

梁晓妮, 俞永强, 刘海龙. ENSO 循环年代际变化及其数值模拟. 大气科学, 2008, 32 (6): 1471~1482

Liang Xiaoni, Yu Yongqiang, Liu Hailong. Numerical simulation of decadal modulation of ENSO. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1471~1482

ENSO 循环年代际变化及其数值模拟

梁晓妮^{1, 2} 俞永强¹ 刘海龙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

摘 要 从 20 世纪 70 年代后期的观测资料分析中显示了全球气候的年代际变化, 同时也表现在热带太平洋上最重要的海气耦合现象 ENSO 的年代际变化上。本文利用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) 的气候系统海洋模式 (简称 LICOM), 对 ENSO 的年际以及年代际变率进行模拟, 结果表明 LICOM 基本能够模拟出 ENSO 年际变化的特征, 通过对海洋上层热含量的计算以及对热量和质量输送的变化分析, 能够看到模式中 ENSO 循环中的反馈机制与理论研究的结论是一致的。同时, 作者还发现模式能够重现 ENSO 循环的年代际变化特征, 例如周期、传播方向和冷暖事件不对称性等特征的模拟也基本接近观测事实, 其中重点分析了冷暖事件的不对称性与非线性加热 (NDH) 之间的关系, 进一步分析还发现 ENSO 的强度、不对称性与海洋内部的非线性过程之间在年代际尺度上也存在密切的关系。但是, 模式模拟与观测结果之间仍然存在着一定的误差, 模式有待于进一步改进。

关键词 大洋环流模式 ENSO 年代际调制

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1471-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

Numerical Simulation of Decadal Modulation of ENSO

LIANG Xiaoni^{1, 2}, YU Yongqiang¹, and LIU Hailong¹

1 *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*

Abstract The remarkable decadal shift of global climate in the late 1970s has been observed, as well as the decadal variability of ENSO which is the most significant coupled air-sea phenomenon in the tropical Pacific. In order to evaluate the ability of LASG/IAP (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics/Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) Climate System Ocean Model (version 1.0, abbreviated as LICOM1.0), the simulations of interannual and decadal variability of ENSO are made by the model, and the results show: LICOM could simulate the interannual variability of ENSO basically, and it is found that the ENSO feedback mechanism in the model is in agreement with theoretical investigation by calculating the surface heat content and analyzing the heat transport and the mass transport. Moreover, the model can reproduce decadal modulation of ENSO, such as period and propagation direction as well as asymmetry between the cold and warm events and their simulations are also basically near to realistic observations. And the relationship between the skewness and nonlinear dynamic heating is mainly analyzed. Further analysis also shows that there is a

收稿日期 2007-04-29, 2008-02-22 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403605, 国家自然科学基金资助项目 40675049、40523001、40221503

作者简介 梁晓妮, 女, 1982 年出生, 硕士, 目前从事数值模拟, 诊断分析的研究。E-mail: liangxn@mail.iap.ac.cn

close relationship between the Nonlinear Dynamic Heating (NDH) and the amplitude and skewness of ENSO on the decadal timescale. It is found that there exist errors in the model simulation compared with SODA results. The model needs to be improved in the future.

Key words ocean general circulation model, ENSO, decadal modulation

1 引言

El Niño-南方涛动 (ENSO) 是热带太平洋上最显著的海气耦合信号, 对全球气候、生态以及社会产生着重要的影响。从 20 世纪 80 年代以后发生的几次 El Niño 事件看来, 其强度变得越来越大, 影响越来越广, 例如, 1997~1998 年的 El Niño 是有记录以来最强的一次 ENSO 暖事件, 成为 20 世纪一次严重的气候灾害, 影响范围波及全球。

自从 Bjerknes^[1] 提出 ENSO 循环与热带大尺度海洋和大气环流相互作用有关之后, 通过热带海洋和全球大气 (TOGA) 研究计划的实施, 过去十多年对于 ENSO 循环物理机制的理解和对 ENSO 的预报都取得了很大的进展^[2]。ENSO 事件演变主要分两个阶段, 在发展阶段, Bjerknes 正反馈起主要作用, 赤道上变化的信风会影响海洋的表层环流从而进一步影响海表的温度变化, 而且它们之间是存在正反馈作用的, 即海表温度的变化又会反过来增强信风最初的异常。而衰减阶段, 赤道波动起了很重要的负反馈作用。赤道上风应力的异常引起的风应力旋度会激发出海洋 Rossby 和 Kelvin 波, 赤道外的 Rossby 波带着负异常信号向西传到赤道西太平洋, 并且在那里反射成为东传的 Kelvin 波, 这一过程对抗 Bjerknes 的正反馈作用并使整个耦合系统在暖事件和冷事件之间形成振荡^[3]。

