

# 赤道太平洋温度纬向对流距平分析及其 与 El Niño/La Niña 的关系

蔡 怡, 余宙文

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

**摘 要:** 本文用最近 20 年赤道太平洋温度、流场资料, 诊断了绝热不可压缩热平衡方程中纬向对流项, 并且利用 EOF 分析方法, 讨论了纬向对流距平变化及其与 El Niño/La Niña 的关系。分析发现: 赤道太平洋温度纬向对流距平 EOF 分析第一模态反映了在经向的振荡, 第二模态反映了在纬向的振动, 它们都与 El Niño/La Niña 有密切的联系。这两个模态占了总量的 70% 左右。纬向温度对流距平在  $3^{\circ}\text{S}$ ~ $3^{\circ}\text{N}$ 、 $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北分为正负相间的三个不同的区域, 当  $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北的区域温度纬向对流正/负距平沿着斜温层向西太平洋移动时, 赤道区域的温度纬向对流负/正距平则穿越斜温层向东太平洋移动, 形成以赤道为对称的南北两个回路。对应赤道, 在  $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北区域的纬向温度对流距平并不是对称的, 它们在位相、中心强度和中心强度位置上都是不同的, 其中  $3^{\circ}\text{N}$  以北与赤道区域形成一个比较明显的回路, 而赤道以南的回路就不是那么明显。在赤道西太平洋暖池, 温度的纬向对流有很大的贡献。在 El Niño 发生前一年, 赤道西太平洋暖池, 主要暖的对流发生在赤道和其以南地区。

**关键词:** 纬向温度对流距平; EOF 分析; El Niño/La Niña

**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2004) 01 - 0001 - 08

## 1 引言

近年来, 人们已经从各种角度对 El Niño 进行了大量的研究, 特别是通过对热带风场和海面温度场的研究, 取得了很多研究结果; 最近几年人们又发现赤道西太平洋暖池与 El Niño 的关系<sup>[1~4]</sup>, 使人们对 El Niño 的认识从海洋表面深入到海洋内部。李崇银等<sup>[5]</sup>曾经指出西太平洋暖池次表层异常海温与赤道东太平洋次表层异常海温有一种跷跷板式现象。但是由于深层海洋资料的缺乏, 以往对 El Niño 的研究多集中在海洋表面和大气层的资料分析, 也有用数值模式、理论分析等方法进行研究。随着海洋观测手段的改进和海洋观测资料的增加, 人们开始利用海洋深层资料来研究 El Niño。现在通过对赤道太平洋次表层温度场的分析<sup>[6~8]</sup>, 发现, 当赤道西太平洋暖池中的次表层暖中心沿着斜温层迅速东移到赤道东太平洋时, 就有可能发生 El Niño 现象。特别是最近巢纪平等<sup>[9~10]</sup>

收稿日期: 2003-09-04; 修订日期: 2003-11-12

作者简介: 蔡 怡 (1961-) 女, 研究员, 主要从事 El Niño 预测研究和海气耦合数值模式研究。

基金项目: 本文得到“国家自然科学基金”资助项目批准号为(40276002)课题和“国家重点基础意见发展规划项目(G1998040900)第一部分”资助。

通过构建赤道太平洋最大温度距平曲面发现,当赤道太平洋有负/正中心向东太平洋移动时,对应赤道以北和以南  $10^\circ$  区域,有暖/冷中心向西太平洋移动与赤道形成南北两个回路,当暖/冷中心达到一定的强度后,出现一次 El Niño/La Niña 过程。但是人们并不清楚这种暖/冷中心的移动,是由什么因素决定的,根据海洋内部绝热温度方程,我们可以知道,在忽略热扩散的情况下,海洋内部某一局地的温度变化,控制方程如下:

$$\frac{D(\rho T)}{Dt} = \rho \frac{DT}{Dt} + T \frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

如果我们把海洋作为不可压缩流体则:  $\frac{D\rho}{Dt} = 0$ , 因此海洋内部的温度变化我们主要考虑如下方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

