

骆海英, 段晚锁, 穆穆. 2009. 赤道高频纬向风强迫对 ENSO 事件强度的影响 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 465-474. Luo Haiying, Duan Wansuo, Mu Mu. 2009. The effect of equatorial high-frequency zonal wind forcing on ENSO amplitude [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 465-474.

赤道高频纬向风强迫对 ENSO 事件强度的影响

骆海英^{1,2,3} 段晚锁¹ 穆穆¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局培训中心, 北京 100081

摘要 ENSO 强度的影响因子是一个具有争议性的问题。作者探讨了一种理想的赤道高频纬向风强迫对 ENSO 强度的影响。将该问题转化为一类关于模式参数扰动的非线性最优化问题; 基于所用的理论 ENSO 模式, 研究了赤道高频纬向风强迫在调制 ENSO 强度中的角色。结果表明, 对于 El Niño 和 La Niña 事件, 存在两类外强迫, 一类促进 El Niño 事件的发展却抑制 La Niña 事件的发展, 另一类则抑制 El Niño 而促进 La Niña 事件的发展。这两类外强迫的主要区别在于初始相位的不同。相位决定了外强迫对 ENSO 事件是促进的还是抑制的, 而外强迫的振幅和周期则决定了外强迫影响 ENSO 强度的大小。这些外强迫主要是通过海洋波动对斜温层深度的调节来影响 ENSO 事件的强度的。

关键词 ENSO 模式 外强迫 优化扰动 模式参数

文章编号 1006-9585 (2009) 05-0465-10 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

The Effect of Equatorial High-Frequency Zonal Wind Forcing on ENSO Amplitude

LUO Haiying^{1,2,3}, DUAN Wansuo¹, and MU Mu¹

1 *State Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081*

Abstract What controls ENSO amplitude remains controversial. The authors explore the effect of a kind of idealized equatorial high-frequency zonal wind forcing on ENSO amplitude. This problem is first transformed into a non-linear optimization problem related to model parameters. Based on a theoretical ENSO model, the role of high-frequency zonal wind forcing in modulating ENSO amplitude is explored. The results show that there are two kinds of high-frequency zonal wind forcings for ENSO events, where the differences lie in the amplitude of the forcing, the period, and the phase. These differences make one kind of forcing enhance the El Niño event, but suppress the La Niña event, while the other kind suppresses the El Niño event and enhances the La Niña event. The further analysis

收稿日期 2008-04-24 收到, 2009-04-26 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-230、国家自然科学基金资助项目 40675030、40505013、国家基础研究项目 2006CB403606、2007CB411800 和中国科学院大气物理研究所领域前沿项目 IAP07202

作者简介 骆海英, 女, 1978 年出生, 博士, 研究方向为 ENSO 可预报性。E-mail: hyluo@mail.iap.ac.cn

通讯作者 段晚锁, E-mail: duanws@lasg.iap.ac.cn

shows that the phase of the high-frequency zonal wind forcing determines the forcing whether enhances ENSO events or suppresses them, while the amplitude and period of the forcing control the degree of its effect on ENSO intensity. Both of these two types of forcings affect ENSO amplitude mainly by the adjustment of oceanic wave on the thermocline.

Key words ENSO model, external forcing, optimal perturbation, model parameter

1 引言

什么因子控制 ENSO 强度的变化, 这是目前 ENSO 可预报性研究的一个重要问题。关于该问题, 国际上有许多争论。一些文献认为, ENSO 是一个自激振荡的非线性海气耦合系统, 其强度的变化是非线性过程反馈的结果 (Fedorov et al., 2000; Duan et al., 2004, 2008; An et al., 2004)。另一类观点则认为, ENSO 是一个动力学衰减系统, 其强度的维持及不规则变化是依靠外强迫的作用 (Kleeman et al., 1994; Penland et al., 1995; Thompson et al., 2000, 2001; Chang et al., 2004)。此外, 还有一种观点认为, ENSO 是一个中性或弱的衰减系统, 外强迫可以改变 ENSO 事件的相位和强度 (Grieger et al., 1994; Eckert et al., 1997; Blanke et al., 1997; Moore et al., 1999; Flugel et al., 2004)。然而, 外强迫是如何改变 ENSO 强度却始终没有统一的答案。Clement et al. (1999, 2000) 用一个中等复杂程度的模式揭示了在热带海气相互作用下, 太阳辐射强迫可以减弱 ENSO 事件的强度。Liu (2002) 用理论的延迟振子模型说明由于非线性的频率捕捉机制, 随着外强迫强度的增强, ENSO 将有效地被抑制 (Liu, 2002; Pan et al., 2005)。但在另一些相关文献 (Wu et al., 1993; Pan et al., 2005) 中, 可以看到外强迫促进 ENSO 强度的结果, 例如, Wu et al. (1993) 中的图 7 展示了周期性外强迫对 ENSO 强度起促进作用。可见, 外强迫对 ENSO 强度的影响仍是 ENSO 可预报性研究中一个未解决的问题。

Wu et al. (1993)、Liu (2002) 和 Pan et al. (2005) 等都是通过选取表征周期性外强迫的不同参数来研究外强迫对 ENSO 强度的影响, 这种方法带有一定的试探性, 缺陷在于不能穷尽所有的参数取值。考虑到 Mu et al. (2003) 提出的条件

非线性最优扰动的方法, 已经较成功地被应用于 ENSO 可预报性、热盐环流的稳定性以及敏感性分析等研究领域 (Mu et al., 2003, 2004a, 2004b, 2005, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b; Duan et al., 2004, 2005a, 2005b, 2006, 2008), 本文不再使用前人通过尝试选取不同参数的方法, 而是采用一个 ENSO 理论模式, 用非线性最优化方法研究一类周期性赤道高频纬向风强迫对 ENSO 强度的影响。

2 条件非线性最优参数扰动

假定描述大气和海洋运动的数值模式有下列形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + F(\mathbf{w}, \mathbf{p}, t) = 0, \\ \mathbf{w} |_{t=0} = \mathbf{w}_0, \end{cases}$$

其中 $\mathbf{w}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) = (\omega_1(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t), \omega_2(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t), \dots, \omega_n(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t))$ 为模式状态变量, 如海表温度 (或距平), 温跃层深度 (或距平) 等, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $t \leq \infty$, $\mathbf{w} \in \Omega$, Ω 为 n 维欧氏空间, $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 表示模式参数。 F 是非线性微分算子, $\mathbf{w}_0 = \mathbf{w}(t_0)$ 是初始值。