近几十年的研究发现 ENSO 也具有显著的年代际变化特征。20 世纪 70 年代中后期各种观测资料显示全球气候发生了明显的年代际变化, 在热带太平洋, 海气耦合系统也发生了年代际的变化^[4], 与此同时, ENSO 的各项特征 (如强度、周期、结构等) 也随之改变。单从 Niño 3 指数上也能看到这一明显的变化 (如图 1)。模式和观测结果基本吻合, 图 1 中显示在过去的 20 年中发生了两次强 El Niño 事件, 同时期, El Niño 和 La Niña 表现出更大的不对称性, 前者很强 (达到 4.5°C), 后者相对弱 (-3°C), 周期也从 2~4 年变长到了 3~7 年, 这些变化使得人们开始更多地关注热带太平洋海温

的年代际变化 (Decadal change in tropical Pacific) 或者 ENSO 循环的年代际调制 (Decadal modulation of ENSO cycle)。需要说明的是, 前者一般指平均海温的年代际变化, 后者强调 ENSO 振幅和周期等的年代际变化。有些研究者认为两者之间关系密切, 如 1970 年代末的年代际变化在上述两个方面都有表现, 但也有不同的意见。对这个问题目前还有很多争论, 本文研究的对象主要是后者^[3]。

海洋模式的发展目的之一是为了更好地模拟和预测海洋环流的变化, 既然 ENSO 是热带太平洋上重要的海气耦合现象, 并且它对全球气候的变化有着显著的影响, 因此评估一个海洋模式在观测强迫下对 ENSO 循环的模拟能力是对模式本身的一个最基本的检验。在过去十多年里, 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室发展的全球海洋环流模式一直在不断改进的过程中, 从最初的四层模式^[5, 6]发展到目前使用的版本 (LICOM1.0), 经历了四代的发展。大量的数值试验和评估分析表明, LICOM1.0 合理再现了大尺度环流的基本气候特征, 其模拟热带太平洋上层环流的改进有益于合理再现动量和热量的平衡, 这体现在 LICOM 对热带太平洋 SST 平均态的模拟上。虽然模式仍然存在模拟东太平洋偏冷西太平洋偏暖的问题, 但是总的来看, LICOM 对于太平洋-印度洋风生环流和气候平均态的模拟已经基本满足要求^[7, 8], 因此我们可以利用观测资料强迫 LICOM, 对 ENSO 现象进行更深入的模拟分析, 目的是更全面的评估模式, 同时找到模式在哪些方面的模拟仍有不足, 以期将来更进一步的改进。

对于上述的问题, 利用一个海气耦合模式进行模拟研究是非常必要的, 但是对于海气耦合模式, 其模拟能力受到了大气模式、海洋模式和耦合方案等多重因素的影响, 难以对模式的模拟误差进行分析和解释。所以有必要首先检验一个单独海洋模式在给定的大气强迫作用下, 能否模拟出上述 ENSO 的变化, 而且分析模式模拟 ENSO 的非线性过程的能力对于改进模式本身也提供了很好的依据。因此

本文将从 LICOM 对于热带太平洋年际和年代际变率的模拟能力上对它进行评估。

文章的第 2 节介绍单独海洋模式及其数值试验, 第 3 节和第 4 节分别讨论 El Niño 的年际和年代际的变化, 最后给出全文总结。

2 海洋环流模式及其数值试验介绍

LICOM 是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气候系统海洋模式 (LASG/IAP Climate system Ocean Model) 的英文缩写。LICOM 是一个版本不断更新的模式系列, 本文使用的这个版本被称为 LICOM1.0。它是一个准全球涡相容 (eddy-permitting) 模式, 水平方向采用球坐标, 水平分辨率为 0.5° ; 南北范围从 75°S ~ 65°N , 包括除北冰洋以外的全球海洋; 垂直方向为 η 坐标, 分为 30 层, 上层 300 m 每 25 m 为一层, 300~5600 m 的 18 层随深度加深度逐渐加大。