在本文的讨论中,我们仅仅讨论温度的纬向对流即  $u \frac{\partial T}{\partial x}$  这一项。

本文用时间长度达 20 年以上的热带太平洋各层温度、流场的网格点资料,计算出各个网格点温度纬向对流距平,并且借助 EOF 分析方法对热带太平洋次表层温度纬向对流进行综合分析,以揭示热带太平洋次表层温度变化规律、以及这种温度变化与 El Niño/La Niña 发生的关系,为 El Niño 预报技术的完善和发展提供背景知识和有价值的依据。

## 2 资料来源及处理方法

我们所用的海温和流场资料来自美国的 IGOS 数据集,资料从 1980 年 1 月至 2001 年 5 月,共 257 个月。资料的范围为  $5^\circ\text{N} \sim 5^\circ\text{S}$ ,  $150^\circ\text{E} \sim 80^\circ\text{W}$ , 水平网格为  $1.5^\circ$  (纬度)  $\times 1^\circ$  (经度), 资料垂直层所在的深度为 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 106.25, 120, 136.25, 155, 177.5, 205, 240, 285, 345, 430m。在本文中我们主要分析赤道太平洋次表层纬向距平场以及它们随时间的变化。我们首先用中央差分方法计算网格点上的温度纬向对流。所用的差分公式如下:

$$(u \frac{\partial T}{\partial x})_{(i,j)} = [u(i,j) + u(i+1,j)] \times [T(i+1,j) - T(i,j)] \times 0.5 / \nabla x \quad (3)$$

这里为了提高计算精度,在公式(3)中,所描述的  $(I, J)$  与  $(i, j)$  并不在同一点上,而是相差  $1/2$  网格点,如图 1 所示。由于我们所用到的温度和流场资料是月平均资料,所以,这里得到的纬向温度对流,也只是气候月平均意义上的一个诊断。另外,为了去掉季节变化,首先我们得到温度纬向对流项的气候月平均场,然后用由(3)式求得的值减去所得到的月气候场,得到这 21 年 7 个月的月平均距平场,公式如下:

$$(u \frac{\partial T}{\partial x})' = (u \frac{\partial T}{\partial x}) - \overline{(u \frac{\partial T}{\partial x})} \quad (4)$$

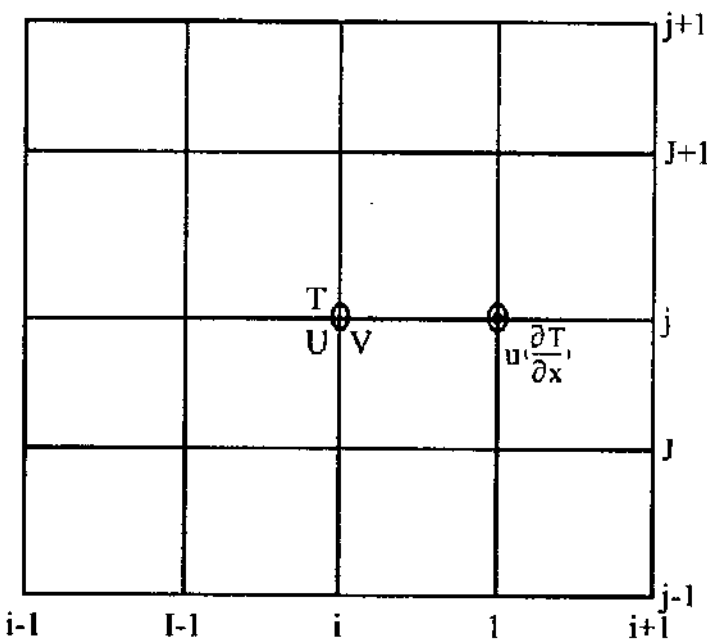


图 1 纬向温度对流诊断网格点分布， 代表计算的纬向温度对流格点， 代表原始的纬向流和温度的格点

为了讨论温度纬向对流距平的时间演变和空间变化，我们对计算得到的 21 年 7 个月温度纬向对流距平作 EOF 分析，下面对 EOF 分析结果进行讨论。

3 纬向温度对流距平场 EOF 分析

为了讨论赤道太平洋纬向温度对流距平的空间结构及其随时间的变化，我们分别截取沿 4°~5°S、赤道 0 °和 4°~5°N 纬度圈，三个纬向垂直剖面做 EOF 分析。图 2 是 1980 年 1 月至 2001 年 7 月，这三个垂直剖面上，纬向温度对流距平场 EOF 分析第一、二主分量的特征向量。图 3 是特征向量的时间系数和 Nino3 区 SST 距平，为了便于比较，时间系数已作了标准化处理，即首先我们先求出特征向量时间系数的平均值，然后再求它的偏差。

