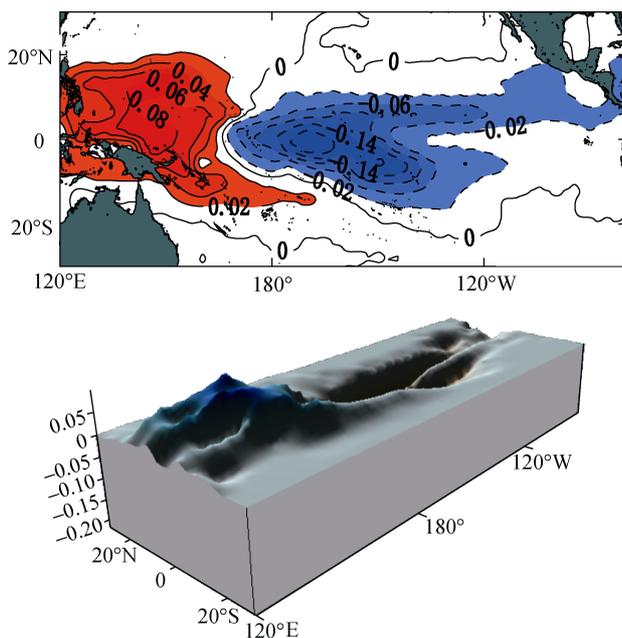


图3 西太平洋暖池三维水体振荡空间主模态

Fig.3 The dominant pattern of warm water oscillation of the WPWP

位于 170°E。正位相的高值区主要位于 5°S~15°N, 140°~150°E。值得注意的是, 负位相的区域以在赤道中东太平洋及附近海域形成一个双舌状异常“暖池”为显著特征, 该异常“暖池”的(负)高值中心主要位于南分支上, 2 个高值中心的具体方位约为(5°S~5°N, 170°E~160°W)和(10°S~0°, 160°~130°W)。由于该异常“暖池”位于中东太平洋, 尤其占据 Niño 分区所在的关键海域, 西太平洋暖池暖水体的纬向振荡势必对赤道中东太平洋海表温度异常变化产生重要影响。加之该模态能最大程度的揭示西太平洋暖池暖水体三维结构变异特征和规律, 因此, 本文仅就该模态进行分

析探讨。限于篇幅, 其他模态本文不作说明。

3 西太平洋暖池纬向振荡与赤道中东太平洋海表温异常变化的关联性

上面的分析表明, 暖水体的纬向振荡是西太平洋暖池三维结构变异的最主要模态, 通过超前滞后 12 个月的时滞相关分析表明, 其时间系数(WPWP-T)与各 Niño 指数的同期相关, 以及暖池纬向振荡(最早)提前 6 个月(WPWP-T(6))的相关系数均通过了 99% 的显著性检验(表 1), 这说明西太平洋暖池暖水体纬向振荡与赤道中东太平洋海表温度异常显著关联, 同时也表明西太平洋暖池三维结构变异可能与不同 ENSO 事件密切相关。为进一步揭示西太平洋暖池暖水体纬向振荡与赤道中东太平洋海表温度异常变化的关联性, 尤其是前期暖池暖水体结构变异对赤道中东太平洋海表温度异常变化的重要影响, 本文利用时滞回归分析方法将暖池厚度异常场分别与各 Niño 指数作回归分析, 由不同 Niño 指数回归的前期和同期暖池厚度异常场见图 4。

首先, 3 种 Niño 指数回归的前期和同期西太平洋暖池水体均呈现出纬向振荡特征, 即对应不同的 Niño 指数变化, 西太平洋暖池水体结构具有一致的演变特征。而演变过程中, 前期和同期西太平洋暖池纬向振荡具有不同的强度, 主要体现为西太平洋暖池纬向振荡在中东太平洋所形成的异常“暖池”强度的不同。这里的强度泛指暖水量及其深度、范围等的大小(下同)。为便于理解, 结合图 4 加以说明, 在赤道中东太平洋海温正异常的发生前期, 西太平洋暖池三维水体基本可提前 Niño 指数异常变化 6 个月在中东太平洋形成双舌状异常“暖池”(图 4), 随后异常“暖池”