LICOM 是刘海龙等^[9]在 L30T63 基础上发展起来的。该模式保留了 L30T63 的基本特点: 非刚盖近似的完全原始方程模式和相应的守恒差分格式、水平方向球坐标和垂直方向 η 坐标的坐标系统以及一些较为成熟的物理参数化方案, 包括: 等位密度面混合参数化方案^[10]、南北纬 30° 之间采用依赖于 Richardson 数的 Pacanowski-Philander 垂直混合方案^[11]等。在此基础上, LICOM 提高了模式的水平分辨率, 关于边界条件、水平粘性、强迫场资料等方案也有相应的改变^[12]。与 L30T63 相比, 主要的改进表现在模拟的大洋环流的许多重要成员更加接近观测事实。就经圈环流而言, LICOM 模拟底水输送加强, 低纬度风生环流加强。环流的加强尤其是西边界流加强, 导致 LICOM 经向热输送增加。这些改进与提高模式的水平分辨率、降低水平粘性有很大关系^[13]。总之通过对 LICOM 的基本评估表明, LICOM 合理再现了大尺度环流的基本气候特征, 年平均的环流和温度场的结构的模拟有了很大的改进^[6, 12], 同时也利用模式进行了大量的试验, 如对风应力外强迫的试验等^[14]。在这样的基础上, 本文将对模式进行更进一步的评估, 主要是检测其模拟年际和年代际变化的能力。

LICOM 模式以 Levitus^[15, 16] 的海表温度和海表盐度作为热通量和淡水通量的恢复边界条件, 强

迫场采用德国马克斯-普朗克气象研究所 (MPI) 整理的海洋模式比较计划 (OMIP) 月平均强迫场 (包括风应力矢量、净短波辐射、非短波通量、耦合系数)^[17], 此强迫场的原始资料来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 15 年再分析资料逐日结果^[18], 然后从无运动状态开始积分, 温度和盐度采用 Levitus 资料的气候平均值, spin-up 积分 900 年, 模式基本达到稳定。为了探讨海洋年际变化的特征, 在 spin-up 稳定之后, 我们采用 1958 年 1 月到 2001 年 12 月逐日的 ERA40 风应力^[19]为强迫场继续积分 44 年, 海表温盐条件仍向 Levitus 的月平均气候值恢复, 这样模拟的海洋变化完全是来自于对风场年际信号的响应。本文以下的分析均基于此试验的模式结果。

本文所用的观测资料主要是 SODA 同化资料^[20]。SODA 资料是水平分辨率为 0.5° , 垂直方向从 5~5374m 分为 40 层, 采用 POP1.3 (Parallel Ocean Program, v1.3) 海洋模式的同化资料。表层温盐来自 WOD2001 (World Ocean Database 2001), 其中包括 TAO/Triton 锚定阵列和 ARGO 浮标, 混合层海温来自 COADS 的海上船舶观测。风应力强迫来自 ERA40 (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40-year reanalysis), 净海表热通量和淡水通量采用整体参数化法。除了 SODA 外, 本文还用到了 Haddley^[21] 中心的海温资料。

3 热带太平洋的 ENSO 循环

观测的热带太平洋海温具有很强的年际变化特征, 即通常表现为赤道中东太平洋海温冷暖事件交替出现的 ENSO 循环。一个海洋模式能否在观测的大气强迫下模拟出这种特征, 是对海洋模式模拟能力的既重要又基本的检验。本节主要从模拟的海表温度以及海洋热含量等方面的变化评估海洋模式 LICOM 对 ENSO 循环特征的模拟能力。

图 1 给出了观测和模拟的 Niño 3 区域 (5°S ~ 5°N , 150°W ~ 90°W) 平均海温异常的时间序列, 其中观测数据来自 1958 年 1 月到 2001 年 11 月的 SODA 同化资料。首先, 可以看到模式与观测的变化趋势还是比较一致的, 能够模拟出过去几十年里所有的 El Niño 和 La Niña 事件, 表现了 ENSO 年际变化特征。模拟的 ENSO 循环周期大约在 2~7

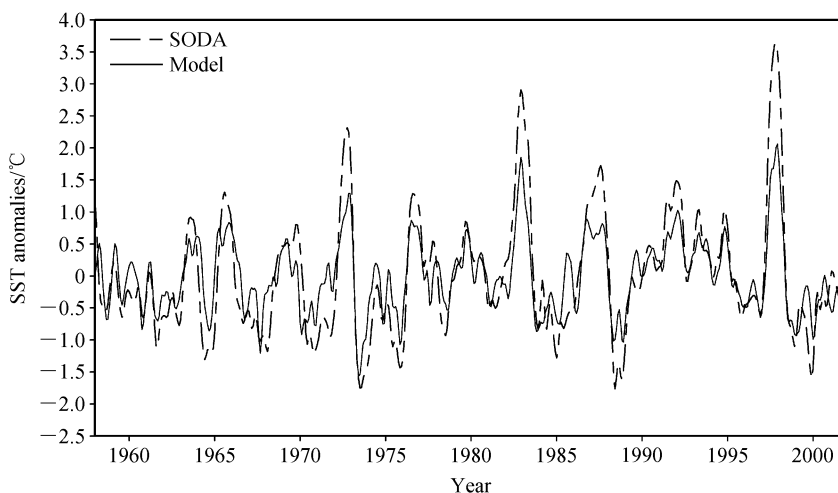


图1 Niño3 区域 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 平均的海表温度异常时间序列。虚线: SODA 同化资料的结果; 实线: 模式结果