通过 EOF 分析，计算得到在 4°~5°S 剖面上，第一个主分量占了总量的 41.0%；第二主分量占了总量的 28.6%；在赤道剖面上，第一个主分量占了总量的 45.9%；第二主分量占了总量的 22.3%；在 4°~5°N 剖面上，第一主分量占了总量的 62.7%；第二主分量占了总量的 17.3%，由此发现，前两个分量占了总量的 70%左右，因此，我们可以主要讨论前两个主要分量。

从图 2 可以看到，纬向温度对流距平场 EOF 分析第一特征向量的分布在 4°~5°S 和 4°~5°N 剖面上基本上是一致的。在次表层，有正的纬向温度对流距平区，根据热平衡方程可以知道，它的作用是使局地温度减低，这里我们称为冷对流中心，其分布都是西边厚东边薄，差别之处在于，在 4°~5°N 剖面，最大中心位于 150°W，在 4°~5°S 剖面，最大中心位于 180°。而在赤道上则相反，为负温度对流距平区，它的作用是使局地温度升高，这里我们称为暖对流中心，其分布是东边厚西边薄，它们的最大中心在 170°W。我们结合图 3 可以看到，这三条时间系数曲线，基本上与 Nino3 区的 SST 距平曲线是一

致的。由此我们知道，图 2 的空间分布，基本上反映了 El Niño 时期这三个剖面上的纬向温度对流距平分布，也就是说，当 El Niño 达到鼎盛时期，在赤道上，纬向温度对流距平对局地温度变化的贡献是正，即有暖对流距平，而在与赤道对称的南北纬  $4\sim 5$  度剖面上，纬向温度对流距平对局地温度变化的贡献是负，即有冷对流距平。在 La Niña 时期，情形正好相反。这与巢纪平等人的结论是完全一致的，巢纪平等人发现，在热带赤道太平洋，温度距平会在最大温度距平曲面上沿着赤道对应  $10^{\circ}\text{N}$  和  $10^{\circ}\text{S}$  形成的两个闭合回路运动，当赤道西太平洋有暖/冷水沿着赤道东传到赤道东太平洋时，在东太平洋  $10^{\circ}\text{N}$  和  $10^{\circ}\text{S}$  有冷水向赤道西太平洋传播，当暖/冷水经过一个回路且暖/冷中心达到一定的强度时，在赤道太平洋就形成一次 El Niño/La Niña 过程。从我们的分析结果来看，纬向温度对流对这种冷暖水的运动有很大的贡献。

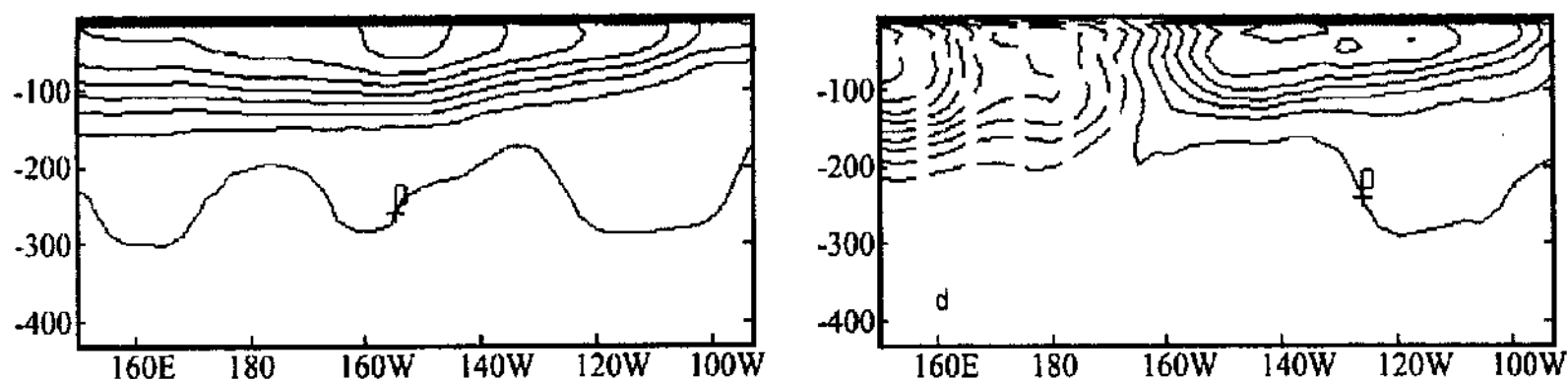


图 2a、d 为  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面第一、二特征向量;

