

# 海洋平流的季节变化对 La Niña 事件成熟位相锁定的作用

严邦良

中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

**摘 要** 用一个中等复杂程度的热带海气耦合模式模拟 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的特征并研究其形成的机制。结果表明, 模式能很好地模拟观测到的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的特征。La Niña 事件成熟位相锁定在年底主要由海洋气候基本态引起。海洋垂直平均流是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的最主要因子。由海洋气候基本态的季节变化所引起的冷平流的季节变化是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的机制。在 La Niña 事件期间, 1~5 月份, 赤道中东太平洋地区的冷平流较弱, 它不能平衡海气热量交换过程的影响, 因而海洋表面温度增加。这一过程使海气耦合不稳定性减弱, 从而使 La Niña 事件衰减。6~12 月份, 赤道中东太平洋地区的冷平流较强。海气热量交换过程的影响不能平衡较强冷平流的影响, 因而海洋表面温度减小。这一过程使海气耦合不稳定性加强, 从而使 La Niña 事件发展。这样, La Niña 事件成熟位相容易出现在年底左右。

**关键词** 海气相互作用 位相锁定 ENSO 循环

文章编号 1006-9895(2005)02-0283-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

## The Role of the Seasonal Variation of the Oceanic Advection in the Locking of the La Niña Event Mature Phase to the End of the Year

YAN Bang-Liang

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

**Abstract** An intermediate complex ocean-atmosphere coupled model is used to simulate the characteristics of the mature phase locking of the La Niña event and explore the mechanisms of the locking of the La Niña event mature phase to the end of the year. The results show that the model can simulate the characteristics of the locking of the La Niña event mature phase to the end of the year. The oceanic climate basic state is responsible for the locking of the La Niña event mature phase to the end of the year. The upwelling is the most important factor for the La Niña mature phase locking. The seasonal variation of the advection generated by the seasonal variation of the oceanic climate basic states is the mechanism of the locking of the La Niña event mature phase to the end of the year. During La Niña event period, the cool advection, generated by the oceanic climate basic state from January to May, is weaker over the middle and eastern equatorial Pacific. The weaker cool advection makes the Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) increase, which makes the ocean-atmosphere coupled instability strength decrease, thus, the La Niña event decays. And the cool advection, generated by the oceanic climate basic state from June to December, is stronger over the middle and eastern equatorial Pacific. The stronger cool advection makes the SSTA decrease, which makes the ocean-atmosphere coupled instability strength increase, thus, the La Niña event develops. Finally, a minimum of cool SSTA occurs at the end of the year, which forms the La Niña event mature phase.

**Key words** ocean-atmosphere interaction, phase locking, ENSO cycle

## 1 引言

观测表明, ENSO 事件具有很强的位相锁定及不规则振荡特征<sup>[1,2]</sup>。基于 Zebiak-Cane 模式<sup>[3]</sup>(简称 Z-C)和概念模式的结果,人们认为 ENSO 循环的固有频率与季节循环的非线性共振是 ENSO 循环不规则性及位相锁定的机制<sup>[4,5]</sup>。但是,它不能解释 ENSO 事件位相锁定在具体季节的机制。例如,为什么 ENSO 事件成熟位相一般在年底左右达到,以及为什么 El Niño 事件容易在春季或初夏发生。Tziperman 等<sup>[6]</sup>通过在时滞振子方程<sup>[7-10]</sup>中引入耦合不稳定性度的季节变化,研究 El Niño 事件成熟位相锁定在年底左右的机制。得到强不稳定期间产生的 Rossby 波经西边界反射而产生的冷 Kelvin 波与弱不稳定期间产生的暖 Kelvin 波的平衡是 El Niño 事件成熟位相锁定在年底左右的机制。

观测中,除了 El Niño 事件成熟位相锁定在年底左右外, La Niña 事件成熟位相也更容易在年底左右出现。An 等<sup>[2]</sup>用 Z-C 模式研究了 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的机制。结果表明,基本态海洋斜温层深度的季节变化和 La Niña 事件成熟位相前及其以后在赤道西北太平洋地区的西风异常对 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右起重要作用。An 等<sup>[2]</sup>认为气候基本态斜温层深度在夏季较厚,在秋季较薄。在 La Niña 事件的成熟位相附近,通过垂直温度平流过程,较深的气候基本态斜温层使赤道东太平洋地区的海气耦合强度减弱,较薄气候基本态斜温层使赤道东太平洋地区的海气耦合强度加强,从而使 La Niña 事件的成熟位相在年底达到(简称 An-W 机制)。An-W 机制是建立在 SSTA(海表温度异常)与斜温层厚度之间为正反馈机制的基础之上的。但是,在 Z-C 模式模拟的 La Niña 事件成熟位相附近 SSTA 与斜温层厚度之间为负反馈机制(图 1)。这意味着 An-W 机制可能不是 Z-C 模式所模拟的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的机制。因此, La Niña 事件成熟位相锁定在年底的机制仍然是一个值得继续研究的问题。

中等复杂程度的海气耦合模式(ICM)常被用来研究 ENSO 循环的机制<sup>[3,11-13]</sup>。ICM 具有物理机制容易理解和计算简单的优点。但现有的 ICM 具有一些缺点。例如, Z-C 模式不能描写赤道太平洋地区的纬向风异常的年际变化,而那里的纬向风异常的年际变化对 ENSO 事件的激发和演变有重要作用<sup>[4,15]</sup>。Dewitte 和 Perigaud<sup>[16]</sup>指出,在观测中的 La Niña 事件期间,赤道中东太平洋地区 SSTA 与斜温层厚度与 SSTA 之间随时间的变化具有相同的位相。改变次表层海温异常的参数化方法, Dewitte 和