Fig. 1 Time series of SST anomalies in the Niño3 region. Solid line: result of model; dashed line: Simple Ocean Data Assimilation (SODA)

年之间,同时模拟的暖事件距平普遍强于冷事件,但是模式在对 El Niño 强度的模拟上偏弱。

我们考察了模式中的热通量条件。选取 1958~2001 年期间发生的 El Niño (1963、1965~1966、1968~1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991~1992、1993、1994~1995、1997~1998) 和 La Niña (1964、1967、1970、1973、1975、1988) 事件,将发生暖事件(冷事件)时 DJF (12、1、2 月) 三个月的平均热通量与 1958~2001 年 DJF 三个月的平均值之间求距平得到冷暖位相下的热通量距平合成图。发现在暖事件期间模式的结果是使得海洋失去了比观测更多的热量,冷事件发生时得到更多的热量,因此模式环境下的热通量条件是减弱了 ENSO 的振幅(图略)。目前看来,也许造成模式对 ENSO 事件模拟偏弱的原因主要还是热力方面的作用,海洋动力作用对于 ENSO 模拟的强弱贡献如何,在模式中是有利于 ENSO 的发展还是起抑制作用,有待于进一步的分析。

图 2 是一组 Niño 3 指数与 SST 的同期及超前滞后回归系数图,观测资料是 Hadley 中心的 SST 资料,这组图反映了海表温度的年际变化情况。从海温超前 9 个月(图 2a)开始,赤道太平洋 SST 开始增温,增温幅度逐渐增大,到 El Niño 成熟阶段增温达到最大(图 2b),之后赤道东部太平洋的 SST 减小,而副热带太平洋的 SST 开始增加,并且向赤道西太平洋延伸,意味着进入了 ENSO 循环的 La Niña 阶段(图 2c、d)。模式能够较好把握 SST

随着 ENSO 的发展演变表现出来的变化,只是在 El Niño 的发展成熟阶段,模拟的增温中心位置偏西,约 10 个经度,中心位置的偏西使得 Bjerknes 的正反馈作用无法有效地影响到赤道东太平洋,也许是模式模拟的 ENSO 强度偏弱的原因之一。

图 3 给出的是 Niño3 指数与热含量的超前滞后相关系数图,从这组图上我们可以看到热含量的变化对应着 ENSO 的循环过程。纵坐标表示滞后时间,负值表示热含量超前 Niño3 指数。图 3a、b 是 SODA 资料的结果,清楚地显示了 El Niño 的一个循环过程。El Niño 发生以前,热含量在西太平洋地区增加,赤道外热含量减少,El Niño 发生时,赤道上热含量增加,赤道外热含量减少,并且此时由于赤道东风应力减弱造成的赤道外气旋式风应力旋度的异常会激发出西传的 Rossby 波,此 Rossby 波将在西边界反射成为东传的 Kelvin 波, Kelvin 波将赤道外的信号带到了赤道东太平洋,从而影响到那里的海温的变化,抑制 El Niño 事件的进一步发展,此后,赤道上热含量减少,赤道外热含量增加。这与“延迟振子”的理论也是基本相符的。

由前面的分析可知,在 El Niño 发生之前赤道西太平洋地区有净的热量积累,那么这些积累在热带海洋内部的热量是如何输送出去的? 我们知道经向热输送是地气系统热量平衡的重要物理过程之一,而在热带地区海洋环流对经向热输送的贡献又十分重要。图 4 给出赤道上的质量和热量输送的纬度-时间变化图。它们的变化对应于 El Niño 事件