假设 \mathbf{M}_τ 是模式从 0 时刻到 τ 时刻的传播算子, 系统在预报时刻 τ 的数值解可以写成如下形式:

$$\mathbf{w}(\tau) = \mathbf{M}_\tau(\mathbf{w}_0, \bar{\mathbf{P}}).$$

模式的初值为 \mathbf{U}_0 , $\bar{\mathbf{P}}$ 是参数给定值, 假设模式初值是准确的, 只存在参数误差, 即参数给定值分别为 $\bar{\mathbf{P}} + \mathbf{p}$, 那么模式在 τ 时刻的数值解可以写成如下形式:

$$\mathbf{U}(\tau) = \mathbf{M}_\tau(\mathbf{U}_0, \bar{\mathbf{P}}),$$

$$\mathbf{U}(\tau) + \mathbf{u}(\tau) = \mathbf{M}_\tau(\mathbf{U}_0, \bar{\mathbf{P}} + \mathbf{p}),$$

其中, \mathbf{p} 代表参数扰动, $\mathbf{u}(\tau)$ 则刻画了参数扰动误差导致的预报误差。

对于给定的度量范数 $\|\cdot\|$ ，定义如下非线性优化问题，

$$J(\mathbf{p}^*) = \max_{\|\mathbf{p}\|_A \leq \sigma} \|\mathbf{M}_\tau(\mathbf{U}_0, \bar{\mathbf{P}} + \mathbf{p}) - \mathbf{M}_\tau(\mathbf{U}_0, \bar{\mathbf{P}})\|,$$

其中， $\|\mathbf{p}\|_A \leq \delta$ 是参数扰动的约束条件，范数 $\|\cdot\|_A$ 度量参数扰动的大小。由该优化问题给出的参数扰动 \mathbf{p}^* ，被称为条件非线性最优参数扰动（简称为 CNOP-P）。可见，CNOP-P 代表了满足一定约束条件，且在预报时刻 τ ，使得预报变量有最大偏差的一类参数扰动。

3 ENSO 模式

Wang et al. (1996) 给出了一个描述赤道东太平洋 Niño3 区异常海表温度 (T_E) 和斜温层深度 (h_E) 的不规则年际变化的理论 ENSO 海气耦合模式，简记为 WF96 模式。这个模式已被应用于 ENSO 的前期征兆，春季可预报性障碍和 ENSO 的不对称性等问题的研究中 (Duan et al., 2004, 2006, 2008; Mu et al., 2007a)。由于本研究主要探讨大气 30~60 d 的赤道高频纬向风强迫对 ENSO 强度的影响，而 WF96 模式中没有考虑大气高频纬向风强迫的影响。因此，需在 WF96 模式中引入该类外强迫 (Wang et al., 1999)。不同特征 (振幅、频率和位相) 的外强迫对 ENSO 影响的贡献可能有所差异，为了更好地理解大气高频纬向风强迫对 ENSO 的影响，同时为了使被考虑的问题能够用清晰的理论分析呈现出来，在本研究中，我们参考 Wang et al. (1999) 和 Liu (2002) 的外强迫选取方法，在 WF96 模式中引入周期性外强迫 $u_t = M \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$ (M 、 T 、 φ 分别代表外强迫的振幅、周期和相位)，它不依赖于 T_E 和 h_E ，Zebiak (1989)、Penland et al. (1995) 和 Pan et al. (2005) 也有类似的处理。这样，我们得到一个能够考虑赤道高频纬向风强迫对 ENSO 可预报性影响的一个理想模式。为方便讨论，记修改后的模式为 Forcing-WF96 模式，即

$$\frac{dT_E}{dt} = a_1 T_E - a_2 h_E + \sqrt{\frac{2}{3}} T_E (T_E - a_3 h_E) + f_1, \quad (1)$$

$$\frac{dh_E}{dt} = b(2h_E - T_E) + f_2, \quad (2)$$

其中，

$$a_1 = (\Delta \bar{T}_z + \Delta \bar{T}_x - \alpha_s) |_{x_E}, a_2 = (\mu + \delta_1) \Delta \bar{T}_x |_{x_E},$$

$$a_3 = (\mu + \delta_1), \quad b = \frac{2}{\delta(1 - 3\epsilon)},$$

$$f_1 = \Delta \bar{T}_z u_t, \quad f_2 = -3b u_t,$$

$$u_t = M \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right),$$

u_t 代表高频振荡的、且具有一定周期的赤道纬向风强迫 ($M=1$ 代表了实际的风速 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)， f_1 和 f_2 代表了赤道高频海表纬向风强迫对 ENSO 的影响。除了 u_t 外，模式其他参数值和 WF96 模式相同； $\Delta \bar{T}_z$ 、 $\Delta \bar{T}_x$ 由气候平均态给出，随时间的变化，反映了该模式的季节循环。当外强迫 $u_t=0$ 时，Forcing-WF96 模式即为 WF96 模式。WF96 模式和 Forcing-WF96 模式中的两个方程都为无量纲方程，具体量纲参见 Wang et al. (1991) 图 2.1。

4 理论赤道高频纬向风强迫对 ENSO 强度的影响

为考察赤道高频纬向风强迫对 ENSO 事件强度的影响，需建立适合的非线性优化问题。假定 \mathbf{M}_τ 是 WF96 模式从 0 时刻到 τ 时刻的传播算子， \mathbf{M}_{F_τ} 是 Forcing-WF96 模式从 0 时刻到 τ 时刻的传播算子，非线性优化问题可写为：

$$J(\mathbf{p}^*) = \max_{\|\mathbf{p}\| \leq \sigma} J(\mathbf{p}), \quad (3)$$

其中， $J(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{M}_{F_\tau}(\mathbf{U}_0, \mathbf{p}) - \mathbf{M}_\tau(\mathbf{U}_0)\|^2$ ， \mathbf{U}_0 是初始距平， τ 是预报时刻，范数取为 L_2 范数， $\|\mathbf{p}\| \leq \sigma$ 是约束条件， \mathbf{p} 代表模式外强迫中的参数向量。由于模式中的外强迫为

$$u_t = M \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right),$$

在数值计算上，

$$M \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) = M_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + M_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right),$$