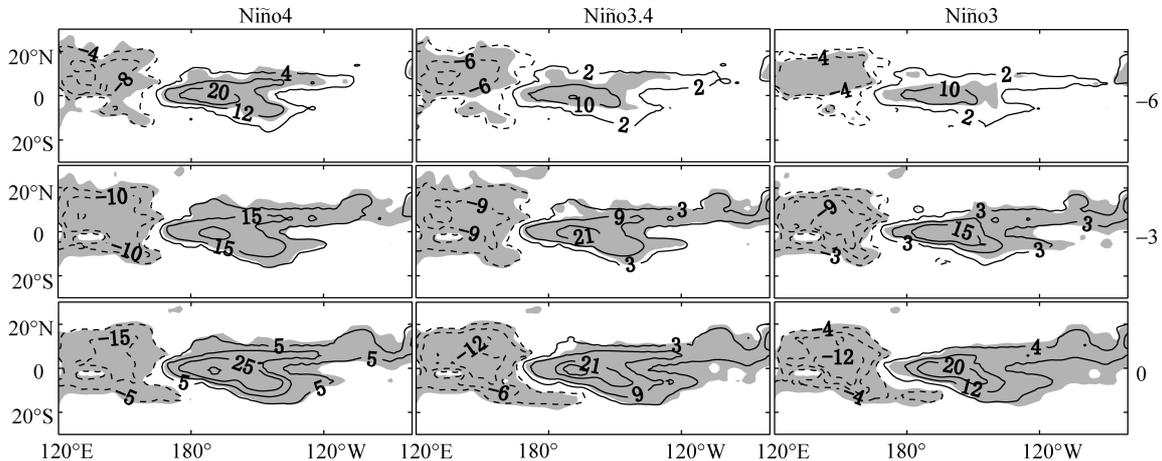


图 4 Niño 指数对暖池厚度异常的时滞回归场(单位: m)

Fig.4 The time-lagged regressed depth anomalies of warm pool from Niño indexes (unit: m)

右侧数值: 暖池振荡提前的月份; 阴影区超过 99%的显著性检验(图 5、图 6 同)

The number on the right side: the months leading by the oscillation of three dimensional WPWP warm water. The shaded area: the significant level exceeding 99%(also applied in fig. 5 and fig. 6)

的北支开始向东扩展并加深, 而南支则主要以加深为主, 相对于北支, 其范围变化不明显。可见, 异常“暖池”的形成和演变对赤道中东太平洋海表温度异常变化具有重要影响。

由于 Niño3.4 区由 Niño4 和 Niño3 区的部分区域组成, 而 Niño4 和 Niño3 区从位置上不重叠(见图 1), 为突出体现中东太平洋不同区域海表温度异常对应的西太平洋暖池暖水体纬向振荡的差异, 进一步以位置上能够完全分开的 Niño4(代表赤道中太平洋)和 Niño3 指数(代表赤道东太平洋)为依据作分析, 并进行简单的信号滤除处理。首先得到滤除(未考虑时滞关系) Niño3 信号的暖池厚度距平场, 再由 Niño4 指数时滞回归得到西太平洋暖池暖水体振荡特征, 同样, 将滤除 Niño4 信号的暖池厚度距平场由 Niño3 指数时滞回归得到西太平洋暖池暖水体振荡特征, 两者的分布及演变如图 5 所示。简便起见, 以 Niño4 区海表温度正异常为例, 在海表温度异常出现的前期及同期, 西太平洋暖池纬向振荡所形成的异常“暖池”主要局限在中太平洋, 且异常“暖池”相对浅薄。而对应于 Niño3 区海表温度正异常变化, 西太平洋暖池纬向振荡所形成的异常“暖池”略为深厚, 尤其是异常“暖池”的北支可持续扩展到东太平洋。总之, 对应于赤道中部和东部太平洋海表温度异常变化, 西太平洋暖池三维暖水体纬向振荡在中东太平洋所形成的异常“暖池”的强度不同, 主要体现在异常“暖池”的深厚程度和北支向东的扩展程度。这种西太平洋暖池水体结构变异的差异可能是影响赤道中东太