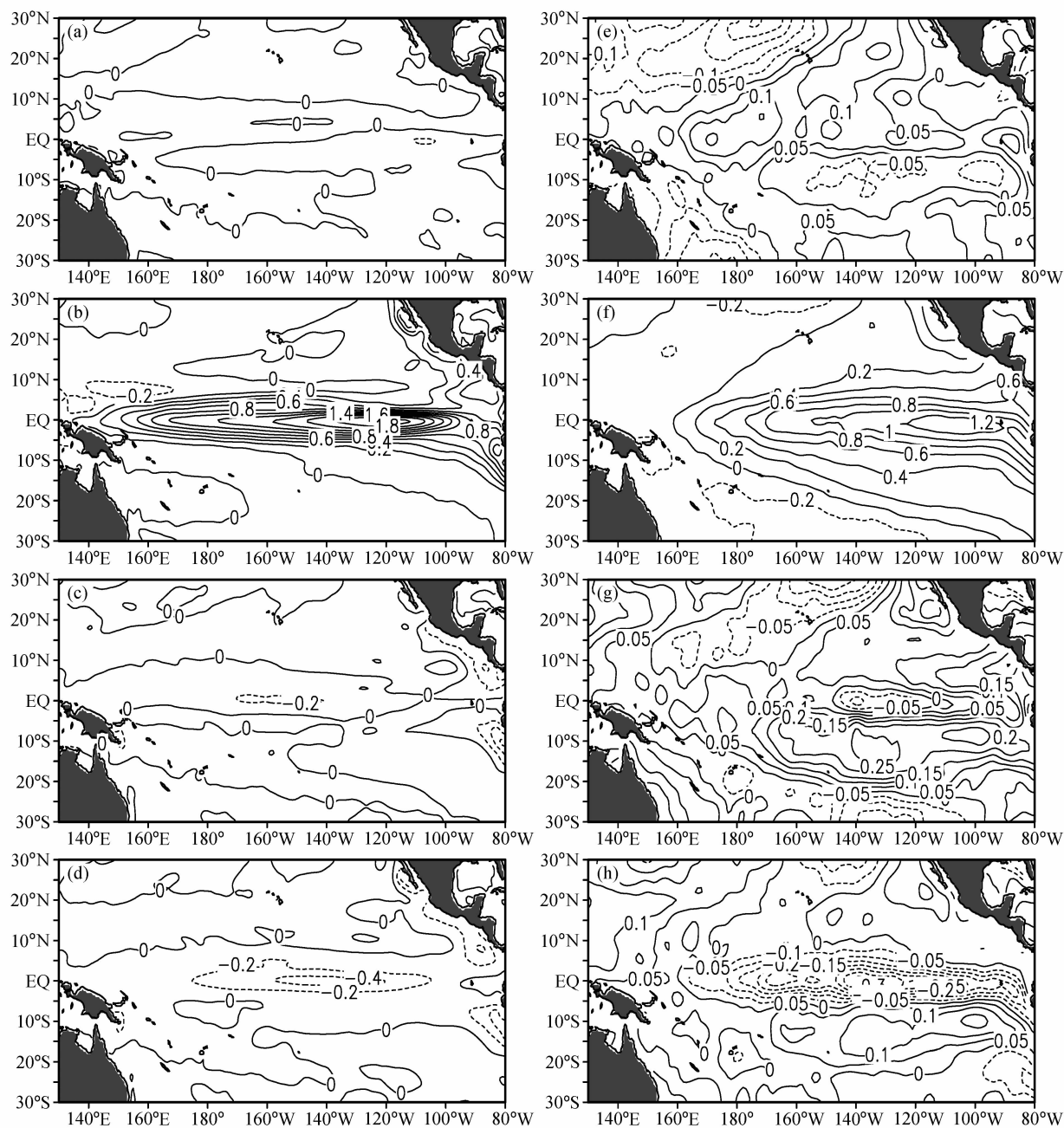


图2 模式(a~d)和SODA资料(e~h)的海表温度超前(滞后)Niño3指数的回归系数图:(a、e)超前9个月;(b、f)同期相关;(c、g)滞后9个月;(d、h)滞后12个月

Fig. 2 Lag regression of SST with respect to Niño3 index from (a–d) model and (e–h) SODA results: (a, e) SST leads Nino3 index nine months; (b, f) SST is simultaneous with Nino3 index; SST lags Niño3 index (c, g) nine months and (d, h) 12 months

的发生, El Niño 发展期间质量和热量向赤道输送, 而衰减期间质量和热量将从赤道向两极输送, 且强 El Niño 事件对应更大的质量和热量输送, 如 1982/1983 年和 1997/1998 年两次强暖事件。从上述结果看来, El Niño 现象的发生发展与海洋上层暖水的变化即热含量的变化关系密切, ENSO 位相