其中， $M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$ ，当 $M_2 \neq 0$ ， $\tan \varphi = M_1/M_2$ 。为了能较好地考虑振幅和相位之间的关系，在计算时采用

$$u_t = M_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + M_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right),$$

选取的约束条件是 $M_1^2 + M_2^2 \leq \sigma_1^2$ ， $\sigma_2 \leq T \leq \sigma_3$ 。正

常数 σ_1 不仅反映了振幅的约束, 也反映了相位的约束, σ_2 和 σ_3 则代表了外强迫周期的约束。参数向量 (M_1, M_2, T) 表征了此处考虑的赤道高频纬向风强迫, 它们的变化反映了不同振幅、频率和相位的赤道高频纬向风强迫。公式 (3) 刻画了在 τ 时刻, 对 ENSO 事件的强度影响最大的, 由参数向量 (M_1, M_2, T) 表征的那一类赤道高频纬向风强迫。为了方便讨论, 在后面的叙述中, 将非线性最优参数向量 (M_1, M_2, T) 直接转化为代表振幅、周期和相位的参数向量 (M, T, φ) 来描述所得结果。

从公式 (3) 可知, 条件非线性最优参数扰动实际上对应于目标函数的全局极大值点。在优化计算中, 选取多个初猜值, 如果这些初猜值都正确地收敛到某一点, 且具有相同的目标函数值, 那么, 我们认为该点就是目标函数的一个极值点。有时, 可能会有几个局部极值点, 在约束范围内, 它们是非常有限的, 此时只要通过比较目标函数值就可以确定目标函数的全局极大值点。

对 Forcing-WF96 模式和 WF96 模式均采用四阶 Runge-Kutta 法离散, 时间步长 $\Delta t=0.01$ 代表 1 天, 优化算法是二次序列规划法 (Powell, 1982)。

4.1 表征理论赤道高频纬向风强迫的 CNOP-P

鉴于 ENSO 爆发的标准, 选取不同的优化时间区间 T : 1~6 月、1~9 月、1~10 月、1~11 月、1~12 月, 即从 1 月开始, 对于优化时间 6、9、11 和 12 个月, 分别计算 WF96 模式中不同强度的 El Niño 事件和 La Niña 事件的 CNOP-P, 其中约束条件通过 $\alpha \in (0.3, 0.5)$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ 给出, 该约束条件表示限定外强迫周期 T 在 30~60 天, 强度 M 分别为 $1.2 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相位 φ 在 $(-\pi, \pi)$ 之间。计算结果表明, 对于上述不同的优化时间区间以及 WF96 模式中不同强度的 El Niño 事件和 La Niña 事件, 计算得到的 CNOP-P 结果类似。下面以优化时间区间为 1~12 月, WF96 模式中一个 El Niño 事件 (图 1 中的 El Niño-1) 和一个 La Niña 事件 (图 2 中的 La Niña-1) 为例, 考察 CNOP-P, 即何种强度、周期和相位表征的赤道高频纬向风强迫对 El Niño 事件或 La Niña 事件的强度影响最大。

表 1 和 2 分别给出了 El Niño-1 和 La Niña-1

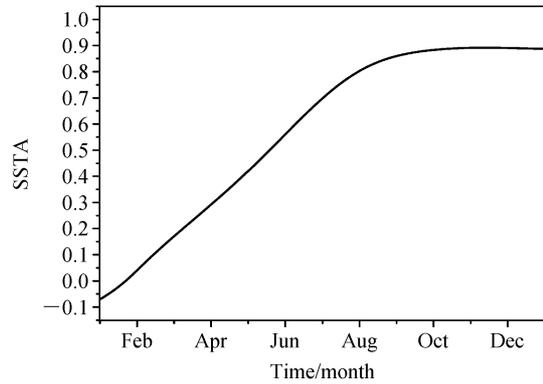


图 1 El Niño-1: WF96 模式中的一次 El Niño 事件, 其初始距平为 $(-0.1102, 0.1423)$

Fig. 1 El Niño-1: An El Niño event in WF96 model with initial anomaly $(-0.1102, 0.1423)$

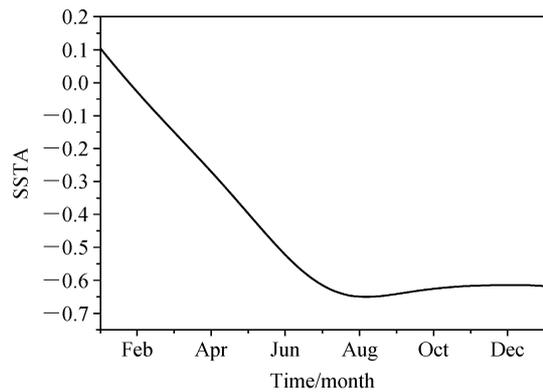


图 2 La Niña-1: WF96 模式中的一次 La Niña 事件, 其初始距平为 $(0.1073, -0.1219)$

Fig. 2 La Niña-1: A La Niña event in WF96 model with initial anomaly $(0.1073, -0.1219)$

情形下, 表征赤道高频纬向风强迫的 CNOP-P。图 3 和 4 分别给出了由表 1 和 2 中 CNOP-P 和局部 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫的两个例子。

表 1 El Niño-1 情形下表征赤道高频纬向风强迫的 CNOP-P

Table 1 The CNOP-P (M, T, φ) of equatorial high-frequency zonal wind forcing for El Niño-1

约束情况			CNOP-P			局部 CNOP-P		
$\sigma_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	σ_2/d	σ_3/d	$M/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T/d	$\varphi(\pi)$	$M/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T/d	$\varphi(\pi)$
1.2	30	60	1.2	60	0.45	1.2	60	-0.56
1.6	30	60	1.6	60	0.46	1.6	60	-0.57
2.0	30	60	2.0	60	0.46	2.0	60	-0.57