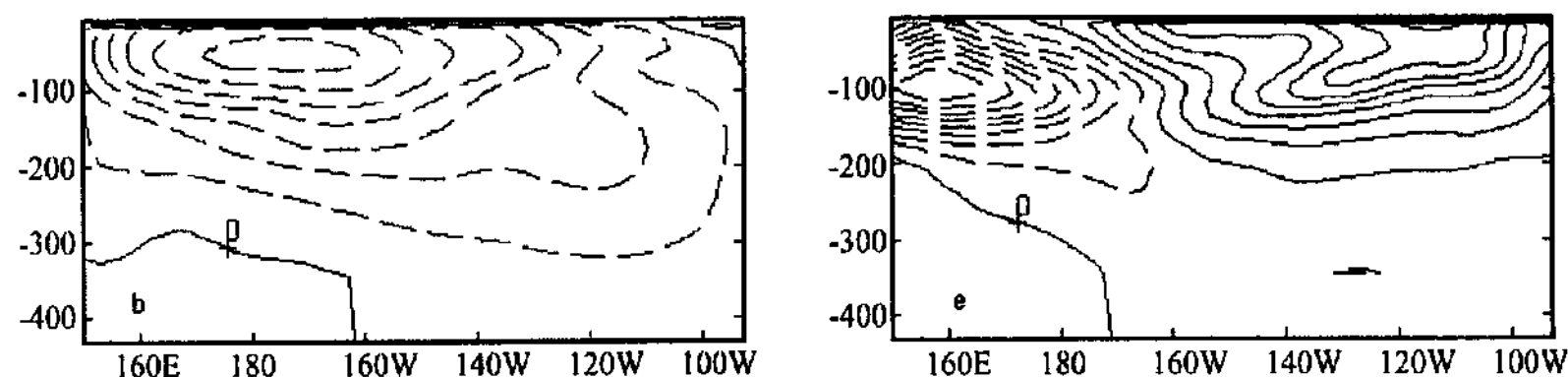


图 2b、e 为赤道剖面第一、二特征向量;