转换的物理机制也是与 Jin^[22, 23]提出的充电理论一致的, 海洋动力过程对 El Niño 的衰减是有重要作用的。

图5是模式模拟的 Niño 3 指数与经向流速的回归关系, 这组图可以描述 ENSO 循环中, 从表层到次表层的洋流对于输送热量以及维持海洋内部热

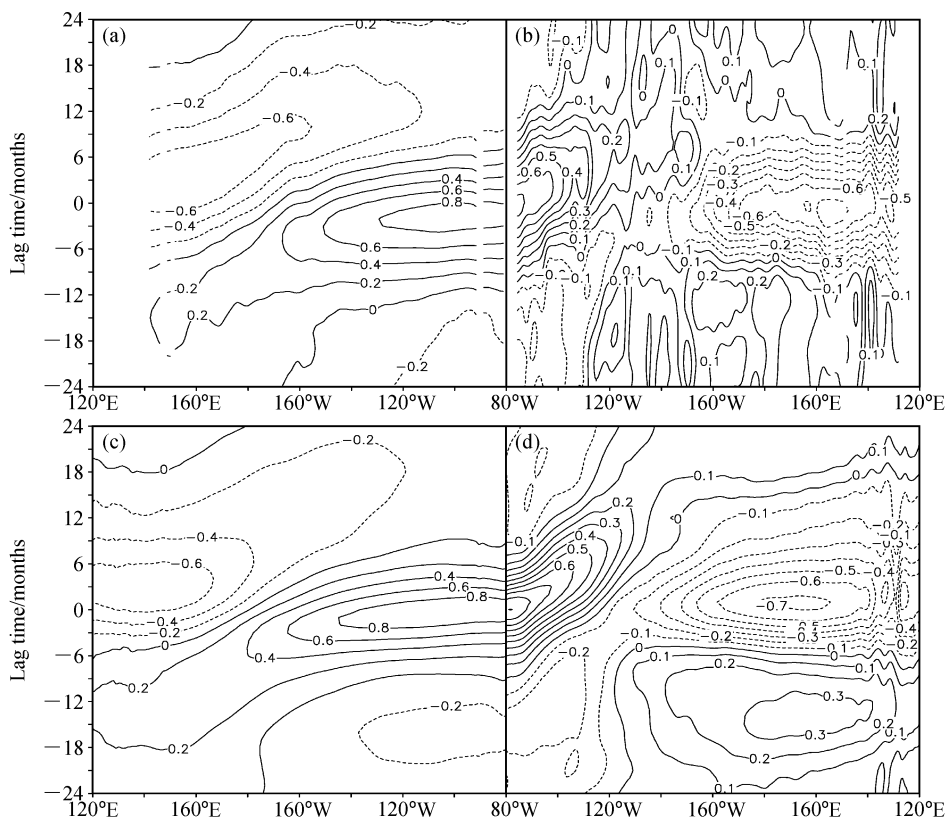


图3 SODA同化资料(a、b)及模式结果(c、d)的Niño3指数与热含量超前滞后相关系数图:(a、c)2°S~2°N平均;(b、d)5°N~8°N平均。纵坐标表示超前、滞后的月份,负值表示热含量超前Niño3指数

Fig. 3 Lag correlation coefficients between Niño3 index and heat content from (a, b) SODA and (c, d) model results: (a, c) Average from 2°S to 2°N; (b, d) average from 5°N to 8°N. Negative (positive) ordinate values denote heat content leads (lags) Niño3 index

量平衡的重要作用。图5a是4°N垂直剖面上的图,图5b是4°S垂直剖面上的图,这两张图都显示表层与次表层的流向是相反的,表层主要是风应力强迫的Ekman流;次表层是地转流。当El Niño发生时,太平洋中部和西部地区表现为西风异常,此时Ekman流指向赤道,而地转流指向两极。且地转流的作用大于Ekman流,因此总的质量和热量输送都是指向两极的。

海洋通过上述的环流过程将热量从赤道向两极输送,引起赤道平均温跃层抬升,从而抑制El Niño的进一步发展甚至衰减,因而海洋动力过程在ENSO循环中起到了一种负反馈作用。模式是能够将洋流的这种反馈作用表现出来的,但是对于经向流的模拟强度弱于观测。

4 ENSO循环的年代际调制

大量观测事实表明,20世纪70年代中后期发生了一次气候的年代际变化,随着这一年代际转

折,热带太平洋上最重要的海气耦合现象ENSO的一些基本特征也正发生明显的转变^[24]。例如在20世纪70年代末,ENSO事件不仅在空间型式、强度、周期、传播方向及开始时间等基本特征上改变了,ENSO冷暖事件的不对称性也变得更强了,Wu和Hsieh^[25]指出ENSO的非线性过程也正经历着年代际的变化。如前文所述上述变化通常称为ENSO循环的年代际调制(Decadal modulation)。还有一些研究指出上述变化可能与太平洋上平均风场的年代际转变有关^[26~28]。例如,中部和西部太平洋出现东风减弱甚至转变为西风,这使得温跃层在东太平洋加深,次表层海温升高,且高于海表,同时太平洋东部的东风异常引起更强的上翻,这些变化都可能会使ENSO的各项特征发生年代际变化。到目前为止,对于ENSO循环年代际调制的原因还没有确定的结论,下面将试图从冷暖事件的不对称性、非线性加热的年代际变化以及它们之间的联系分析海洋模式LICOM对这个现象的模拟能