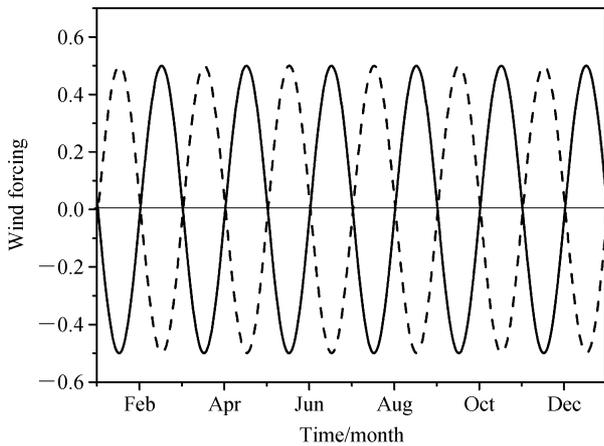


图 3 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$ 、 $\sigma_2=3$ 、 $\sigma_-=0.6$ 时，El Niño-1 情形下由 CNOP-P（实线）以及局部 CNOP-P（虚线）所表征的赤道高频纬向风强迫

Fig. 3 The equatorial high-frequency zonal wind forcings described by CNOP-P (solid line) and local CNOP-P (dashed line) with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=3$, $\sigma_-=0.6$, which are related to El Niño-1

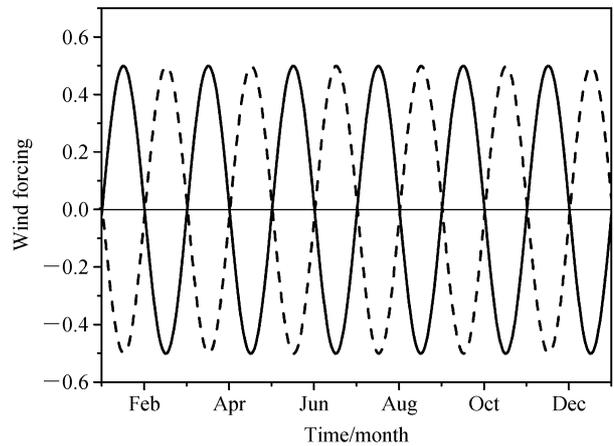


图 4 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$ 、 $\sigma_2=3$ 、 $\sigma_-=0.6$ 时，La Niña-1 情形下由 CNOP-P（实线）以及局部 CNOP-P（虚线）所表征的赤道高频纬向风强迫

Fig. 4 The equatorial high-frequency zonal wind forcings described by CNOP-P (solid line) and local CNOP-P (dashed line) with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=3$, $\sigma_-=0.6$, which are related to La Niña-1

表 2 La Niña-1 情形下表征赤道高频纬向风强迫的 CNOP-P

Table 2 The CNOP-P (M , T , φ) of equatorial high-frequency zonal wind forcing for La Niña-1

约束情况			CNOP-P			局部 CNOP-P		
$\sigma_1/m \cdot s^{-1}$	σ_2/d	σ_3/d	$M/m \cdot s^{-1}$	T/d	$\varphi(\pi)$	$M/m \cdot s^{-1}$	T/d	$\varphi(\pi)$
1.2	30	60	1.2	60	-0.54	1.2	60	0.45
1.6	30	60	1.6	60	-0.54	1.6	60	0.45
2.0	30	60	2.0	60	-0.54	2.0	60	0.45

从表 1 和 2 以及图 3 和 4 可知，对应于图 1 中的 El Niño 事件和图 2 中的 La Niña 事件，Forcing-WF96 模式都存在一个 CNOP-P 和一个局部 CNOP-P；对于给定的约束条件，CNOP-P 和局部 CNOP-P 总是在振幅最大、周期最长时取得，其区别只在于相位符号相反，并且由其 CNOP-P 和局部 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫随时间的发展其位相几乎完全相反（图 3 和 4），此外，El Niño 事件的 CNOP-P 和 La Niña 事件的局部 CNOP-P 相位相同，由它们所表征的外强迫随时间的发展结构也几乎相同（图 3 和 4），El Niño 事件的局部 CNOP-P 和 La Niña 事件的 CNOP-P 也有相同规律。那么，由他们所表征的纬向风强迫对 El Niño 事件和 La Niña 事件强度是如何影响

的呢？

4.2 CNOP-P 和局部 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫对 ENSO 强度的影响

仍以图 1 和 2 中的 El Niño-1 和 La Niña-1 为例。以 El Niño-1 (La Niña-1) 的初始距平为初值，分别以表 1 (表 2) 中的 CNOP-P 和局部 CNOP-P 为外强迫参数值，积分 Forcing-WF96 模式，可以得到 CNOP-P 和局部 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫影响下的 El Niño (La Niña) 事件（见图 5 和 6）。

从图 5 和 6 可知，无论是 El Niño 还是 La Niña 事件，由其 CNOP-P 表征的纬向风强迫总是促进 El Niño 或 La Niña 事件的发展，而由其局部 CNOP-P 表征的纬向风强迫却抑制 El Niño 或 La Niña 事件的发展；另外，对于周期约束在 30~60 天内的赤道高频纬向风强迫，随着其强度的增强，CNOP-P 表征的赤道高频纬向风对 El Niño 或 La Niña 事件的促进效果增强，而由局部 CNOP-P 对应的赤道高频纬向风对 El Niño 或 La Niña 事件的抑制效果同样也增强。另外，对于振幅和相位相同，而具有不同周期的外强迫，我们也考察了其对于 ENSO 事件强度的影响。结果表明，随着外强迫周期的增大，其对 El Niño 或 La Niña 事件促进

