

厄尔尼诺形成机制的数值研究

李东辉¹, 张 瑰², 谭言科³

(1. 南京军区气象水文中心, 南京 210016; 2. 解放军理工大学理学院, 南京 211101;
3. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

摘 要: 在中国科学院大气物理研究所研制的第三代大洋环流模式(L30T63 OGCM)的基础上, 提高模式的水平分辨率, 建立了纬向和经向水平分辨率分别为 1.5° 和 1° 的较高分辨率的全球大洋环流模式, 分析该模式 1959 年 1 月~1998 年 12 月的积分结果, 以此研究厄尔尼诺事件形成和演变的物理机制。对数值模拟结果的分析表明: 西风爆发可引起表层洋流异常, 异常的平流作用是海表温度距平形成厄尔尼诺模态的主要原因; 表层洋流异常及由其引起的海表高度异常可导致次表层海水垂直输送的异常, 异常的垂直输送作用是形成次表层海温距平厄尔尼诺模态的主要原因。

关键词: 厄尔尼诺; 海洋环流模式; 海温距平

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239(2006)2 - 0031 - 08

1 引言

上世纪 60 年代中期 Bjerknes^[1~2] 发现热带太平洋存在一种海气相互作用的环流模型, 第一次将南方涛动(SO)和厄尔尼诺(El Niño)联系在一起, 提出 SO 和 El Niño 事实上是热带太平洋大尺度海气相互作用的一个现象的两个方面, 奠定了现代 ENSO 动力学的研究基础。在上世纪 70 年代 Wyrki^[3] 提出的海洋学模型具有一定的意义, 它比较完整地描写了 El Niño 现象在赤道附近地区的海洋现象及演变。模型强调了前期信风增强而形成的能量积累的作用。McCreay 等^[4~5], Anderson 等^[7] 基于海气耦合模式, 通过海洋不稳定过程激发海洋 Kelvin 波和 Rossby 波的活动及相互影响, 最终得到了能与观测相比较的 ENSO 循环。

近年来的许多研究结果^[8~16] 表明, 发生在 El Niño 事件之前的西风异常和暖池次表层暖水东传对 El Niño 的形成起到了重要的作用, 其中西风异常是造成暖池次表层暖水东传的重要原因。但是, 西风异常是通过什么样的物理机制影响暖池次表层暖水的东传, 或者说西风异常是如何影响赤道太平洋次表层异常海温的演变, 这是目前仍然没有解决的问题, 找到这个问题的答案, 就可以从根本上解释 ENSO 事件发生的物理本质。本文利用 Reynolds 海表面温度(SST)资料, 结合大洋环流模式的 40a 模拟结果, 对 El Niño 的发生、发展规律的深入分析来探讨触发 ENSO 的物理本质。

2 海洋环流模式介绍

本文采用的数值模式是在中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 发展的第三代海洋模式^[17] (L30T63 OGCM) 的基础上进行改进。将 L30T63 海洋模式纬向网格加密到 1.5° ，经向网格加密到 1° ，保持垂直分辨率不变。由于原模式将北极作为一个孤岛来处理，海冰模式只是一个简单的热力学海冰模式，因此模式在北冰洋的计算并不理想，因此改进的模式暂不考虑北冰洋，北边界取到 65°N ，南边界取到 68°S ，这样只有北冰洋和一小部分边缘海没有包含在内，在南北边界速度取刚壁边界条件，温、盐取法向导数为 0。由于改进的模式中不包括高纬海流的计算，L30T63 海洋模式原有的经向付氏滤波在改进的模式中没有用到。