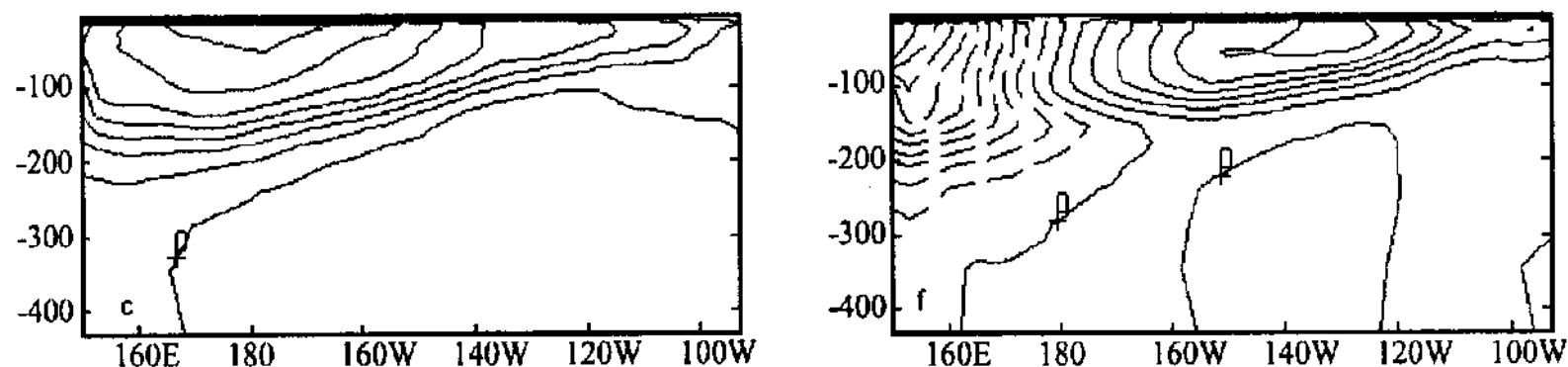


图 2c、f 为  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  剖面第一、二特征向量。

图 2 纬向温度对流距平场沿  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  和赤道纬度圈的垂直剖面 EOF 分析的特征向量。图中虚线为负值，实线为正值，等值线间隔都为 0.01。

(垂直坐标表示深度，单位为 m；横坐标是经度)