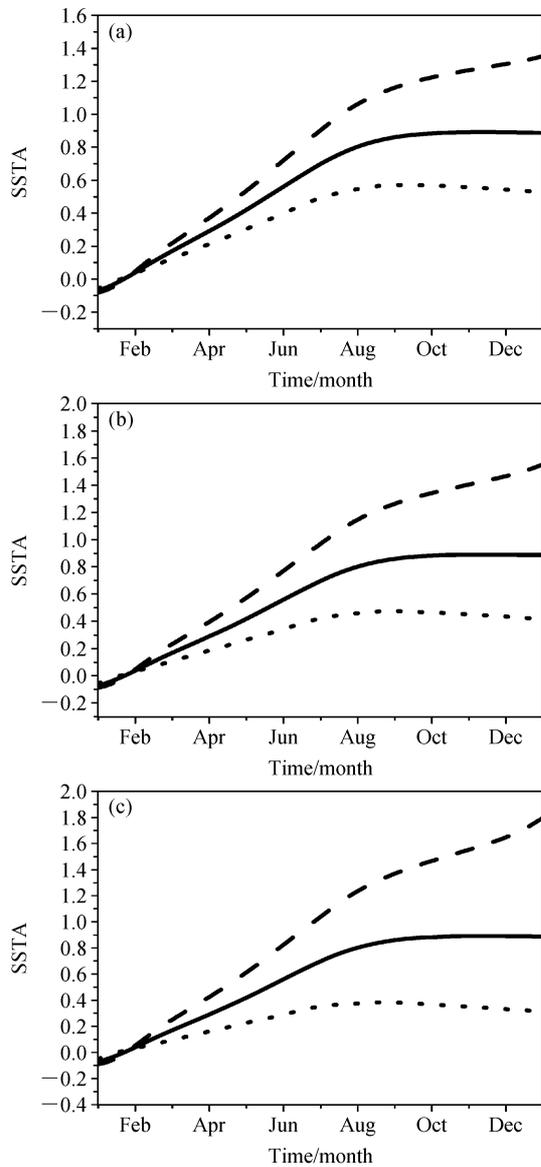


图5 由CNOP-P(虚线)以及局部CNOP-P(点线)所表征的赤道高频纬向风强迫影响下的El Niño事件及El Niño-1(实线)。参数约束分别为:(a) $\sigma_1=0.3$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$; (b) $\sigma_1=0.4$, σ_2, σ_3 同(a); (c) $\sigma_1=0.5$, σ_2, σ_3 同(a)。

Fig. 5 The resultant El Niño events due to the effect of equatorial high-frequency zonal wind forcings described by CNOP-P (dashed line) and local CNOP-P (dotted line). The parameter constraint in (a) $\sigma_1=0.3$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$, (b) $\sigma_1=0.4$, σ_2, σ_3 , as in (a), and (c) $\sigma_1=0.5$, σ_2, σ_3 as in (a). The solid line denotes El Niño-1

或抑制作用也增强。

鉴于El Niño事件的CNOP-P(局部CNOP-P)和La Niña事件的局部CNOP-P(CNOP-P)结构相同,由它们所表征的外强迫随时间的发

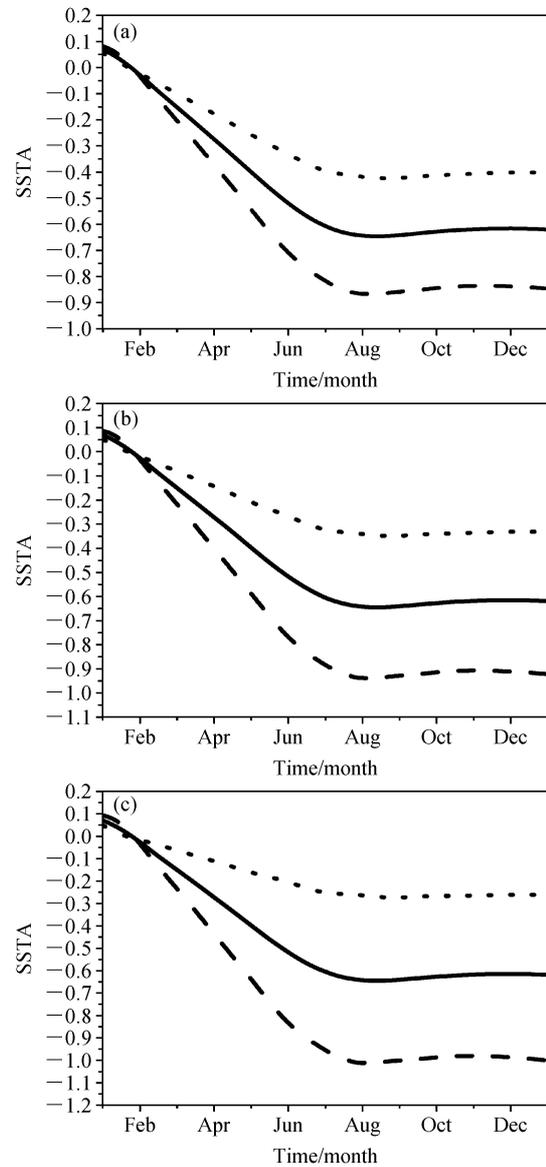


图6 由CNOP-P(虚线)以及局部CNOP-P(点线)所表征的赤道高频纬向风强迫影响下的La Niña事件及La Niña-1(实线)。参数约束分别为:(a) $\sigma_1=0.3$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$; (b) $\sigma_1=0.4$, σ_2, σ_3 同(a); (c) $\sigma_1=0.5$, σ_2, σ_3 同(a)。

Fig. 6 The resultant La Niña events due to the effect of equatorial high-frequency zonal wind forcings described by CNOP-P (dashed line) and local CNOP-P (dotted line). The parameter constraint in (a) $\sigma_1=0.3$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$, (b) $\sigma_1=0.4$, σ_2, σ_3 as in (a), and (c) $\sigma_1=0.5$, σ_2, σ_3 as in (a). The solid line denotes La Niña-1

展也几乎相同,我们可以得出这样的结论,El Niño的CNOP-P表征的赤道高频纬向风强迫促进El Niño的发展,而抑制La Niña的发展;其局部CNOP-P则抑制El Niño,而促进La Niña

的发展。

综上，对于 El Niño 和 La Niña 事件，存在两种不同类型的周期性赤道高频纬向风强迫，一类使得 El Niño 事件变强，La Niña 事件减弱；另一类则使得 El Niño 事件变弱，La Niña 事件增强。外强迫是促进还是抑制 ENSO 事件主要在于相位的选取，而外强迫对 ENSO 事件强度影响的大小则主要依赖于外强迫的振幅和周期。

4.3 海表温度和斜温层深度对赤道高频纬向风强迫的敏感性

从公式 (1) 和 (2) 可以看出，Forcing-WF96 模式中赤道高频纬向风强迫通过两种途径影

响 SSTa 的强度。一是赤道高频纬向风作用于赤道平均涌流，通过涌流的上升或下沉运动影响 SSTa 的强度，在模式中由 f_1 所表示；二是通过海洋 Kelvin 波和 Rossby 波的相互作用调节斜温层深度的变化，进而影响 SSTa 强度的变化，该过程在模式中由 f_2 表示。那么，在这两种影响 SSTa 强度的物理过程中，究竟哪一种起主要作用？我们通过两组敏感性实验回答该问题。

这两组敏感性实验为：只在 T_E (即 SSTa) 方程中考虑外强迫的影响，即只考虑 f_1 所代表的物理过程对 ENSO 事件强度的影响，记为 Model-1 (图 7)；只在斜温层深度异常 h_E 方程中考虑外强迫的