出于气候研究的考虑，改进的模式将重点放在热带上层环流的模拟，这样带来了一个需要进一步思考的问题：边界条件是否会影响到热带上层环流的模拟？对于这一问题，刘海龙^[18]进行了对比试验，对 L30T63 海洋模式北边界取到 65°N ，模式积分 1000a，所得结果与原来全球模式积分结果比较，从经圈流函数来看，两个试验的主要差别在深层以及高纬度海洋，热带上层环流差别不明显。更进一步比较赤道上的温度结构发现，两者的等温线几乎重合，差别很小。因此，可以认为高纬度侧边界条件对于热带上层的温度结构几乎没有影响。由于热带温度结构和流场结构是相互适应的，所以由温度场可以推知边界条件对流场的影响也很小。

模式的初始场采用 Levitus(1994 年) 三维温盐资料。海表面的气象强迫场采用 L30T63 海洋模式的强迫场经双线性插值得到的资料，这样在海表强迫场资料精度不变的条件下，一方面便于比较模式分辨率提高对模式性能的改进；另一方面，由于改进模式的目的在于提高对海洋大尺度环流的描述，而非中小尺度现象的研究，因此该方法是可行的。海表面的盐度采取了系数为 90d 的恢复边界条件。

随着分辨率的提高，模式对次网格参数化的依赖性减小。在 L30T63 海洋模式中水平粘性系数为 $5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ ，改进的模式中水平粘性系数在南北纬 10° 之间 $5 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ，其余海域为 $2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。水平粘性系数的减小，使得改进的模式计算的环流普遍增强，在热带低纬海域和西边界区域非常明显。改进的模式中垂直粘性系数不变，沿用 L30T63 海洋模式中依赖于 Richardson 数的垂直扩散方案和等密度面扩散方案。模式地形场采用美国海军海洋办公室 (Naval Oceanographic Office) DBDB5 (Digital Bathymetric Data Base 5 minute) 海洋深度资料，其分辨率为 $(1/12)^\circ$ 。

在 spinup 改进的模式 100a 的基础上，将 1950 年 1 月~1999 年 12 月的 CPNE 月平均海表面资料加入模式中，作为控制试验强迫改进的模式积分 50a，本文截取 1959 年 1 月~1998 年 12 月的控制试验 40a 积分结果讨论 ENSO 的形成和演变机制。

3 热带太平洋海温年际变化的数值模拟结果分析

使用 Reynolds 资料，对热带太平洋 40a(1959.1~1998.12 年)的海表面温度距平 (SSTA)

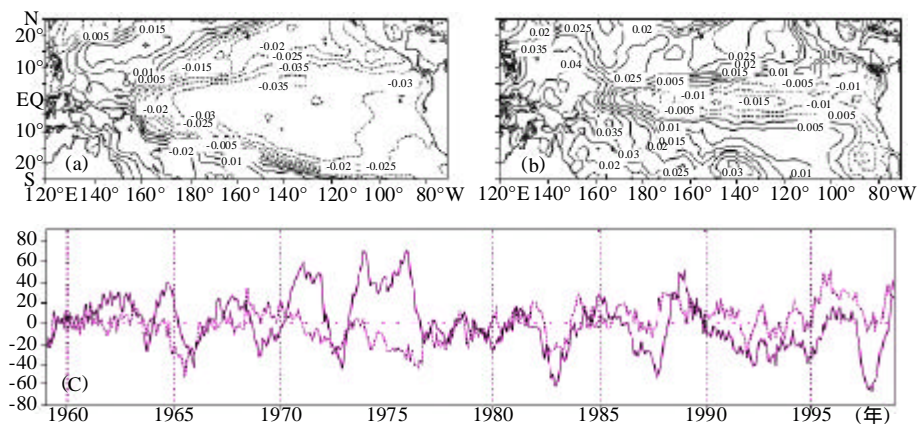


图1 Reynolds 资料得到的热带太平洋海表温度距平 EOF 分析的前两个特征向量(a, b)及其对应的时间主分量(实线和虚线分别为第一、二特征向量的时间主分量)(c)