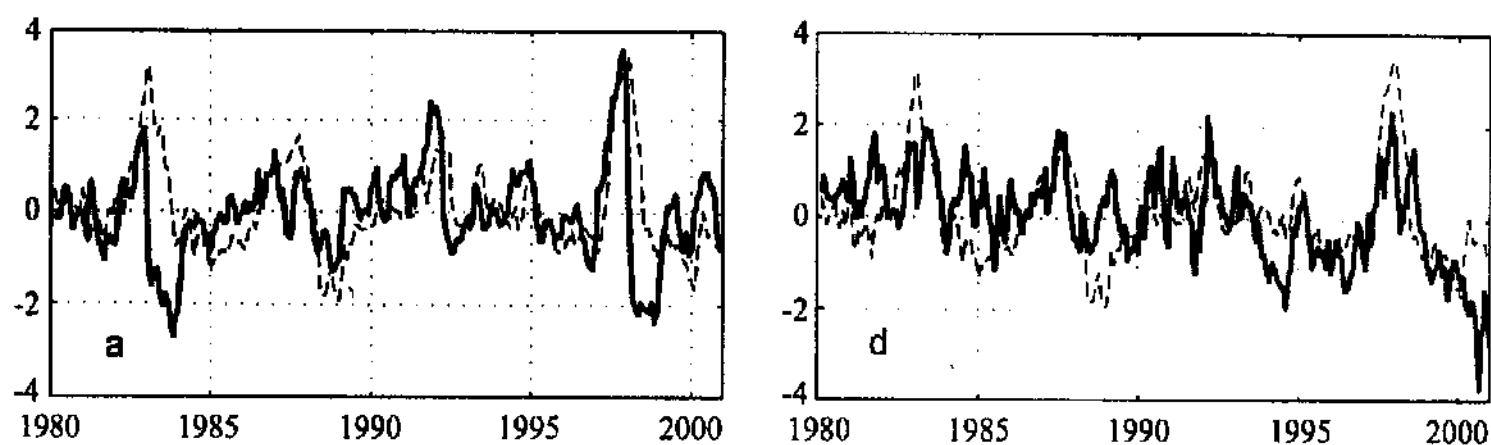


图 3a、d 为  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面第一、二特征向量的时间系数

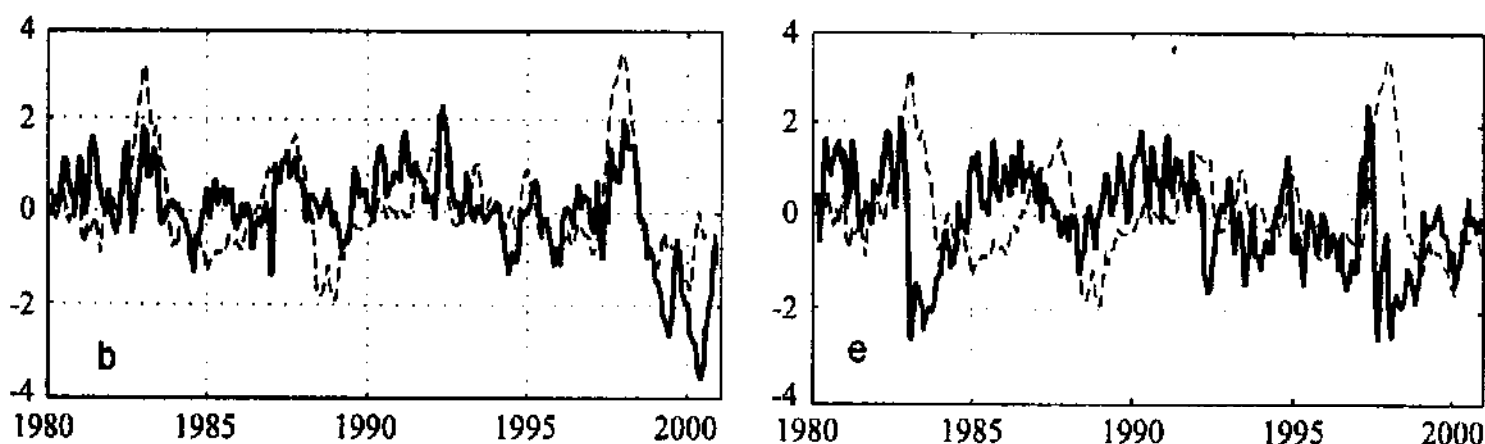


图 3b、e 为赤道剖面第一、二特征向量的时间系数

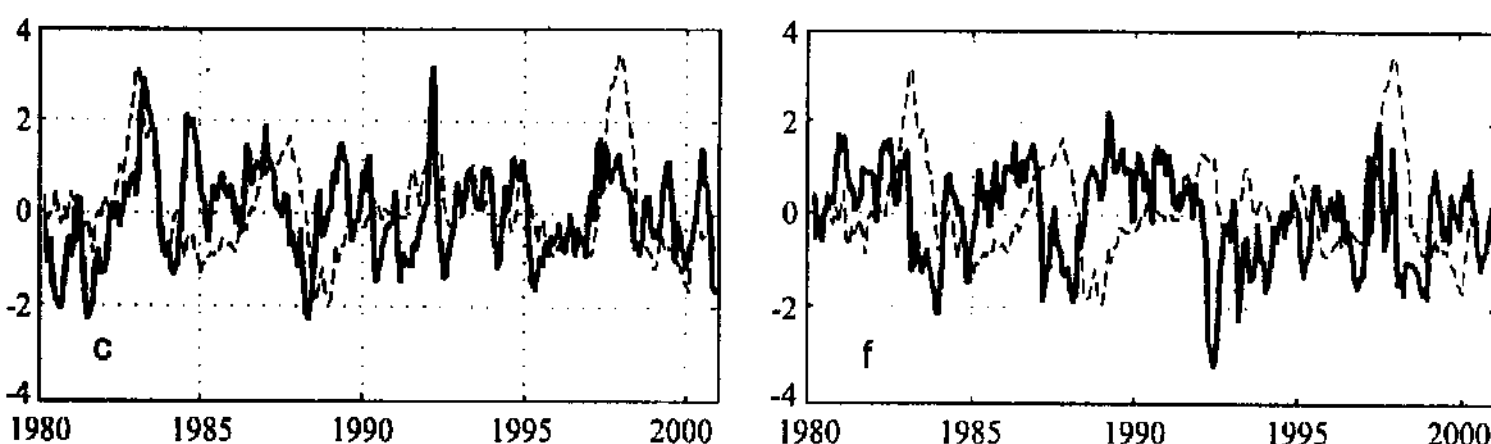


图 3c、f 为  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  剖面第一、二特征向量的时间系数

图 3 纬向温度对流距平场沿  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  和赤道纬度圈的垂向剖面 EOF 分析特征向量的时间系数(实线)和 Nino3 区 SST 距平(虚线)

(垂直坐标是时间系数; 横坐标是年份)

为了更细致的分析, 我们曾对  $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$  每一个纬度上的 11 个剖面都进行了附加的 EOF 分析并发现, 在沿着赤道向东传播的暖/冷对流范围是非常狭窄, 主要集中在赤道附近大约  $3^{\circ}\text{S}\sim 3^{\circ}\text{N}$  附近范围内, 它应该是受 Kelvin 波的影响。而在离开赤道  $3^{\circ}$  以外, 则是它的返回路线。这样, 巢纪平等人在文章中所提到沿着赤道的南北回路就更加清晰了, 在水平方向这种冷暖对流的相向运动, 是以南北纬  $3^{\circ}$  为分界线。