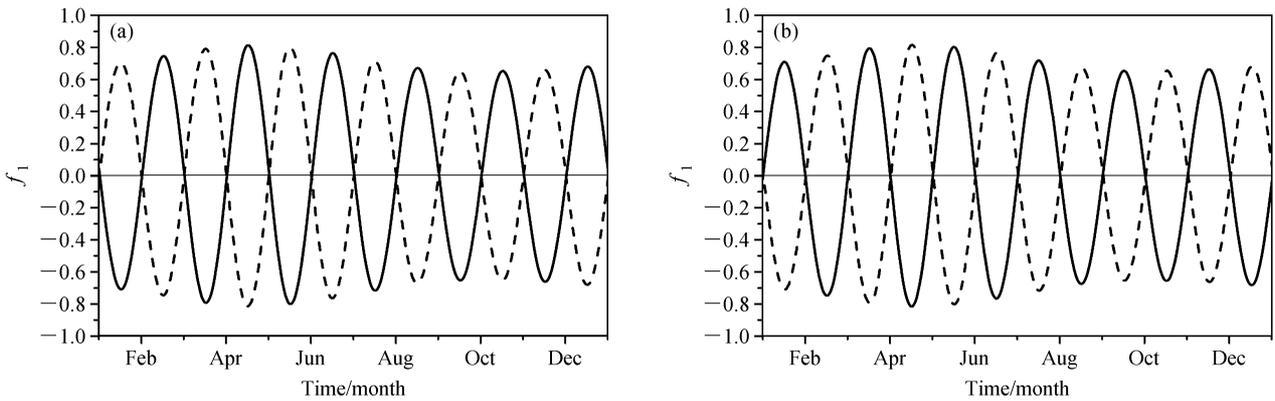


图 7 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ 时，(a) El Niño-1 和 (b) La Niña-1 情形下由 CNOP-P (实线) 以及局部 CNOP-P (虚线) 所表征的强迫项 f_1

Fig. 7 The forcing term f_1 described by CNOP-P (solid line) and local CNOP-P (dashed line) with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$, which are related to (a) El Niño-1 and (b) La Niña-1

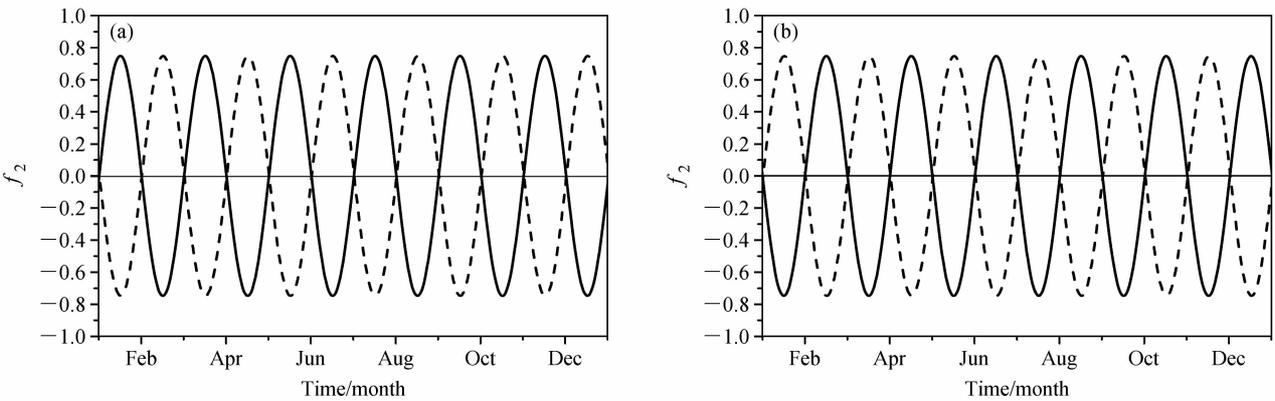


图 8 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ 时，(a) El Niño-1 和 (b) La Niña-1 情形下由 CNOP-P (实线) 以及局部 CNOP-P (虚线) 所表征的强迫项 f_2

Fig. 8 The forcing term f_2 described by CNOP-P (solid line) and local CNOP-P (dashed line) with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$, which are related to (a) El Niño-1 and (b) La Niña-1

影响,即只考虑 f_2 所代表的物理过程对 ENSO 事件强度的影响,记为 Model-2 (图 8)。我们仍以 WF96 模式的 El Niño-1 和 La Niña-1 为例。以 El Niño-1 (La Niña-1) 的初始距平为初值,分别以 CNOP-P 和局部 CNOP-P 作为外强迫参数值,积分 Model-1 和 Model-2,可以得到 f_1 和 f_2 影响下的 El Niño (La Niña) 事件。图 9 和图 10 分别给出了 f_1 和 f_2 影响下的 El Niño 和 La Niña 事件。

通过比较图 9 和图 10 可以看出,对于由 El Niño (La Niña) 的 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫,虽然它们在 Model-1 和 Model-2 中都促

进 El Niño (La Niña) 事件,但 Model-1 中的 El Niño (La Niña) 总比 Model-2 中的 El Niño (La Niña) 弱;而对于由 El Niño (La Niña) 的局部 CNOP-P 表征的赤道高频纬向风强迫,它们抑制 (El Niño) La Niña 事件,但 Model-1 中的 El Niño (La Niña) 事件比 Model-2 中的 El Niño (La Niña) 事件强。这些结果说明 ENSO 事件强度对 f_2 所描述的物理过程更加敏感,即海洋波动对斜温层深度异常的调节进而影响 ENSO 事件强度可能在赤道高频纬向风强迫影响 ENSO 强度过程中起主要作用。