进行 EOF 分析,图 1 给出了前两个特征向量的空间分布及其对应的时间系数。分析的结果表明,热带太平洋 SSTA 的空间分布第 1 模态呈横“V”形结构(见图 1a),解释方差为 29.1%,大值区位于赤道中东太平洋,其余地区的空间特征值较小,其时间系数(见图 1c 中实线)表现出非常明显的年际变化特征。第一模态特征向量分布类似于 La Niña 期间热带太平洋 SSTA 的分布,其对应的时间系数与 nino3 区 SSTA(即 nino3 区指数)的变化(图略)基本一致,两者的同时相关系数最大,达到-0.853(超过 0.05 信度),因此可认为第 1 模态的结构是典型的 ENSO 型 SSTA 分布的反映。热带太平洋 SSTA 的空间分布第 2 模态解释方差为 11.8%,大值区位于西太平洋暖池区和热带中太平洋的赤道两侧(见图 1b)。

对控制试验模拟的热带太平洋 SSTA 进行 EOF 分析(见图 2)。模拟的热带太平洋 SSTA 第一模态解释方差为 33.2%,第二模态解释方差为 10.1%。图 1 与图 2 的对比可知,模拟的前两个特征向量的分布特征与资料分析的结果基本相同,其对应时间主分量的时间演变与资料分析的结果也极为相近。

图 3 给出了由 Reynolds 资料(阴影区)和模拟结果(实线)得到的 NINO3 指数随时间的变化。图中显示了从 1959 年~1998 年期间发生的 El Niño 事件和 La Niña 事件在模式中都能得到体现,其中模拟的 1960 年代的 NINO3 指数偏小,1979 年~1980 年 NINO3 指数偏大。总体来说,模式具有模拟 ENSO 年际变化的能力。

4 模拟结果的合成分析

对 1959 年~1998 年出现的 6 次(1965、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1997~1998 年)较强 El Niño 进行合成分析。由于在 El Niño 年,El Niño 事件爆发的时间不尽相同,因此不能简单地将各个 El Niño 发生年相加后求平均,本文取 El Niño 发生年 Nino3 指数最大的月份为基准(作为第 24 个月)前推 24 个月,将各次 24 个月的距平场进行合成,作为 El Niño 的爆发前一年和爆发年,以此探讨 El Niño 形成和发展的机理。

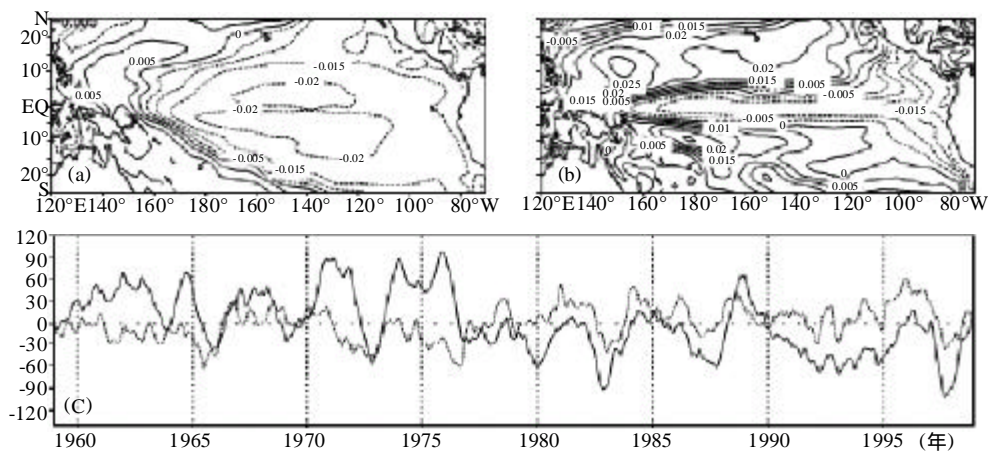


图 2 同图 1，为模式模拟结果

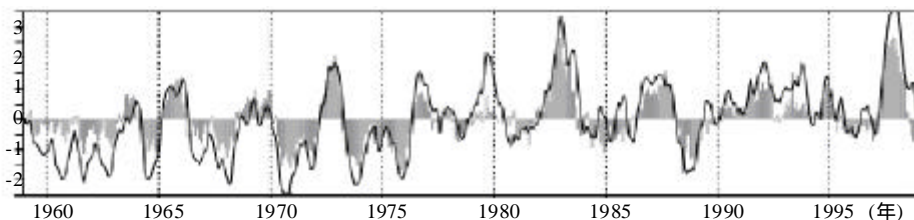


图 3 Reynolds 资料(阴影区)和模拟结果(实线)得到的
NINO3 指数随时间的变化(单位:)