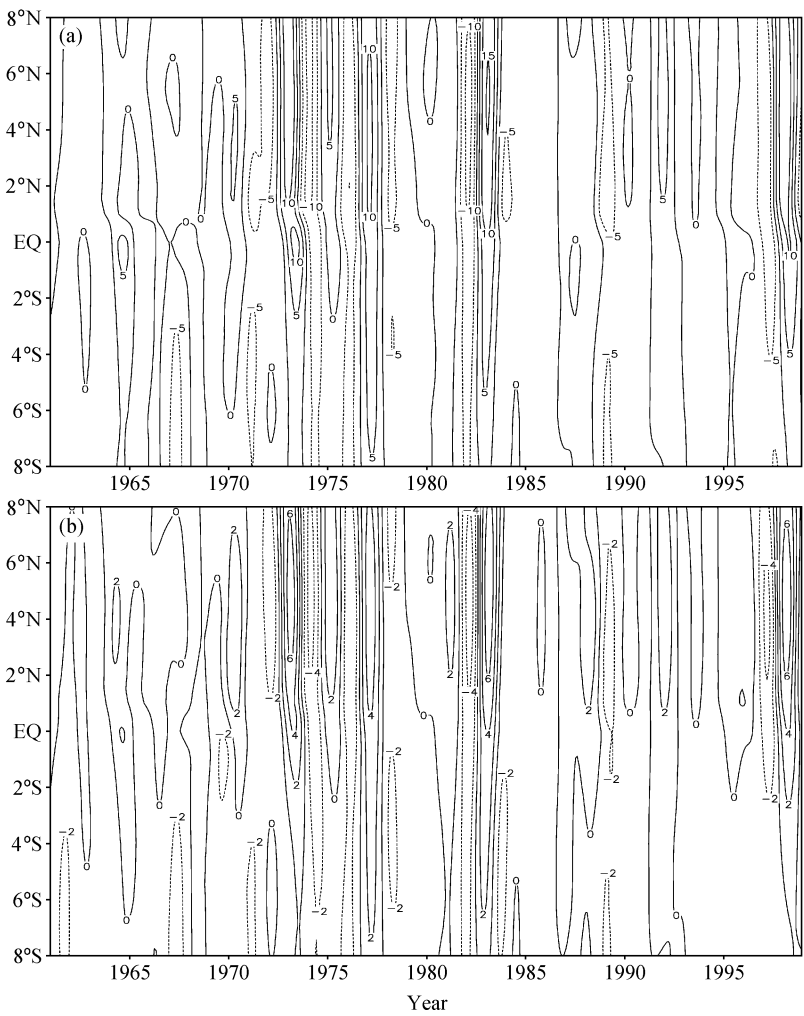


图 4 模式结果的 (a) 质量输送 (单位: 10^9 kg/s) 和 (b) 热量输送 (单位: PW) 纬度-时间剖面图
Fig. 4 Time-latitude cross sections of simulated zonal-mean meridional transport: (a) Mass transport (10^9 kg/s); (b) heat transport (PW)