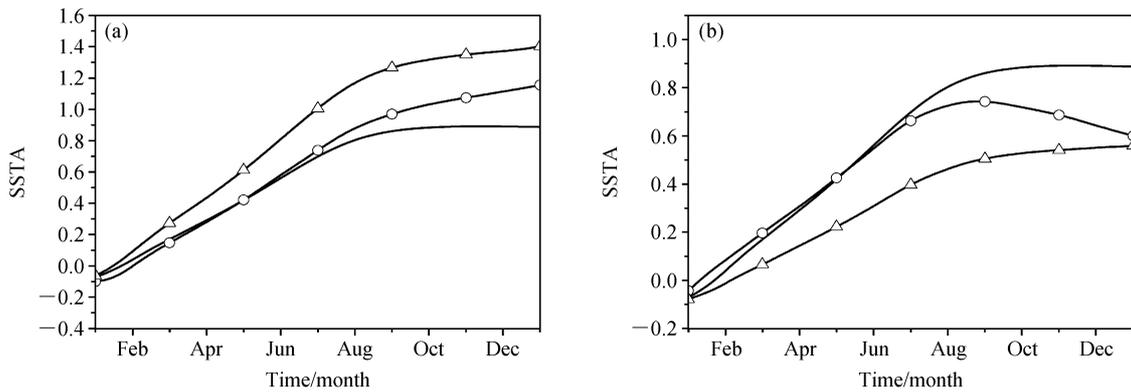


图 9 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ 时,由 (a) CNOP-P 和 (b) 局部 CNOP-P 所表征的赤道高频纬向风强迫被带入 Model-1 (圆圈线) 以及 Model-2 (三角线) 得到的 El Niño 事件。实线代表 El Niño-1。

Fig. 9 The resultant El Niño events when the equatorial high-frequency zonal wind forcings described by (a) CNOP-P and (b) local CNOP-P with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ are substituted into Model-1 (circle line) and Model-2 (triangle line). The solid line represents the El Niño-1.

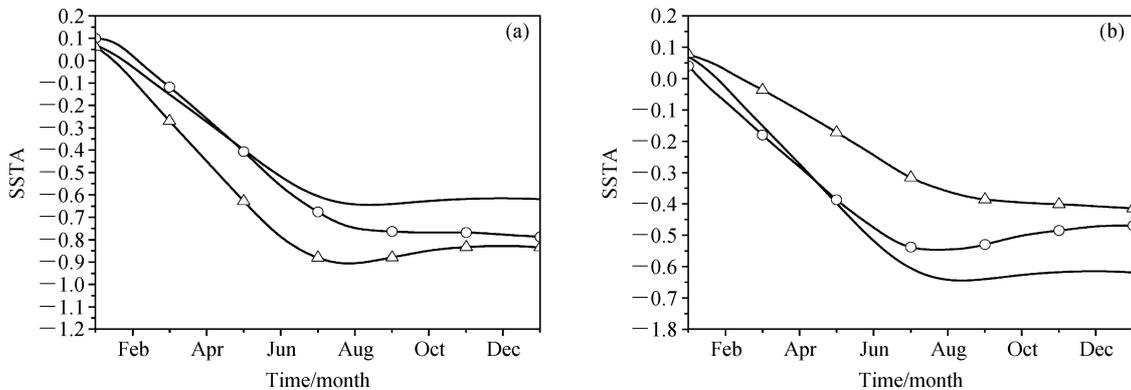


图 10 当参数约束为 $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$,由 (a) CNOP-P 和 (b) 局部 CNOP-P 所表征的赤道高频纬向风强迫被带入 Model-1 (圆圈线) 以及 Model-2 (三角线) 得到的 La Niña 事件,实线代表 La Niña-1

Fig. 10 The resultant La Niña events when the equatorial high-frequency zonal wind forcings described by (a) CNOP-P and (b) local CNOP-P with the parameter constraint $\sigma_1=0.5$, $\sigma_2=0.3$, $\sigma_3=0.6$ are substituted into Model-1 (circle line) and Model-2 (triangle line). The solid line represents the La Niña-1

5 总结和讨论

根据数值天气和气候可预报性研究的特点, 在 Mu et al. (2003) 提出的条件非线性最优扰动的基础上, 引入了条件非线性最优参数扰动 (CNOP-P) 这个概念, 利用一个理论 ENSO 海气耦合模式研究了满足一定约束条件的赤道高频纬向风强迫 (主要指 30~60 天内的周期性外强迫) 对 ENSO 强度的影响。结果发现, 存在两类显著地影响 ENSO 事件强度的外强迫。一类促进 El Niño 却抑制 La Niña 的发展; 另一类则抑制 El Niño 却促进 La Niña 事件的发展。这两类外强迫都是在振幅最大, 周期最长时取得, 它们的主要区别在初始相位的选取。定性地说, 外强迫的振幅和周期决定了外强迫对 ENSO 事件强度影响程度的大小, 而外强迫的相位则决定了外强迫对 ENSO 事件影响的属性, 即外强迫对 ENSO 事件是起促进还是抑制作用。

Lau et al. (1986, 1987, 1988); Zebiak (1989); Wu et al. (1993); Wang et al. (1999) 认为, 30~60 天的季节内振荡通过增幅减频能够诱发 ENSO 暖事件的爆发。翟盘茂等 (2001) 认为强的季节内振荡不一定能激发 ENSO 暖事件。从这些结果可以看出, 大气季节内振荡既有可能激发 ENSO 暖事件, 也有可能对 ENSO 暖事件的发生不起积极作用。那么, 大气季节内振荡在什么情况下可以作为激发 ENSO 暖事件的因子? 从本文结果可知, 强的季节内振荡, 即振幅较大, 持续周期较长的季节内振荡, 如果其相位符合某一特征的话 (见 4.1 和 4.2 节), 会诱发 ENSO 暖事件的爆发; 而对于另外一些强度较大, 持续周期较长的季节内振荡, 由于不合适的初始相位, 则可能抑制 ENSO 暖事件, 从而不利于 ENSO 暖事件的爆发。因此, 本文结果可能为前人用资料分析得出的结论提供了理论的解释。

另外, 为了探讨赤道高频纬向风强迫影响 ENSO 强度的基本机制, 我们考察了海表温度和斜温层深度对赤道高频纬向风强迫的敏感性。结果表明, 通过海洋波动调节斜温层深度进而影响海面温度异常 (SSTA) 是赤道高频纬向风强迫影响 ENSO 强度的主要物理过程。

上述结论都是来自理论 ENSO 模式的结果, Forcing-WF96 是一个高度简化的理论 ENSO 模式, 该模式只有两个变量, 它很难描述整个 ENSO 事件的复杂性; 此外, 本文所选用的外强迫也只是一个 30~60 天内, 理论化的周期性外强迫, 它不能描述整个赤道地区季节内尺度纬向风强迫的分布和发展以及其不规则性, 因而限制了本研究的进一步开展。对于更深入地研究, 需采用较复杂的模式, 一方面对简单模式的结果进行验证; 另一方面, 希望能揭示更多的现象为发展和改进 ENSO 模式提供理论依据。