定义赤道西太平洋地区 ($120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 海表面平均纬向风应力距平指数 (以下简称纬向风指数) 来讨论纬向风异常对 El Niño 发生的作用。为了便于比较, 图 4 给出了由 Reynolds 资料和数值模拟结果合成的 NINO3 指数及 CPNE 资料计算得到的纬向风指数随时间的演变。Reynolds 资料和数值模拟给出的 NINO3 指数的变化趋势是一致的, 其大小也很相近, NINO3 指数在合成的第 15 月开始由负转正, 到第 17 月时达到 0.5, El Niño 事件爆发, 到第 24 月 El Niño 事件发展到鼎盛时期。图 4b 表明赤道西太平洋纬向风应力距平在 El Niño 爆发的前一年以异常东风为主, 在第 13 月西风开始爆发。本文分别选取合成的第 6 月、14 月、17 月和 24 月代表 El Niño 的前期、西风爆发期、初期和鼎盛期进行分析。

从模拟的赤道太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) 平均 SSTA 的时间变化趋势 (见图 5a) 可以看出, 在 El Niño 爆发之前, 赤道太平洋 SSTA 存在稳定的中、东负西正的反相分布特点, El Niño 爆发后, 暖池区正 SSTA 东传, 赤道太平洋 SSTA 分布的形势基本上与爆发前相反。在赤道太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) 的次表层 (50~150m) 平均海温距平 (SOTA) 的时间变化趋势同 SSTA 的变化趋势大体相同 (见图 5b), 对比图 5a 和图 5b 可以看出, 正 SOTA 的东传要先于 SSTA 的东传。

分析不同 El Niño 位相的热带太平洋表层洋流距平的模拟结果 (见图 6) 可知, 在

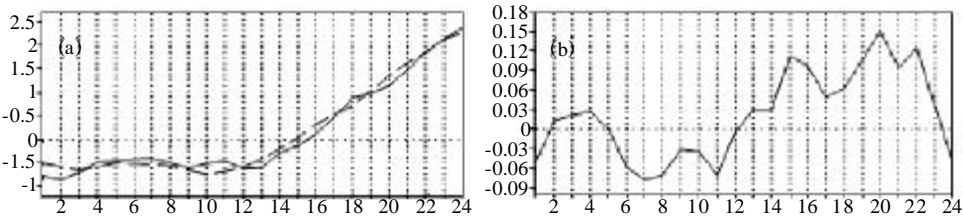


图 4 Reynold 资料(实线)和数值模拟结果(虚线)合成的 NINO3 指数(a)、纬向风指数(b)随时间的演变 (横坐标为合成的月份;纵坐标单位: a. , b. N/m^2)

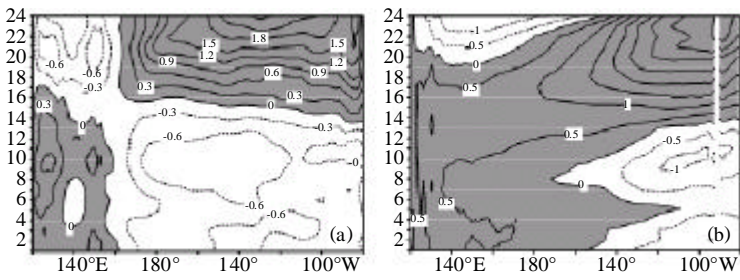


图 5 模拟的赤道太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) 平均 SSTA(a)和 SOTA(b)的时间-经度剖面 (阴影区为正距平,等值线间隔 0.3 ,纵坐标为合成的月份)