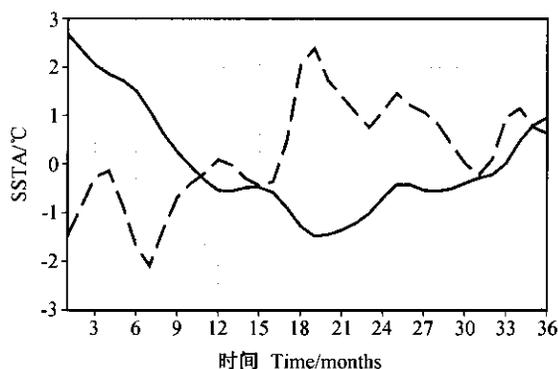


图 1 标准状态下 Z-C 模式模拟的合成的 La Niña 事件期间 Niño 3 区的 SSTA(实线,单位:°C)垂直平均流对 SSTA 垂直梯度的平流项  $-\Delta T/M(\bar{w})T_2$ (虚线,单位:0.1°C)随气候月的演变。横坐标代表月,如 13,25 代表 1 月,14,26 代表 2 月等

Fig. 1 Temporal evolution of composite averaged Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA) (solid line, units: °C) and the advection of the annual mean of upwelling on the anomalous temperature gradient  $[-\Delta T/M(\bar{w})T_2]$  (dashed line, units: 0.1°C) over the Niño-3 area (5°S-5°N, 150°W-90°W) during La Niña event period simulated by the Z-C model in the control run. The abscissa represents integration time

Perigaud<sup>[16]</sup>得到 Z-C 模式中的 SSTA 与斜温层厚度与 SSTA 之间随时间的变化具有相同的位相。

严邦良等<sup>[13]</sup>发展了一个中等复杂程度的热带海气耦合模式(简称 YHZ 模式)。YHZ 模式可以模拟观测到赤道太平洋地区纬向风异常的年际变化及其传播特征。在 YHZ 模式中改进了次表层海温异常的参数化方案,使斜温层厚度与 SSTA 之间在 ENSO 事件的成熟位相附近成为正反馈机制。本文的目的是用 YHZ 模式模拟并研究 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的机制。

## 2 模式

### 2.1 海洋模式

海洋模式由两部分组成。第一部分为含有一个垂直模的浅水波方程。它被广泛地用来研究 ENSO 循环的机制<sup>[17-24]</sup>。本文采用 Battisti<sup>[11]</sup>的版本,时间和空间中央差方案被用来解浅水波方程,其东、西边界上的值用特征线方法给出。第二部分为热力学方程,除了次表层海温异常的参数化方案不同之外,它与 Z-C 和 Battisti<sup>[11]</sup>所使用的方程相同。在离散热力学方程的过程中,时间与空间方向都采用中央差方案。海洋模式的区域为(29°S~29°N, 124°E~80°W)。用 FSU(Florida State University)风应力异常来强迫海洋模式,模式可以较好地模拟出 Niño3 区(5°S~5°N, 150°W~90°W)SSTA 随时间的变化,在观测与模拟之间的相关系数可达 0.9<sup>[13]</sup>。

次表层海温异常的参数化方案仿照文献 [16]:

$$T_{\text{sub}} = T_1 \left[ \tanh\left(\frac{\bar{h} + \lambda |h|}{b_1}\right) - \tanh\left(\frac{\bar{h}}{b_1}\right) \right], \quad (1)$$

式中  $\bar{h}$ ,  $h$  的定义与 Z-C 模式中的相同,  $\lambda = 2.5$ 。当  $h > 0$  时,  $T_1 = 28^\circ\text{C}$ , 在  $130^\circ\text{W}$  以西,  $b_1 = 92 \text{ m}^{-1}$ ,  $100^\circ\text{W}$  以东,  $b_1 = 80 \text{ m}^{-1}$ ; 当  $h \leq 0$  时,  $T_1 = -26^\circ\text{C}$ , 在  $130^\circ\text{W}$  以西,  $b_1 = 70 \text{ m}^{-1}$ ,  $100^\circ\text{W}$  以东,  $b_1 = 60 \text{ m}^{-1}$ ; 在  $130^\circ\text{W} \sim 100^\circ\text{W}$  之间,  $b_1$  的值由线性插值给出。

本文所采用的  $T_{\text{sub}}$  参数化方案使得 SSTa 与斜温层厚度之间呈正反馈机制(图 2), 它与观测较为一致<sup>[16]</sup>。

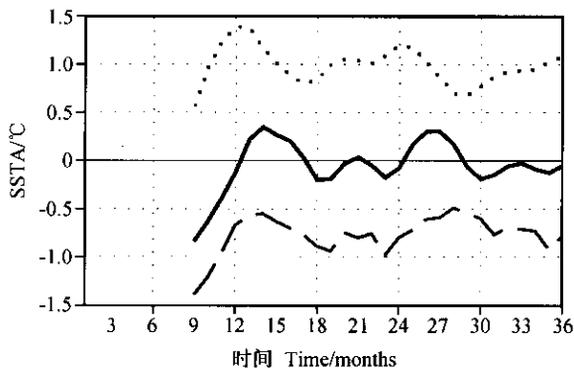


图 2 海洋热力学方程中  $T_t$ (实线)垂直平均流对 SSTa 垂直梯度的平流项  $-M(\bar{W} + w)T_t$ (虚线)和热量通量交换项  $(-\alpha_s T_t)$ (点线)Niño 3 区的平均随时间的变化。横坐标代表模式月,如 1 月代表 28 模式年 1 月

Fig. 2 The variation with time of averaged  $T_t$ (solid line), the advection of the annual mean of upwelling on the anomalous temperature gradient  $(-M(\bar{W} + w)T_t)$ (dashed line) and the heating flux  $(-\alpha_s T_t)$ (dotted line) over the Niño-3 area during a La Niña event period. The abscissa is time, for example, 1 is January of the 28th model year

## 2.2 大气模式

大气模式采用 Gill<sup>[25]</sup>模式。赤道西太平洋地区纬向风异常的模拟对大气模式中的潜热加热方案比较敏感,在大气模式中 Kleeman<sup>[26]</sup>采用了与 Z-C 不同的潜热加热方案,改善了赤道西太平洋地区纬向风异常的模拟。因此,大气模式中潜热加热方案采用 Kleeman<sup>[26]</sup>方案。大气模式加热中有关 SSTa 加热项同 Z-C。为了采用同步耦合方案,大气模式中的时间发展项被保留。时间和空间中央差方案被采用。大气模式的区域为  $(29^\circ\text{S} \sim 29^\circ\text{N}, 0^\circ \sim 360^\circ)$ 。