在垂直方向, 从图 2 中可以发现, 它与斜温层的分布并不完全一致, 特别是在赤道

回路上, 暖/冷对流在赤道东太平洋比西太平洋更加深, 这与通常的斜温层分布正好相反, 可见在赤道回路上, 纬向温度对流距平在向东移动时, 是穿越斜温层到达东太平洋的, 这与以前人们的看法不完全一致。人们一般认为, El Niño 过程就是赤道西太平洋暖池中的暖水沿着斜温层东移的结果, 但事实上, 在 El Niño 发展阶段, 赤道东太平洋的斜温层将变厚, 这就意味着, 在原来的斜温层以下有温度的上升。从目前的分析来看, 这种温度的上升, 温度的纬向对流有很大的贡献。我们通过对温度纬向对流距平的分析发现: 在南北回路上, 自东向西它是沿斜温层移动的, 而在赤道回路上, 自西到东它是穿越斜温层移动的。

另外, 从图 3 可以看到, 这三条曲线, 都有与 El Niño 一致的变化趋势, 其中在赤道上, 它的位相与 Nino3 区的 SST 距平完全一致, 而在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面上, 它的位相则略超前于 Nino3 区的 SST 距平位相, 在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  剖面上, 它的位相则略落后于 Nino3 区的 SST 距平位相。因此, 我们可以看到, 在南北回路上, 它们的移动位相是不一致的, 在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  纬度和赤道剖面上, 它们与 Nino3 区 SST 距平的相关比较好, 而在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  纬度上, 它们的相关就不是很好。这也证明了巢纪平<sup>[9]</sup> 在文章中指出的由赤道和  $10^{\circ}\text{N}$  组成的回路圈要比由赤道和  $10^{\circ}\text{S}$  组成的回路圈明显很多。另外, 在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  纬度上, 它与 El Niño/La Niña 的强度有比较好的对应关系, 而在赤道上, 它们之间只有位相的关系, 而没有强度上的关系。也就是说, El Niño/La Niña 的强度与北赤道回路上的冷/暖对流中心强度有比较明显的关系, 而与赤道或南赤道回路上的强度关系不大。

图 2d、e、f 和图 3d、e、f 是  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面、赤道和  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  剖面第二特征向量和时间系数, 与第一特征向量不同, 这三个剖面上的暖/冷对流分布基本是一致的, 在时间系数大于零的情况下, 当赤道西太平洋有暖对流时, 赤道中东太平洋, 则有冷对流, 这反映了赤道太平洋的东西振荡。从垂直深度的分布来看, 它与温度距平在暖池的垂直分布基本上是一致的。由此, 我们可以知道, 在赤道西太平洋暖池, 这种暖对流在南北方向的范围要比第一特征向量对 Nino3 区的作用范围大得多, 而且它们正好作用在赤道西太平洋暖池的位置上。为此, 我们可以断定, 在赤道西太平洋暖池, 温度的纬向对流有很大的贡献。另外, 我们从图 3 时间系数的变化可以看到, 在赤道和  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{S}$  剖面上, 第二特征向量的时间变化, 超前 Nino3 区 SST 距平变化大约 1 年左右; 而在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面上, 它的变化基本上与 Nino3 区的 SST 是一致的。由此我们知道, 在 El Niño 发生前一年, 赤道西太平洋的暖池, 主要暖对流是在赤道和其以南地区。我们结合第一, 二特征向量可以发现, 在赤道剖面上, 当 Nino3 区的 SST 达到最大时, 赤道中东太平洋为一致的暖对流, 而在  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  剖面上, 则为一致的冷对流, 这就更证实了赤道北回路要比赤道南回路明显得多。

## 4 结论

我们通过对热带太平洋温度对流的诊断和 EOF 分析, 讨论了纬向温度对流距平时空变化以及它们与 El Niño/La Niña 的关系, 得到以下结论:

(1) 赤道太平洋温度纬向对流距平 EOF 分析第一模态反映在经向的振荡, 第二模态反映了在纬向的振动, 它们都与 El Niño/La Niña 有密切的联系。这两个模态占了总量的 70% 左右。