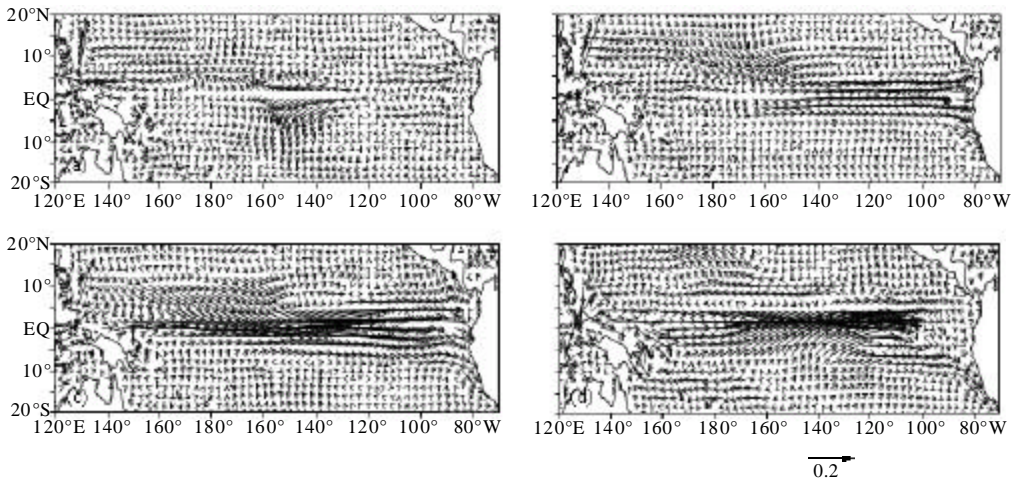


图 6 模拟的热带太平洋洋流距平在不同 El Niño 位相的水平矢量图 (单位: m/s)
(a. 第 6 月、b. 第 14 月、c. 第 17 月、d. 第 24 月)

El Niño 的前期,异常东风作用下赤道太平洋海水西向异常流动,在赤道西太平洋异常堆积,科氏力的作用及海水的离岸流动使海水在赤道中、东太平洋辐散,海面高度距平(SSHA)降低(图略);西风爆发之后,赤道太平洋表层出现东向的距平流,科氏力的作用使海水向赤道辐合,向岸流动的海水开始在东赤道太平洋堆积,海面高度异常升高;从 El Niño 爆发到盛期,赤道太平洋为一致的东向距平流,异常洋流在赤道中、东太平洋

形成辐合带,这与该区海表高度距平脊是相对应的,而在赤道西太平洋离岸的异常洋流使暖池区海表高度距平降低。

图 7 为模拟的沿赤道 ($2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) 垂直剖面平均洋流距平矢量在不同 El Niño 位相的分布。在 El Niño 的前期,在异常东风的作用下,海水在赤道中、东太平洋异常涌升,在赤道西太平洋异常下沉,构成了赤道次表层逆时针异常环流,该异常环流与西部 SSHA 增加、次表层海水异常增温以及中、东部 SSHA 降低、次表层海水异常降温是相对应的(见图 7a);西风爆发后,海水在赤道东太平洋堆积,并辐合下沉,与中赤道太平洋上升流构成了顺时针的异常环流,赤道东太平洋海水异常下沉导致次表层海水异常增暖(见图 7b);El Niño 爆发后,赤道中、东太平洋海水异常堆积,导致该区存在显著的异常下沉(见图 7c);在 El Niño 发展到盛期时,赤道中太平洋的海水下沉明显,赤道东太平洋 100m 以下存在较强的海水异常涌升(见图 7d),这可能是导致赤道东太平洋次表层海温距平中心较浅的主要原因。