## 2.3 海气耦合模式

将离散的大气与海洋模式耦合,并采用同步耦合方案,耦合时间步长为 30 min。对耦合模式的积分表明,耦合模式能较好地模拟 ENSO 循环的基本特点(称为控制试验,TEST)。例如,ENSO 循环振荡的不规则性、传播特征及赤道西太平洋地区纬向风异常具有年际变化等<sup>[13]</sup>。

## 3 模拟与观测的 La Niña 事件成熟位相锁定特征

用 Niño3 区  $(5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}, 150^\circ\text{W} \sim 90^\circ\text{W})$  SSTa 的平均来定义 La Niña 事件。当 Niño3 区的 SSTa 的平均连续 6 个月等于或小于  $-0.5^\circ\text{C}$  时,就定义它为一个 La Niña 事件。在控制试验中( TEST)积分模式 200 年。图

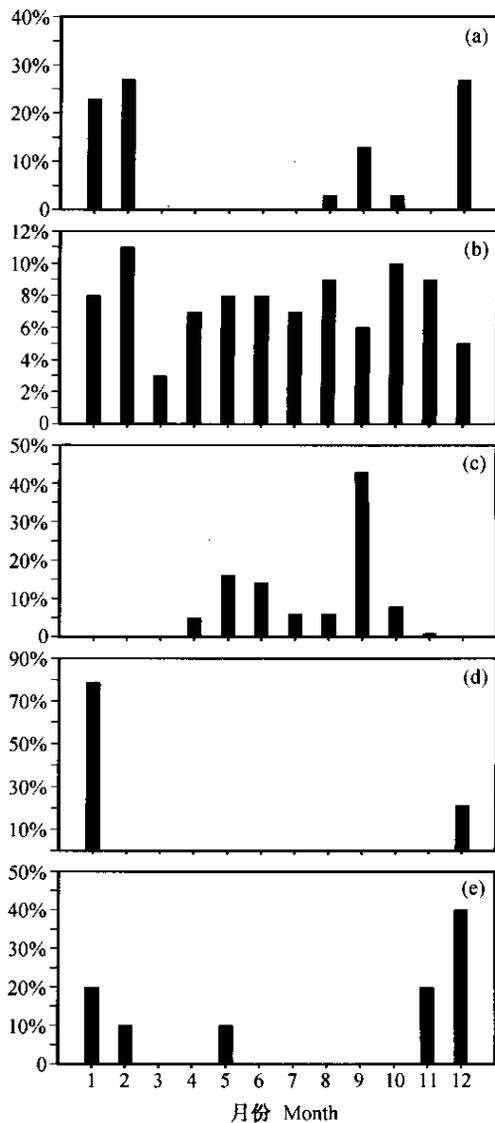


图 3 模拟和观测的 La Niña 事件峰值出现的百分比率 (a) TEST(控制试验);(b) NTEST(气候基本态为年平均);(c)  $F(\text{air})$ (大气气候基本态有季节循环,海洋气候基本态为其年平均);(d)  $F(\text{sea})$ (海洋气候基本态有季节循环,大气气候基本态为其年平均);(e) 观测(1950 ~ 2002)

Fig. 3 The percentage of the peak month of the La Niña event. (a) For TEST (control run); (b) for NTEST (annual average as the basic state); (c) for  $F(\text{air})$  (the atmosphere basic state has seasonal variation while the ocean basic state is in its annual mean); (d) for  $F(\text{sea})$  (the ocean basic state has seasonal variation while the atmosphere basic state is in its annual mean); (e) for the observations (1950 - 2002)

3 是模拟和观测<sup>[27]</sup>的 La Niña 事件峰值出现的比率。比较图 3a 与 e, 我们看到观测和模拟的 La Niña 事件成熟位相都容易发生在年底左右。

当大气与海洋的气候基本态都被取为年平均(称为试验 NTEST) 模式模拟的 La Niña 事件峰出现比率分布比较均匀(图 3b)。这说明模拟的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右是由气候基本态的季节变化造成的。

模式还模拟出了观测中的 La Niña 事件的多峰结构及其位相锁定特征。图 4 是 1950 ~ 2002 年期间所发生的 La Niña 事件。在图 4a, e ~ j 中, SSTA 具有 1 ~ 2 个次极小值点, 这些极小值点大多数在年底左右达到。图 5 是模拟的具有多峰结构的 La Niña 事件的不同类型, 从图中可以看到, 模拟的 La Niña 事件多峰结构与观测到的相当一致。