平洋区域性海表温度异常变化的重要因素之一。此外, 通过对比图 4 和图 5 发现, Niño3 区信号的存在, 可能会扩大暖池对中太平洋(Niño4 区)海表温度异常的影响, 而由于 Niño4 区信号的存在, 也可能会缩小暖池对东太平洋(Niño3)海表温度异常的影响。这也从侧面反映出, 西太平洋暖池三维水体的振荡强度与中东太平洋海表温度异常的区域性变化密切相关。

4 讨论与结论

一般地, ENSO 的发生在海洋方面主要是强烈海气相互作用下热带太平洋上层海洋质量和热量重新配置的结果。而西太平洋暖池作为大尺度的海洋系统, 暖池区的海气相互作用也最为强烈, 它的维持和变化会影响整个海气系统。西太平洋暖池巨大三维暖水体的纬向振荡, 除了造成海洋次表层海温异常变化, 以及随之的深对流引起的上空大气异常运动等海洋和大气热动力过程和相互作用过程外, 最终将导致热带太平洋上层海洋质量和热量的变化, 并反映在赤道中东太平洋的海表温度异常变化上。重要的是, 前面分析表明, 西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡可作为 El Niño 发生发展的重要前兆信息, 鉴于此, 为进一步揭示西太平洋暖池三维暖水体纬向振荡在热带太平洋上层海洋质量和热量异常变化中的作用以及与赤道中东太平洋海表温度异常的关联性, 同样运用回归分析, 得到暖池三维暖水体纬向振荡引起的热带太平洋海面高度和上层热含量的变化, 如图 6。海面高度和上层热含量的回归

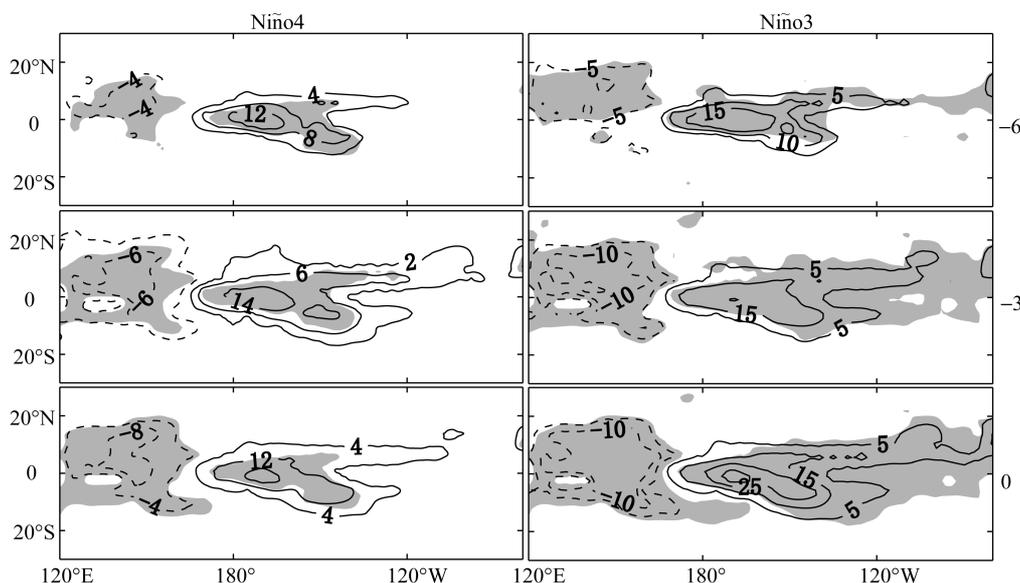


图 5 暖池厚度异常的时滞回归场, 但相应滤去了 Niño3 区(左图)和 Niño4 区(右图)变化信号(单位: m)

Fig.5 The time-lagged regressed depth anomalies of warm pool (unit: m), but the signal in Niño3 (left) and Niño4 (right) was filtered, respectively.