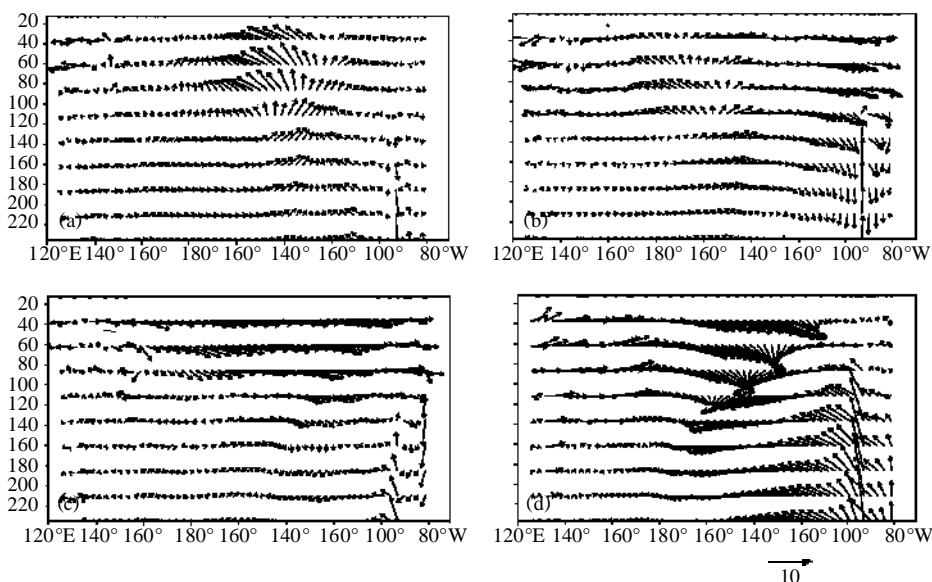


图 7 模拟的沿赤道 ($2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) 垂直剖面平均洋流距平矢量在不同 El Niño 位相的分布

(纬向速度单位: 10^{-2}m/s , 垂直速度单位: 10^{-6}m/s)

a. 第 6 月 b. 第 14 月 c. 第 17 月 d. 第 24 月

由海水温度方程可知,构成表层海温变化的因素有平流过程、垂直输送过程、表面热交换、太阳短波透射以及海水扩散;在表层以下引起海温变化的主要因子有平流过程、垂直输送过程、海水扩散。通过分析模式这些过程引起的异常加热率(图略)可知,平流过程对赤道太平洋 SSTA 的 El Niño 模态的形成和发展起到了主要的作用;垂直输送过程对赤道太平洋 SOTA 的 El Niño 模态形成和发展的贡献是主要的。

5 结论

通过以上分析可以得到一个清晰的 El Niño 发生、发展机制的物理图象:在 El Niño 的前期,在异常东风作用下赤道太平洋海水西向异常流动,在赤道西太平洋异常堆积,导致该地区海水下沉增暖,科氏力的作用和海水离岸流动使海水在赤道中、东太平洋辐散,海面高度降低,海水涌升造成表层和次表层海水异常降温;西风爆发后,赤道中、东太平洋海水异常东向流动,科氏力的作用及海水的向岸流动使海水在赤道中、东太平洋辐合,SSHA 和 SSTA 升高,下沉的次表层海水异常增暖;随着异常西风的持续增强,在赤道中、东太平洋次表层正海温距平不断增加,最终导致 El Niño 爆发,此时距西风爆发大约滞后 3~4 个月的时间,在赤道地区异常垂直经向环流使海水在赤道两侧涌升,上升的海水造成赤道两侧 SOTA 的降低,暖池区海水在异常西风的作用下离岸流动使得 SSHA 和 SSTA 降低,海水涌升使次表层温度距平降低;随着 El Niño 的发展,热带东太平洋正 SSHA 不断增加,热带中、西太平洋 SSHA 不断降低,热带太平洋表层和次表层海温距平呈现西负东正的反位相特点,El Niño 达到鼎盛时期。由此可见,西风爆发引起表层洋流异常,异常的平流作用是 SSTA 形成 El Niño 模态的主要原因;表层洋流异常及由其引起的海表高度异常可导致次表层海水垂直输送的异常,异常的垂直输送作用是形成次表层海温 El Niño 模态的主要原因。