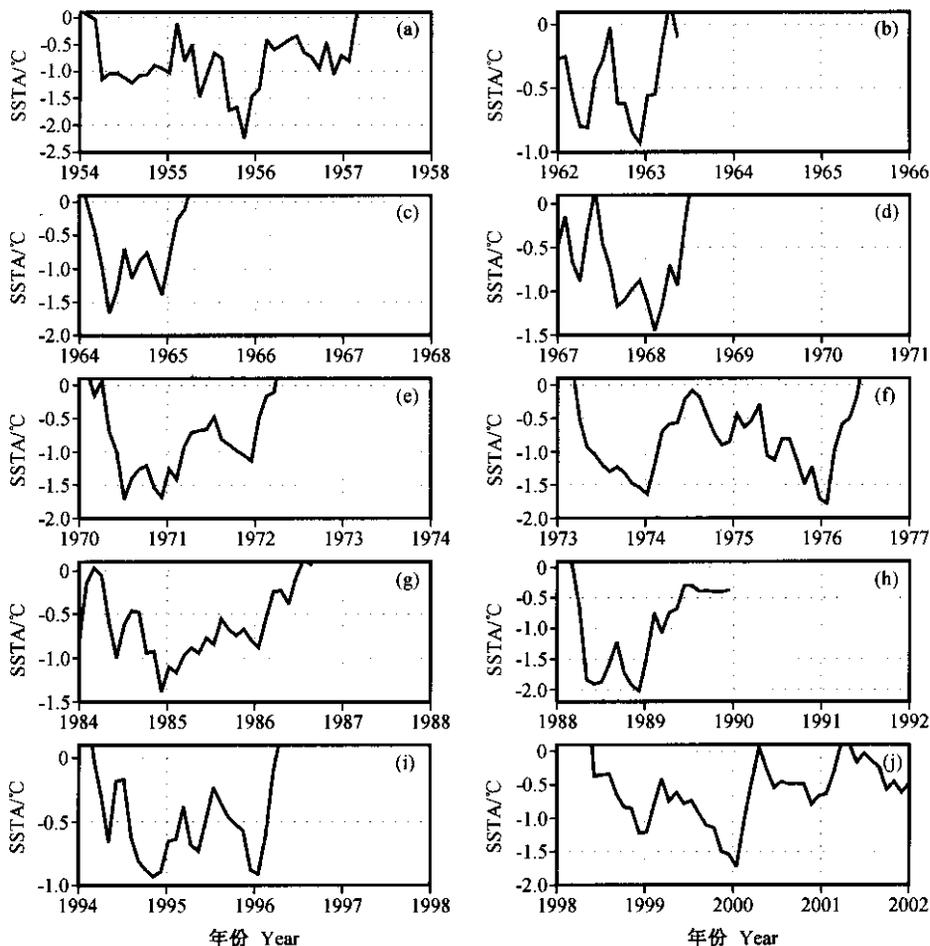


图 4 观测的 La Niña 事件期间 Niño 3 区的 SSTA 的平均随时间变化

Fig. 4 The variation with time of averaged SSTA over the Niño - 3 area during observed La Niña events from 1950 to 2002

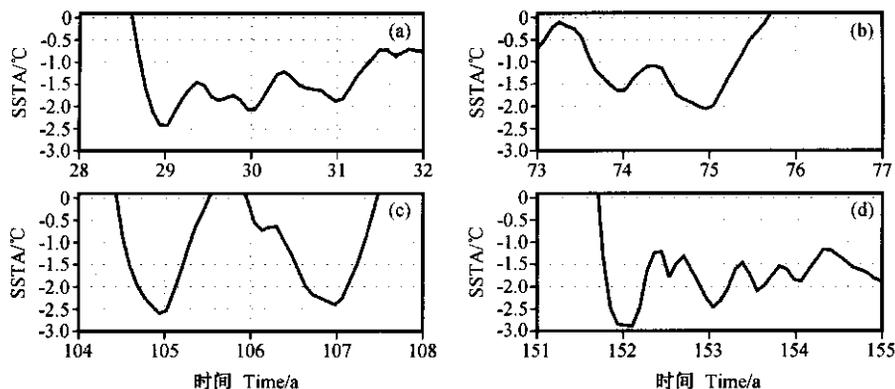


图 5 模拟的 La Niña 事件多峰结构类型 横坐标代表模式年

Fig.5 The types of the simulated La Niña events. The abscissa represents the model year

### 4 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的机制

#### 4.1 合成偏差的定义及合成偏差与 La Niña 事件成熟位相锁定之间的关系

气候基本态对 ENSO 循环模拟的影响具有季节变化<sup>[3]</sup> 我们用合成偏差来描述这种变化。首先,定义控制试验 (TEST) 中的偏差和合成偏差。我们设计试验 TEST<sub>*i*</sub> 和 NTEST。试验 TEST<sub>*i*</sub> 中的气候基本态被指定为第 *i* 月 (*i* = 1, 2, 3, ..., 12), 试验 NTEST 中的气候基本态为其年平均。对于同一个初值将 TEST<sub>*i*</sub> 和 NTEST 积分 1 个月, 然后把所得的结果相减。其差值为第 *i* 月份气候基本态的季节偏差对 ENSO 循环的贡献。为使结果更具代表性, 我们选取多个初值。在控制试验中, 13 模式年 5 月至 15 模式年 3 月处于模式 La Niña 事件期间。在这一期间内, 每隔 2 个月保留 1 次值 (共 12 次) 为试验 TEST<sub>*i,j*</sub> 和 NTEST<sub>*j*</sub> 的初值 (*j* 为初值的序号 *j* = 1, 2, 3, ..., 12)。

设  $T_{i,j}, \bar{T}_j$  分别为 TEST<sub>*i,j*</sub> 和 NTEST<sub>*j*</sub> 中 Niño 3 区 (5°S ~ 5°N, 150°W ~ 90°W) 海表温度异常 (SSTA) 的平均。则可称  $\Delta T_{i,j} = T_{i,j} - \bar{T}_j$  为偏差 (其中 *j* 代表不同的初值, 共 12 组)。称  $\Delta T_i = \sum_{j=1}^{12} \Delta T_{i,j} / 12$  为合成偏差。

图 6 是  $T_{i,j}, \Delta T_i$  随气候月的变化。从图 6a 可以看到, 1 ~ 7 月份, 不同初值时的偏差之间很接近, 8 ~ 12 月份, 它们之间比较接近。平均而言, 1 ~ 5 月份, 合成偏差是正的, 6 ~ 12 月份, 合成偏差是负的。比较图 6b 与图 2a, 我们可以看到, 合成偏差在年底左右由负值变成正值, 试验 TEST 中的 La Niña 事件的成熟位相容易在年底左右出现。当计算合成偏差的初值取自所有的 La Niña 事件的峰值处时, 其结果与初值取自同一个 La Niña 事件的结果几乎相同 (图 6 中的虚线)。说明合成偏差对初值不敏感。它说明对一类广泛取自 La Niña 事件区间的初值而言, 各月气候基本态对 La Niña 事件振幅的影响可以用合成偏差来描述。从图 6b 可以看出, 在 6 ~ 12 月期间, 气候基本态的影响使 La Niña 事件的振幅随时间减少, 而在 1 ~ 5 月份使 La Niña 事件的振幅随时间增加, 并且这种减少和增加还会被海气耦合不稳定过程放大。因此, La Niña 事件容易在年底左右发生。