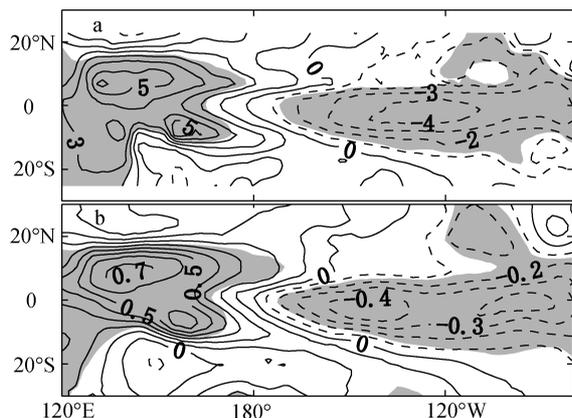


图 6 暖池三维水体纬向振荡回归的海面高度(a, 单位: m)和上层热含量场(b, 单位: $\times 10^9 \text{J/m}^2$)

Fig.6 The regressed sea level height (a, unit: m) and heat storage (b, unit: $\times 10^9 \text{J/m}^2$) by zonal oscillation of three dimensional warm water of the WPWP

场与西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡空间模式一致。暖池暖水的堆积对应着海面高度和相应区域热含量的增加。这说明西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡在热带太平洋上层海洋, 尤其是 50 m 以浅(对应暖池的异常变化幅度)具有举足轻重的地位, 并对赤道中东太平洋海表温度的异常变化产生重要影响。

尽管 ENSO 现象不论从爆发的时间(季节锁相)、地点、周期(如持续时间等)、结构(如对称性)、形成和演变机制(如平流或温跃层反馈等)以及气候环境

效应等方面都体现出了异常复杂性和多样性, 然而西太平洋暖池在海气耦合系统以及上层海洋质量和热量变化格局中的地位举足轻重, 本质上, 西太平洋暖池的变异与 ENSO 的发生发展密不可分, 它既是 ENSO 发生的重要前提和组成部分, 也是 ENSO 发展演变的重要体现。本文正是基于以上考虑, 试图分析赤道中东太平洋 ENSO 式海温异常变化下西太平洋暖池三维暖水体的变动及差异, 不仅可深刻认识暖池整体的三维时空演变, 而且也为各类 ENSO 事件发生发展的机制及其预测预报提供必要的科学依据。文中主要结论如下。

西太平洋暖池三维暖水体存在显著的 ENSO 时间尺度的纬向振荡。暖池水体的纬向振荡以在中东太平洋形成双舌状异常“暖池”为主要特征。

西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡通过引起上层海洋质量和热量的重新配置与赤道中东太平洋海表温度异常紧密关联; 西太平洋暖池三维暖水体向东(西)的波动振荡, 显著指示 ENSO 暖(冷)事件的爆发。而且, 由于西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡在赤道中东太平洋形成异常“暖池”强度的不同, 这对赤道中东太平洋(本文主要指 Niño3 和 Niño4 区)的区域性海表温度异常的变化可能产生重要影响。尤其对不同的 ENSO 事件具有显著的指示作用。以 ENSO 暖事件为例, 西太平洋暖池三维暖水体相对强的纬向振荡和向东扩展, 主要对应着东部型

ENSO 暖事件的发生, 反之相对弱的暖池水体纬向变动和向东扩展则主要预示着中部型 ENSO 暖事件的发生。可见, 从海洋学角度, 以西太平洋暖池三维暖水体的纬向振荡来看, 不同 ENSO 式海表温度异常的发生发展本质上可能具有内在一致性。

有关热带太平洋暖水体变化和 ENSO 的关系异常复杂, 本文仅从暖池(特定等温线包围水体)意义上, 探讨两者的内在关联显然也存在一定的局限性, 例如, 本文未考虑暖水(热量)收支或振荡平衡及相关的热动力过程等。而作为认识和揭示西太平洋暖池整体三维结构时空变异与 ENSO 内在关联的初步尝试, 本文研究结果与已往的相关结论^[6, 25, 34, 41]一致吻合, 并再现了暖池整体的变异与 ENSO 发生发展之间可能存在的一种内在关联。同时, 文中采用了暖池厚度表征暖池整体形态结构的变化, 结果表明该指标对全面深入认识暖池的三维热盐结构变化及机制和影响具有较好的参考价值。鉴于西太平洋暖池具有丰富的热动力内涵以及 ENSO 本身的复杂性, 因此, 针对西太平洋暖池三维时空变化和影响 ENSO 的海洋热动力过程、海气相互作用过程及机制有待深入剖析, 以丰富西太平洋暖池热动力学, 特别是与 ENSO 形成和发展本质性关联方面的研究。