参考文献 (References)

- An S I, Jin F F. 2004. Nonlinearity and asymmetry of ENSO [J]. *J. Climate*, 17: 2399-2412.
- Blanke B, Neelin J D, Gutzler D. 1997. Estimating the effect of stochastic wind stress forcing on ENSO irregularity [J]. *J. Climate*, 10: 1473-1486.
- Chang P, Saravanan R, DelSole T, Wang F. 2004. Predictability of linear coupled systems. Part I: Theoretical analyses [J]. *J. Climate*, 17: 1474-1486.
- Clement A C, Seager R, Cane M A. 1999. Orbital controls on the El Niño /Southern Oscillation and the equatorial climate [J]. *Paleoceanography*, 14: 441-456.
- Clement A C, Seager R, Cane M A. 2000. Suppression of El Niño during the mid-Holocene by changes in the Earth's orbit [J]. *Paleoceanograph*. 15: 731-737.
- Duan W S, Mu M, Wang B. 2004. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for ENSO events [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D23105, doi: 10. 1029/2004JD004756.
- Duan W, Mu M. 2005a. Investigating decadal variability of El Niño -Southern Oscillation asymmetry by conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, C07015, doi: 10. 1029/2005JC003458.
- Duan W, Mu M. 2005b. Applications of nonlinear optimization method to numerical studies of atmospheric and oceanic sciences [J]. *Appl. Math. Mech.*, 26: 636-646.
- Duan W, Mu M. 2006. Investigating decadal variability of ENSO asymmetry by conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (3), 7015, doi: 10. 1029/2005 JC003458.
- Duan W S, Xu H, Mu M. 2008. Decisive role of nonlinear temperature advection in El Niño and La Niña amplitude asymmetry [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: C01014, doi: 10. 1029/2006 JC003974.
- Eckert C, Latif M. 1997. Predictability of a stochastically forced hybrid coupled model of El Niño [J]. *J. Climate*, 10: 1488

- 1504.
- Fedorov A V, Philander S G. 2000. Is El Niño changing? [J]. *Science*, 288 (5473): 1997-2002.
- Flugel M, Chang P, Penland C. 2004. The role of stochastic forcing in modulating ENSO predictability [J]. *J. Climate*, 17: 3125-3140.
- Grieger B, Latif M. 1994. Reconstruction of the El Niño attractor with neural networks [J]. *Climatic Dyn.*, 10: 267-276.
- Kleeman R, Power S B. 1994. Limits to predictability in a coupled ocean atmosphere model due to atmospheric noise [J]. *Tellus*, 46A: 529-540.
- Lau K M, Chan P H. 1986. The 40-50 day oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: A new perspective [J]. *Buttetin. Amer. Meteor. Soc.*, 67: 533-535.
- Lau K M, Chan P H. 1988. Interannual and intraseasonal variations of equatorial convection: a possible link between the 40-day mode and ENSO [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45: 506-519.
- Lau K M, Peng L. 1987. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the equatorial atmosphere. Part I: Basic theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 950-972.
- Liu Z Y. 2002. A simple model study of ENSO suppression by external periodic forcing [J]. *J. Climate*, 15: 1088-1109.
- Mu M, Duan W, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10: 493-501.
- Mu M, Duan W, Chou J. 2004a. Recent Advances in predictability studies in China (1999-2002) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (3): 437-443.
- Mu M, Sun L, Henk D A. 2004b. The sensitivity and stability of the ocean's thermocline circulation to finite amplitude freshwater perturbations [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 34: 2305-2315.
- Mu M, Duan W. 2005. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications to the studies of weather and climate predictability [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (21): 2401-2407.
- Mu M, Zhang Z. 2006a. Conditional nonlinear optimal perturbations of a two-dimensional quasigeostrophic Model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1587-1604.
- Mu M, Duan W, Xu H, Wang B. 2006b. Applications of conditional nonlinear optimal perturbation in predictability study and sensitivity analysis of weather and climate [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 06: 992-1002.
- Mu M, Xu H, Duan W. 2007a. A kind of initial errors related to "spring predictability barrier" for El Niño events in Zebiak-Cane model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03709, doi: 10.1029/2006GL027412.
- Mu M, Duan W, Wang B. 2007b. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D10113.
- Moore A M, Kleeman R. 1999. Stochastic forcing of ENSO by the intraseasonal oscillation [J]. *J. Climate*, 12: 1199-1220.
- Pan A, Liu Q, Liu Z Y. 2005. Periodic forcing and ENSO suppression in the Cane-Zebiak model [J]. *J. Oceanography*, 61: 109-113.
- Penland C, Sardeshmukh P. 1995. The optimal growth of equatorial sea surface temperature anomalies [J]. *J. Climate*, 8: 1999-2024.
- Powell M J D. 1982. VMCWD: A Fortran subroutine for constrained optimization [D], DAMTP Rep. 1982/NA4, UK, Cambridge: University of Cambridge
- Thompson C J, Battisti D S. 2000. A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part I: Model development [J]. *J. Climate*, 13: 2818-2832.
- Thompson C J, Battisti D S. 2001. A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part II: Analysis [J]. *J. Climate*, 14: 445-466.
- Wang B, Fang Z. 1996. Chaotic oscillation of equatorial climate: A dynamic system theory for ENSO [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53: 2786-2802.
- Wang B, Barilon A, Fang Z. 1999. Stochastic dynamics of El Niño-Southern Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56: 5-23.
- Wu D H, Anderson D L T, Davey M K. 1993. ENSO variability and external impacts [J]. *J. Climate*, 6: 1703-1717.
- Zebiak S E. 1989. On the 30-60 day oscillation and the prediction of El Niño [J]. *J. Climate*, 2: 1381-1387.
- 翟盘茂, 郭艳君, 李晓燕. 2001. 1997/1998年 ENSO 过程与热带大气季节内振荡. *热带气象学报* [J], 17 (1): 1-9. Zhai Panmao, Guo Yanjun, Li Xiaoyan. 2001. A diagnostics analysis of 1997/1998 ENSO event and the role of intra-seasonal oscillation in the equatorial atmosphere [J]. *Journal of Equatorial Meteorology (in Chinese)*, 17 (1): 1-9.