用同样的方法, 我们可以计算敏感性试验中的偏差和合成偏差。首先, 计算只含有大气的海洋气候基本态季节变化试验中的合成偏差。为此, 我们设计两

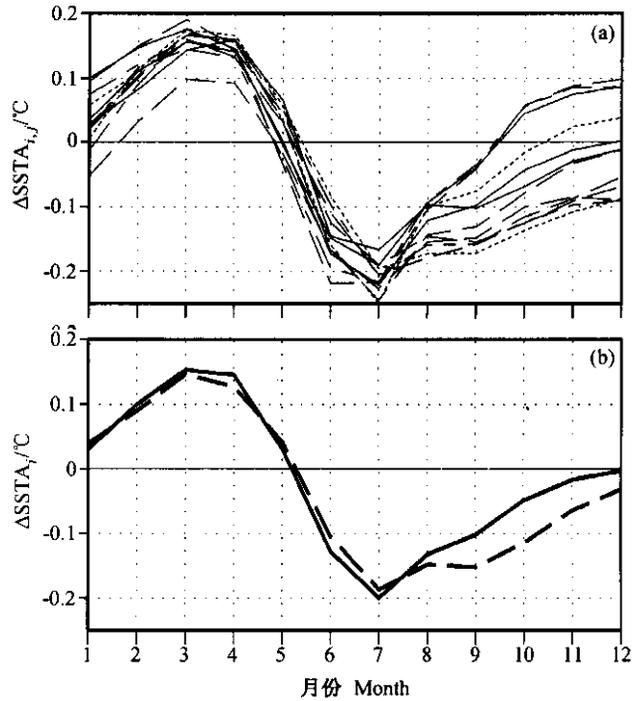


图 6 TEST<sub>*i,j*</sub> 中  $\Delta T_{i,j}$  (a) 与  $\Delta T_i$  (b) 的季节变化。图 b 中的实线、虚线分别对应初值选自同一个 La Niña 事件不同时间和所有 La Niña 事件峰值处的合成偏差

Fig. 6 The seasonal variation of  $\Delta T_{i,j}$  (a) and  $\Delta T_i$  (b) in TEST<sub>*i,j*</sub>. The solid line in (b) represents the composite deviation of the initial values chosen from the same La Niña event, and the dashed line, that chosen from all peaks of the simulated La Niña events

个试验 ( $F(\text{air})$  和  $F(\text{sea})$ )。在  $F(\text{air})$  [ $F(\text{sea})$ ] 中, 大气 (海洋) 气候基本态具有季节变化, 海洋 (大气) 气候基本态为其年平均。结果表明, 试验  $F(\text{air})$  [ $F(\text{sea})$ ] 中, La Niña 事件成熟位相容易出现在 9 月 (图 3c) 12 月和 1 月 (图 3d) 附近。比较图 3a, c, d, 可以看到图 3a 与图 3d 之间很接近, 说明海洋气候基本态的季节变化是所模拟的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的主要因素。一个自然的问题是海洋气候基本态中各分量在 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的作用是什么。

海洋气候基本态包括垂直速度 ( $\bar{W}$ )、水平速度 ( $\bar{U}, \bar{V}$ ) 及海表温度 ( $\bar{T}$ ) 的月平均。为叙述方便起见, 我们记试验  $F(x)$  为海洋气候基本态中只有 *x* 保持季节变化, 而其余基本态分量为其年平均。图 7a 代表试验  $F(\text{sea})$  和  $F(\text{all})$  (控制试验), 图 7b 代表  $F(\bar{T}), F(\bar{U}), F(\bar{V})$  和  $F(\bar{W})$  中的合成偏差随气候月的分布。从图 7 中可以看到  $F(\text{all}), F(\text{sea}), F(\bar{T}), F(\bar{U}), F(\bar{V})$  和  $F(\bar{W})$  中的合成偏差都在年底由负号变成正号。相应地,  $F(\text{all}), F(\text{sea}), F(\bar{T}), F(\bar{U}), F(\bar{V})$  和

$F(\bar{W})$  中的 La Niña 事件的成熟位相都在年底左右出现(图 3 8)

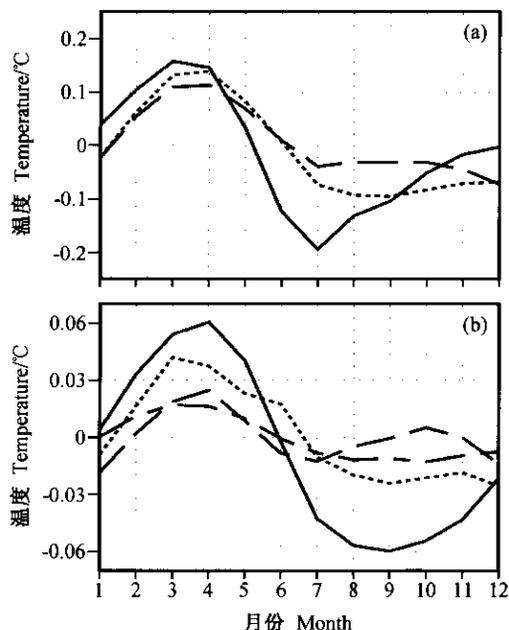


图 7 各个气候基本态分量季节变化引起的合成偏差  $\Delta T_i$  随时间的变化:(a)实线: $F(\text{all})$ 虚线: $F(\text{sea})$ 点线:图 b 中所有曲线的和 (b)实线: $F(\bar{W})$ 长虚线: $F(\bar{U})$ 长短虚线: $F(\bar{T})$ 点线: $F(\bar{V})$   
Fig. 7 The temporal variation of composite deviations ( $\Delta T_i$ ). The solid line and long dashed line in (a) represent respectively the cases of  $F(\text{all})$  and  $F(\text{sea})$ . The short dashed line in (a) represents the sum of those in  $F(\bar{W})$ ,  $F(\bar{U})$ ,  $F(\bar{T})$ , and  $F(\bar{V})$ . The solid, long-dashed, long-short dashed, and short dashed lines in (b) represent respectively the cases of  $F(\bar{W})$ ,  $F(\bar{U})$ ,  $F(\bar{T})$ , and  $F(\bar{V})$

这样可以得到如下结论, La Niña 事件的成熟位相容易在合成偏差由负值变成正值时出现。

显然,只有当  $F(x)$  中的合成偏差与控制试验中的合成偏差由负值变为正值的时间相近时,  $x$  才是 La Niña 事件成熟位相锁定的因子。 $F(\bar{T})$ ,  $F(\bar{U})$ ,  $F(\bar{V})$ ,  $F(\bar{W})$  和  $F(\text{all})$  中的合成偏差都在年底附近由负值变成正值,因此,  $\bar{T}$ ,  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$  和  $\bar{W}$  都是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的因子。