参考文献:

- [1] Bjerknes J, A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 1966,18 :820~829.
- [2] Bjerknes J, Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev*, 1969,97 : 163~172.
- [3] Wyrtki K, El Niño-the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5 :572~584.
- [4] McCreary J P, A model of tropical ocean-atmosphere interaction. *Mon Wea Rev*, 1983,111 :370~387.
- [5] McCreary J P, Anderson D L T, A simple model of El Niño and the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1984,112 :934~946.
- [6] Anderson D L T, McCreary J P, Slowly propagating disturbances in a coupled ocean-atmosphere model. *J Atmos Sci*, 1985,42 :615~628.
- [7] 于慧琴,蒲书箴. 1986/1987 厄尔尼诺期间的西风强化和海气相互作用过程分析[J]. *大气科学*, 1992 ,16 :427~435.
- [8] 傅云飞,黄荣辉. 热带西太平洋西风异常对 ENSO 事件发生的作用[J]. *大气科学*, 1996 ,20(6) :641~653.
- [9] 傅云飞,黄荣辉. 东亚西风异常活动对热带西太平洋西风爆发及 ENSO 发生的作用[J]. *大气科学*, 1997 ,21 :487~492.
- [10] 黄荣辉,张人禾,严邦良. 热带西太平洋纬向风对 ENSO 循环的动力作用[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2001 ,31 (8) :697~704.
- [11] 刘海龙,张学洪,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 ,25(3) :303~315.
- [12] 穆明权,李崇银,西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用[J], *大气科学*, 2000 ,24(4) :447~458.
- [13] Cronin M F, McPhaden M J, The upper ocean heat balance in the western equatorial Pacific warm pool during September-December 1992. *J Geophys Res*, 1997,102 :8533~8554.
- [14] Zhang R H, Rothstein L M, Busalacchi A J, Interannual and decadal variability of the subsurface thermal structure in the Pacific Ocean: 1961-90. *Climate Dynamic*, 1999,15 :703~717.
- [15] Wang Bin, Wu Ren-guang, Roger Lukas. Roles of western north Pacific wind variation in thermocline adjustment and ENSO phase transition. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999,77 (1) :1~16.

- [16] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 513~521.
- [17] Jin Xiangze, Zhang xuehong, and Zhou Tianjun. Fundamental Framework and Experiments of the Third Generation of IAP/LASG World Ocean General Circulation Model. Adv Atmos Sci, 1999, 16 (2): 197~215.
- [18] 刘海龙. 高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002.

STUDY ON MECHANISM OF OCCURRENCE OF THE ENSO

LI Dong-hui¹, ZHANG Gui², TAN Yan-ke³

(1. Meteorological and Hydrological Center of Military Area Command of Nanjing, Nanjing 210016, China; 2. Institute of Science, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China; 3. Institute of meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China)

Abstract : Based on the L30T63 oceanic general circulation model developed by Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, a higher horizontal resolution oceanic general circulation model, with homogeneous $1.5^{\circ} \times 1^{\circ}$ horizontal resolution, has been established by enhancing the horizontal resolution of the L30T63. The forming and evolvement mechanism of El Niño have been analyzed by simulated results (from January 1959 to December 1998) of the model. It is shown from the simulated results that the surface anomalous oceanic circulation is caused by the eruption of the westerly wind, as far as the forming of the El Niño mode of the sea surface temperature is concerned, the anomalous advection effect is the primary dynamical reason. The anomalous subsurface vertical and horizontal circulation resulted from the anomalous surface ocean current and the anomalous sea surface elevation is the primary reason for the forming of the El Niño mode of the subsurface sea temperature.

Key words : El Niño ; oceanic general circulation model ; temperature anomaly