参考文献:

- [1] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 163-172.
- [2] Wyrtki K. El Nino-the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean [J]. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 572-584.
- [3] Suarez M J, Schopf P S. A delayed action oscillator for ENSO[J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 3283-3287.
- [4] Weisberg R H, Wang C. A western Pacific oscillator paradigm for El Nino-Southern Oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 779-782.
- [5] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO Part I: Conceptual model [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54: 811-829.
- [6] Picaut J, Masia F, Penhoat Y D. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of ENSO[J]. *Science*, 1997, 227: 663-666.
- [7] Wang C. A unified oscillator model for the El Nino-Southern Oscillation [J]. *J Climate*, 2001, 14: 98-115.
- [8] 符淙斌, 全小伟, 苏炳凯. 用复 EOF 分析 El Nino 增暖的振幅和位相变化[J]. *科学通报*, 1987, 16: 1241-1244.
- [9] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Nino [J]. *Mon Weather Rev*, 1982, 110: 354-384.
- [10] 符淙斌, 弗莱彻 J. “埃尔尼诺”(El Nino)时期赤道增暖的两种类型[J]. *科学通报*, 1985, 8: 596-599.
- [11] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: C11007.
- [12] Kug J S, Jin F F, An S I. Two Types of El Niño Events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño [J]. *J Climate*, 2009, 22(6): 1499-1515.
- [13] Ashok H, Yamagata T. Climate change: The El Niño with a difference [J]. *Nature*, 2009, 461: 481-484.
- [14] Ren H L, Jin F F. Niño indices for two types of ENSO [J]. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L04704.
- [15] Chen Guanghua, Tam C Y. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L01803.
- [16] Wu Renguang, Chen Jilong, Chen Wen. Different Types of ENSO Influences on the Indian Summer Monsoon Variability [J]. *J Climate*, 2012, 25(3): 903-920.
- [17] Tedeschi R G, Cavalcanti I F A, Grimm A M. Influences of two types of ENSO on South American precipitation [J]. *Int J Climatol*, 2013, 33: 1382-1400.
- [18] Wyrtki K. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles [J]. *J Geophys Res*, 1985, 90(NC4): 7129-7132.
- [19] Fu C, Diaz H F, Fletcher J O. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation [J]. *Mon Weather Rev*, 1986, 114: 1716-1738.
- [20] Lukas R, Webster P. TOGA-COARE, Tropical Ocean Global Atmosphere program and Coupled Ocean