(2) 纬向温度对流距平在  $3^{\circ}\text{S} \sim 3^{\circ}\text{N}$ 、 $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北分为正负间隔的三个不同的区域, 当  $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北的区域温度纬向对流正/负距平沿着斜温层向西太平洋移动时, 赤道区域温度纬向对流负/正距平则穿越斜温层向东太平洋移动, 形成赤道对称的南北两个回路, 如果这种温度纬向对流距平比较大的话, 就出现一次 El Niño 或 La Niña 事件。

(3) 与赤道对称的  $3^{\circ}\text{S}$  以南和  $3^{\circ}\text{N}$  以北剖面的纬向温度对流距平, 并不是完全对称的, 它们在位相, 中心强度和中心强度位置上都是不同的, 其中  $3^{\circ}\text{N}$  以北剖面与赤道剖面形成一个比较明显的回路, 而赤道以南的回路就不是那么明显。

(4) 在赤道西太平洋暖池, 温度的纬向对流对暖池有很大的贡献。在 El Niño 发生前一年, 赤道西太平洋的暖池, 主要暖对流是位于赤道和其以南地区。

致谢: 在本文的写作过程中, 巢纪平院士给予了许多有益的指导和建议。

#### 参考文献:

- [1] Weisberg R. H. and Wang C. Slow Variation in the Equatorial West Central Pacific in Relation to ENSO [J]. *J. of Climate*, 1967, 10: 1998 ~ 2015.
- [2] 刘海龙, 等. 西风爆发时赤道西太平洋热量平衡的诊断分析 [J]. *大气科学* 2001, 5 (3): 303 ~ 315.
- [3] 穆明权, 等. 西太平洋暖池次表层海温距平异常与 ENSO 循环的相互作用 [J]. *大气科学*, 2000, 24: 447 ~ 458.
- [4] Wang Bin, Wu Renguang and Roger Lukas. Roles of Western North Pacific Wind Variation in Thermocline Adjustment and ENSO Phase Transition [J]. *J. of the meteor. Soc. of Japan*. 1999, 77 (1): 1 ~ 16.
- [5] 李崇银, 等. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温距平异常 [J]. *大气科学*. 23 (5): 513 ~ 521.
- [6] Yves M. Tourre and Warren B. White ENSO Signals in Global Upper-Ocean Temperature [J]. *Phys. Oceanogr.* 1995, 25: 1317 ~ 1331.
- [7] Zhang Rong-Hua and Sydney Levitus. Interannual Variability of the Coupled Tropical Pacific Ocean-Atmosphere System Associated with the El Niño-Southern Oscillation [J]. *J. of Climate* 1997, 10: 1312 ~ 1330.
- [8] 蔡 怡, 等. 赤道太平洋温度、流场距平 EOF 分析及与 El Niño 的关系 [J]. *海洋学报*, 2003, 25 (1): 12 ~ 18.
- [9] Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Chao Qingchen and Tian Jiwei The Data Analysis Study on the Evolution of El Niño/La Niña Cycle (to be published by *Advances in Atmospheric Sciences* in Sept. 2002).
- [10] Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Chao Qingchen, and Tian Jiwei, The source of the subsurface warm water of the warm pool in the equatorial western Pacific-the analysis on the El Niño event in 1997/1998. *Chinese [J]. Atmos. Sci. (in Chinese)*, (accepted).

# EOF ANALYSIS OF ZONAL TEMPRATURE ADVECTION IN THE EQUATORIAL PACIFIC OCEAN AND ITS RELATION TO EL NINO

CAI Yi, YU Zhou-Wen

*(National Research Center for Marine Envorimental Forecasting, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** We discussed zonal temperature advection in the equatorial Pacific Ocean and its relation to El Niño by using EOF analysis. The data are from 1980 to 2001. The results show that its first mode changes with longitude and second mode with latitude. They all relate to El Niño and are 70% in total amount. There are three areas from 3°S to south, 3°S-3°N and from 3°N to north (area I, area , area ). There are weastward moving positive temperature advection in area I and , and eastward moving negative temperature advection in area . They form two cycles in north and south of the equator. But north cycle is stronger than south cycle. The western Pacific warm pool is mainly contributed by zonal temperature advection. There is warm zonal temperature advection in warm pool from the equator to south before one year of El Niño occcurring.

**Key words :** Zonal temperature advection anomaly ; EOF analysis ; El Niño La Niña