由于  $F(\text{sea})$  中的合成偏差与  $F(\bar{T})$ ,  $F(\bar{U})$ ,  $F(\bar{V})$ ,  $F(\bar{W})$  中合成偏差的和相当接近(图 7a),我们可以认为  $F(\text{sea})$  的合成偏差是由  $F(\bar{T})$ ,  $F(\bar{U})$ ,  $F(\bar{V})$ ,  $F(\bar{W})$  的合成偏差的线性叠加。 $F(\bar{W})$  的合成偏差振幅最大(图 7b),它对  $F(\text{sea})$  或  $F(\text{all})$  的合成偏差贡献最大。因此,我们可以把  $\bar{W}$  看成是 La Niña 事件成熟位相锁定的最重要因子。显然,  $\bar{V}$  可以被看成第二重要因子。

#### 4.2 合成偏差的季节变化与气候基本态季节变化之间的关系

合成偏差的季节变化是由气候基本态季节变化引起的平流季节变化产生的。我们定义  $\bar{T}_a$ ,  $\bar{U}_a$ ,  $\bar{V}_a$ ,  $\bar{W}_a$  分别为  $\bar{T}$ ,  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$ ,  $\bar{W}$  的年平均。若取时间步长  $\Delta t = 1$  个月,并采用时间向前差格式。对于相同的初值,  $F(\text{all})$  中的合成偏差完全由  $-\Delta t u(\bar{T} - \bar{T}_a)_x$ ,  $-\Delta t v(\bar{T} - \bar{T}_a)_y$ ,  $-\Delta t(\bar{U} - \bar{U}_a)T_x$ ,  $-\Delta t(\bar{V} - \bar{V}_a)T_y$ ,  $-\Delta t[M(\bar{W} + w) - M(\bar{W}_a + w)]T_z$  组成。在 La Niña 事件期间的赤道东太平洋地区,  $w > 0$ , 因此,  $M(\bar{W} + w) - M(\bar{W}_a + w) \approx \bar{W} - \bar{W}_a$ 。很显然,合成偏差的季节变化

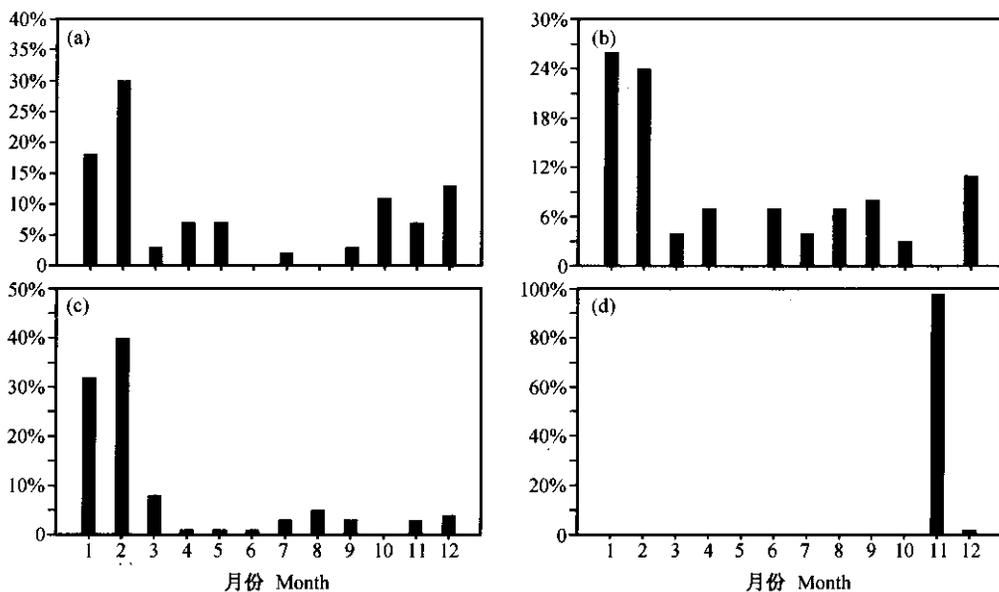


图 8 试验  $F(x)$  中 La Niña 事件峰值出现的比率 (a) $F(\bar{T})$  (b) $F(\bar{U})$  (c) $F(\bar{V})$  (d)  $F(\bar{W})$   
Fig. 8 The rate of the peak month of La Niña events for (a) $F(\bar{T})$ , (b) $F(\bar{U})$ , (c) $F(\bar{V})$ , and (d)  $F(\bar{W})$

主要由气候基本态的季节变化(如  $\bar{w} - \bar{w}_a$ )决定。从图 7 可以看出,  $F(\bar{w})$  和  $F(\bar{v})$  中的合成偏差最接近  $F_{all}$  中的合成偏差。因此, 我们只分析  $F(\bar{w})$  和  $F(\bar{v})$  中的合成偏差的季节变化与  $\bar{w} - \bar{w}_a$ ,  $\bar{v} - \bar{v}_a$  的关系。图 9a, b 分别是  $F(\bar{v})$  中  $-\Delta t(\bar{v} - \bar{v}_a)T_y$  和  $F(\bar{w})$  中  $-\Delta t[M(\bar{w} + w) - M(\bar{w}_a + w)]T_z$  合成(对 12 个初值的合成)的时间-经度(沿赤道)剖面图。分别比较  $F(\bar{v})$  (图 7b 中的短虚线)和  $F(\bar{w})$  (图 7b 中的

实线)的合成偏差与图 9a 和 b, 可以看到它们之间具有很好的同位相关关系。图 10 是  $\bar{v} - \bar{v}_a$  (沿  $2^\circ\text{N}$ ),  $\bar{w} - \bar{w}_a$  的时间-经度(沿赤道)剖面图。比较图 9 与 10, 可以看到, 它们之间有很好的反位相关关系。图 9 与 10 之间的反位相关关系是由于  $\bar{w}$  和  $\bar{v}$  在 1~5 月较小, 从而具有较弱冷平流, 6~12 月较大, 从而具有较强冷平流形成。注意: La Niña 事件成熟位相附近, 在赤道中东太平洋地区,  $T_z > 0$ , 赤道以北(南)  $T_y > 0$  ( $T_y < 0$ )。