- Atmosphere Response Experiment [J]. 1992, *Oceanus*, 35: 62-65.
- [21] Picaut J, Ioualalen M, Menkes C, et al. Mechanism of the zonal displacement of the western Pacific warm pool: Implications for ENSO [J]. *Science*, 1996, 274: 1486-1489.
- [22] Deser C, Wallace J. Large-scale atmospheric circulation features of the warm and cold episodes in the tropical Pacific [J]. *J Climate*, 1990, 3: 1254-1281.
- [23] Delcroix T, Picaut J. Zonal displacement of the western equatorial Pacific “fresh pool” [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C1): 1087-1098.
- [24] Matsuura T, Iizuka S. Zonal migration of the Pacific warm-pool tongue during El Nino events [J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 1582-1600.
- [25] 李崇银.关于 ENSO 本质的进一步研究 [J].*气候与环境研究*, 2002, 7(2): 160-173.
- [26] Shu L, Clarke A J. Using an ocean model to examine ENSO dynamics [J]. *J Phys Oceanogr*, 2002, 32: 903-923.
- [27] 齐庆华.西太平洋暖池纬向变异规律研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所, 2008.
- [28] Wyrtki K. The slope of sea level along the Equatorial Pacific Ocean to atmosphere forcing [J]. *J Phys Oceanogr*, 1984, 89: 10419-10424.
- [29] Sun D Z. A possible effect of an increase in the warm-pool SST on the magnitude of El Nino warming [J]. *J Climate*, 2003, 16(2): 185-205.
- [30] McPhaden M J, Picaut J. El Nino-Southern Oscillation displacement of the western Equatorial Pacific warm pool [J]. *Science*, 1990, 250: 1385-1388.
- [31] Ho C R, Yan X H, Zheng Q. Satellite observations of upper-layer variabilities in the western Pacific warm pool [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76: 669-679.
- [32] Delcroix T, Dewitte B, Penhoat Y D, et al. Equatorial waves and warm pool displacements during the 1992-1998 El Nino Southern Oscillation events: Observation and modeling [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C11): 26045-26062.
- [33] Clarke A J, Wang J, Gorder S V. A simple warm-pool displacement ENSO model [J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 1679-1691.
- [34] Qi Qinghua , Zhang Qilong, Hou Yijun. Dynamic mechanism of interannual zonal displacements of the eastern edge of the western Pacific warm pool [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 387-397.
- [35] Philander S G H. El Nino Southern Oscillation phenomena [J]. *Nature*, 1983, 302: 295-301.
- [36] Ren H L, Jin F F. Recharge Oscillator Mechanisms in Two Types of ENSO [J]. *J Climate*, 2013, 26: 6506-6523.
- [37] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of El Niño [J]. *J Climate*, 2009, 22: 615-632.
- [38] Kug J S, Ham Y G. Are there two types of La Nina? [J]. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L16704.
- [39] Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Chen Lieting. Connections between different types of El Niño and Southern/Northern Oscillation[J]. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25(4): 506-516.
- [40] 齐庆华, 张启龙, 侯一筠.西太平洋暖池和东太平洋暖池变异对 ENSO 的联合影响[J].*海洋科学进展*, 2008, 26(4): 418-427.
- [41] Kidwell A, Jo Y H, Yan X H. A closer look at the central Pacific El Nino and warm pool migration events from 1982 to 2011[J]. *J Geophys Res*, 2014, 119: 165-172.
- [42] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. *Mon Wea Rev*, 2008, 146: 2999-3017.

The relationship between the oscillation of western Pacific warm pool and sea surface temperature anomalies in equatorial central and eastern Pacific

QI Qing-hua, CAI Rong-shuo

(Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

Received: Sept., 1, 2014

Key words: western Pacific warm pool; three dimensional structure; Warm water oscillation; ENSO(EI Niño-South Oscillation); EI Niño Modoki

Abstract: The anomalies of sea surface temperature (SST) in equatorial central and eastern Pacific are important indexes for the research of ENSO (El Niño -South Oscillation), . Based on the oceanic reanalysis, the relationship between the fluctuations of the warm water ($T \geq 28^{\circ}\text{C}$) of the western Pacific warm pool (WPWP) and SST anomalies in equatorial central and eastern Pacific was investigated with focus on the interannual variability of the three-dimensional WPWP warm water, and from the view of the evolution of three-dimensional distribution of the WPWP warm water preceding the emergence of SST anomalies in key Niño regions and its important role in controlling the pattern of mass and heat in upper ocean, the intrinsic consistency among the anomalous changes in SST in equatorial central and eastern Pacific was probed into, which was expected to provide the new clue and basis for the mechanism and forecast of ENSO. The analysis suggests that the dominant pattern of spatio-temporal variation on ENSO time- scale as for three-dimensional WPWP warm water is the zonal oscillation with a zonal-averaged equilibrium line around 170°E . At the same time, its remarkable characteristic is the formation of an anomalous double cantilever "warm pool" in the central and eastern tropical Pacific at the early stage (leading by around 6 months) of variations of SST anomalies in key Niño regions. The interannual zonal oscillation of the WPWP warm water is one of prerequisites for the anomalous changes of SST in key Niño regions. In virtue of the development of the anomalous "warm pool" with different intensity (generally refer to the volume of warm water and the magnitude of warm water depth and extent) in central and eastern Pacific which favors the zonal reconfiguration of the mass and heat in the upper ocean, the WPWP zonal oscillation is very likely to play decisive role as a original driver in the ocean to trigger the different EI Nino events, namely, that there is a sense in which the different flavors of ENSO events are to a great extent homeomorphous.

(本文编辑: 李晓燕)