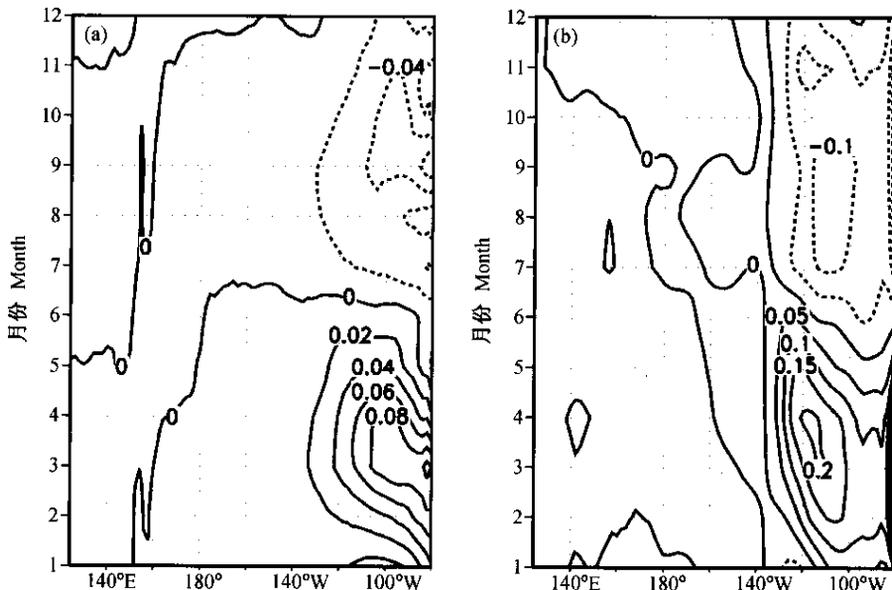


图 9  $F(\bar{v})$  中合成的  $-\Delta t(\bar{v} - \bar{v}_a)T_y$  (a) 和 (b)  $F(\bar{w})$  中合成的  $-\Delta t[M(\bar{w} + w) - M(\bar{w}_a + w)]T_z$  (b) 时间-经度剖面图(沿赤道, 单位:  $^\circ\text{C}$ )  
 Fig. 9 Time - longitude cross sections (along the equator) of (a) the composite  $-\Delta t(\bar{v} - \bar{v}_a)T_y$  in  $F(\bar{v})$  (a) and (b) the composite  $-\Delta t[M(\bar{w} + w) - M(\bar{w}_a + w)]T_z$  in  $F(\bar{w})$ . Units:  $^\circ\text{C}$

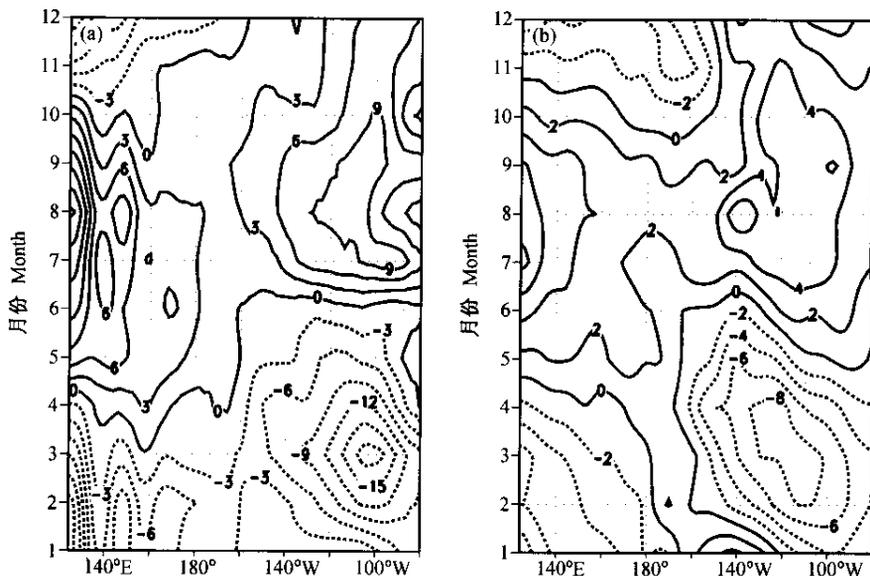


图 10  $\bar{v} - \bar{v}_a$  (a, 沿  $2^\circ\text{S}$ , 单位:  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和  $\bar{w} - \bar{w}_a$  (b, 沿赤道, 单位:  $10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 时间-经度剖面图  
 Fig. 10 Time - longitude cross sections of  $\bar{v} - \bar{v}_a$  (a, along  $2^\circ\text{S}$ , units:  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and  $\bar{w} - \bar{w}_a$  (b, along the equator, units:  $10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 4.3 气候基本态的季节变化与 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的关系

从上面的论述可以看到,由海洋气候基本态季节变化引起的冷平流在 6~12 月份较强,1~5 月份较弱。赤道中东太平洋地区由海气热量交换过程而获得的热量小于较强冷平流过程失去的热量,大于较弱冷平流过程失去的热量(图 2)。因此,在 6~12 月期间,SSTA 减少,耦合不稳定性增加,La Niña 事件发展。在 1~5 月期间,SSTA 增加,耦合不稳定性减小,La Niña 事件衰减。这样,容易在年底左右形成 La Niña 事件的峰值。如果 La Niña 事件持续时间较长,那么上述机制会产生 La Niña 事件的多峰结构,并且冷峰容易在年底左右达到。

## 5 结论

用一个中等复杂程度的热带海气耦合模式模拟并研究了 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的特征及其形成的机制。结果表明,模式可以很好地模拟观测到的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底左右的特征。

用本文定义的合成偏差可判断 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的因子及其重要程度。La Niña 事件成熟位相容易在合成偏差由负值变正值的时间出现。因此,只有当  $F(x)$  与  $F(\text{all})$  的合成偏差由负值变成正值的时间相近时, $x$  才是 La Niña 事件成熟位相锁定的因子。除此之外,如果  $F(x)$  与  $F(\text{all})$  中的合成偏差最接近,那么, $x$  是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的最重要因子。 $F(\bar{w}), F(\bar{v}), F(\bar{T})$  和  $F(\bar{U})$  中的合成偏差由负值变为正值的时间与  $F(\text{all})$  中的相近, $\bar{w}, \bar{U}, \bar{v}$  和  $\bar{T}$  是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的因子。 $F(\bar{w})$  中的合成偏差与  $F(\text{all})$  的最接近,与  $F(\bar{v})$  的次之。因此, $\bar{w}(\bar{v})$  是模式所模拟的 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的主(次)要因子。

海洋气候基本态季节变化所引起的冷平流季节变化是 La Niña 事件成熟位相锁定在年底的主要机制。由于  $\bar{w}, \bar{v}$  在 1~5 月份较小,6~12 月份较大(图 10),因而温度平流  $-\Delta t[M(\bar{w} + w)T_x + \bar{v}T_y]$  在 1~5 月份较弱,6~12 月份较强。在 6~12 月份,赤道中东太平洋地区海洋表面由海气之间的热量交换过程  $(-\alpha_s T)$  获得的热量小于较强冷平流过程失去的热量,SSTA 减小,海气耦合不稳定性加强,La Niña 事件发展。1~5 月份,赤道中东太平洋地区海洋表面由海气之间的热量交换过程  $(-\alpha_s T)$  获得的热量大于较弱冷平流过程失去的热量,SSTA 增加,海气耦合不稳定性减弱,La Niña 事件衰减。这样,La Niña 事件成熟位相

容易在年底出现。

## 参考文献

- [ 1 ] Rasmusson E, Carpenter T. Variations in tropical sea surface temperature surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 354~384
- [ 2 ] An S-I, Wang B. Mechanisms of locking of the El Niño and La Niña mature phases to boreal winter. *J. Climate*, 2001, **14**: 2164~2176
- [ 3 ] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2278
- [ 4 ] Jin F-F, Neelin D J, Ghil M. El Niño on the devil's staircase: Annual subharmonic steps to chaos. *Science*, 1994, **264**: 70~72
- [ 5 ] Tziperman E, Stone L, Cane M, et al. El Niño chaos: Overlapping of resonance between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, 1994, **264**: 72~74
- [ 6 ] Tziperman E, Cane M A, Zebiak S E, et al. Locking of El Niño's peak time to the end of the calendar year in the delayed oscillator picture of ENSO. *J. Climate*, 1998, **11**: 2191~2199
- [ 7 ] Suarez M J, Schopf P S. A delayed action oscillator for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 3283~3287
- [ 8 ] Graham N E, White W B. The El Niño cycle: A natural oscillator of the Pacific ocean-atmosphere system. *Science*, 1988, **240**: 1293~1302
- [ 9 ] Battisti D S, Hirst A C. Interannual variability in the tropical atmosphere-ocean system: Influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 1687~1712
- [ 10 ] Munnich M, Cane M A, Zebiak S E. A study of self-excited oscillations of the tropical ocean-atmosphere system. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 1238~1248
- [ 11 ] Battisti D S. Dynamics and thermodynamics of a warming event in a couple tropical atmosphere-ocean model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 2889~2919
- [ 12 ] Chang P, Ji L, Wang B, et al. on the interactions between the seasonal cycle and El Niño-Southern Oscillation in an intermediate coupled Ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 2353~2372
- [ 13 ] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. 一个可描写 ENSO 循环基本特点的简单热带海气耦合模式. 大气科学, 2002, **26**: 193~205  
Yan Bangliang, Huang Ronghui, Zhang Renhe. A simple tropical Pacific atmosphere-ocean couple model with ENSO cycle characteristics. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 37~50
- [ 14 ] 黄荣辉, 张人禾. ENSO 循环与东亚季风环流相互作用过程的诊断研究. 见: 叶笃正编. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 1997, 83~109  
Huang Ronghui, Zhang Renhe. Diagnosis study of the interaction between ENSO cycle and the East Asian monsoon circulation. *Collected Papers Commemorating Zhao Jiuzhang* (in Chinese), Ye Duzheng, Ed. Beijing: Science Press, 1997, 83~109
- [ 15 ] 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 热带西太平洋纬向风异常对 ENSO 循环的动力作用. 中国科学(D辑), 2001, **31**: 697~704  
Huang Ronghui, Zhang Renhe, Yan Bangliang. Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical western Pacific on ENSO cycles. *Science in China* (Series D), 2001, **44**(12): 1089~1098
- [ 16 ] Dewitte B, Perigaud C. El Niño-La Niña events simulated with Cane and

- Zebiak's model and observed with satellite or in situ data. Part II : Model forced with observation. *J. Climate*, 1996, **9** : 1188 ~ 1207
- [ 17 ] Busalacchi A J, O'Brien J J. Interannual variability of the equatorial Pacific in the 1960s. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86** : 10901 ~ 10907
- [ 18 ] Busalacchi A J, Takeuchi K, O'Brien J J. Interannual variability of the equatorial Pacific-revisited, *J. Geophys. Res.*, 1983, **88** : 7551 ~ 7562
- [ 19 ] Cane M A, Patton R J. A numerical model for low-frequency equatorial dynamics. *J. Phys. Oceanogr.* 1984, **14** : 1853 ~ 1863
- [ 20 ] Cane M A. Modeling sea level during El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 1984, **14** : 586 ~ 606
- [ 21 ] Kessler W S, McPhaden M J. Oceanic equatorial waves and the 1991 - 1993 El Niño. *J. Climate*, 1995, **8** : 1757 ~ 1774
- [ 22 ] Chen Y-Q, Battisti D S, Sarachik E S. A new ocean model for studying the tropical oceanic aspects of ENSO. *J. Phys. Oceanogr.*, 1995, **25** : 2065 ~ 2089
- [ 23 ] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 II. 模式结果分析. *大气科学*, 2001, **25** : 160 ~ 172
- Yan Bangliang, Huang Ronghui, Zhang Renhe. Dynamical role of zonal wind stresses over the tropic Pacific on the occurring and vanishing of El Niño, Part II : Analyses of modeling results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 2001, **25** : 160 ~ 172
- [ 24 ] Shu L, Clarke A J. Using an ocean model to examine ENSO dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, **32** : 903 ~ 923
- [ 25 ] Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106** : 447 ~ 462
- [ 26 ] Kleeman R. A simple model of the atmospheric response to ENSO SST anomalies. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48** : 3 ~ 18
- [ 27 ] <http://ingrid/ldgo.columbia.edu>