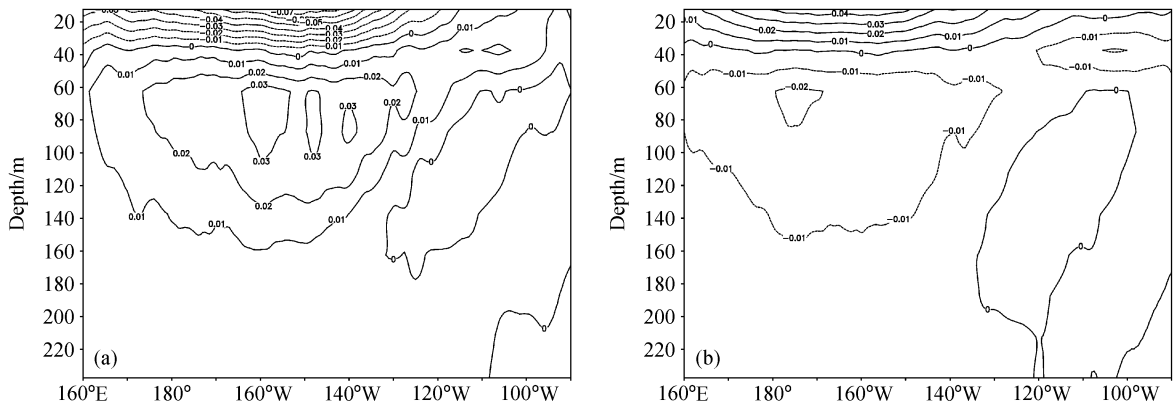


图 5 LICOM 模拟的 Niño3 指数与经向流速的回归系数图 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$): (a) 4°N 的剖面; (b) 4°S 的剖面
Fig. 5 Linear regression of Niño3 index with respect to meridional current from LICOM results at (a) 4°N and (b) 4°S (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

力。
首先考察 ENSO 的不对称现象。参照 An 等^[29]提出的定义, 给出偏斜度 (skewness) 指数, 从统计学的意义上衡量 ENSO 表现的这种不对称性。

$$I_s = m_3 / (m_2)^{1/2},$$

其中,

$$m_k = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^k / N.$$

偏斜度指数中的 x_i 代表第 i 个变量, $\bar{X}$ 是平均值, N 是样本总数。

如果上述偏斜度指数为正, 表示暖事件的强度大于冷事件, 反之意味着冷事件强度大于暖事件。图 6 显示了赤道太平洋区 SST 不对称性的空间分布。由于 ENSO 冷暖事件在强度和周期上的不对称性, 形成了赤道太平洋上的海温呈现出东部升温、西部降温的形势, 与上述合成分析的结果是一致的。与此相关的一个问题是: 近来出现的这种越来越显著的 ENSO 不对称现象是由外界随机强迫导致的还是非线性动力过程的作用? Thompson 和 Battisti^[30] 用一个线性模式激发出 ENSO 事件, 且将其基本特征反映出来, 说明 ENSO 的基本特征是由线性过程引起的, 但是他们没有将 ENSO 的不对称性表现出来。因此目前认为, 造成这种不对称现象是海洋本身的非线性过程。

最近, Jin 等^[31] 提出非线性动力加热 (Nonlinear Dynamic Heating, 简称 NDH) 作用, 即 $-(u'\partial T'/\partial x + v'\partial T'/\partial y + w'\partial T'/\partial z)$ 更强调了海洋内部动力过程的非线性作用, 而且这三项之中 $-w'\partial T'/\partial z$ 的作用最大。既在 El Niño 发生期间东部次表层海温的距平值高于表层海温, 而强的上升流将次表层的暖水带到表层引起海表温度的升温; 在 La Niña 期

间, 次表层的海温距平低于海表, 但是负的垂直速度使得以 $-w'\partial T'/\partial z$ 为主要作用的 NDH 值仍然为正, 即无论在 ENSO 循环的冷位相还是暖位相, NDH 的作用都是正的, 这就使得暖事件增强而冷事件被削弱了, 从而导致 ENSO 循环的不对称性^[31]。图 6 的结果表明, LICOM 模式基本能够将 ENSO 的不对称现象模拟出来, 只是强度偏弱且范围过于集中在赤道, 这也许与 LICOM 对 ENSO 的模拟强度偏弱有关, 同时模拟的次表层海温的异常弱于观测, 而表层异常与观测相当, 那么模拟的异常温度垂直梯度就小, 因此起到较大作用的 $-w'\partial T'/\partial z$ 就小于观测值, 导致了模拟的偏斜偏弱。

图 7 是选取 1977 年前后发生的 El Niño 事件进行的合成分析图, 从观测和模式结果的图上都能看到在 El Niño 期间, 最大的增温不是发生在海表而是在 60 m 左右的次表层, 并且 1977 年之后在次表层的这种增温更加突出, 同时由前文所述, 我们知道赤道西太平洋出现西风的年代际异常以及东太平洋的东风的年代际异常^[14], 风场的这种改变会增强东部太平洋的涌升, 这样次表层的暖水就被带到表层从而引起 SST 增加。

Jin 等^[31] 提出的 NDH 确实能够引起一个强的 ENSO 事件以及解释 ENSO 循环的不对称现象, 但是为什么 ENSO 事件的不对称性表现出年代际的变化特征? 他们认为 El Niño 东传的特性有利于得到更大的 NDH, 从而导致更明显的不对称性。而当 El Niño 事件表现为东传特征时, 次表层的海温

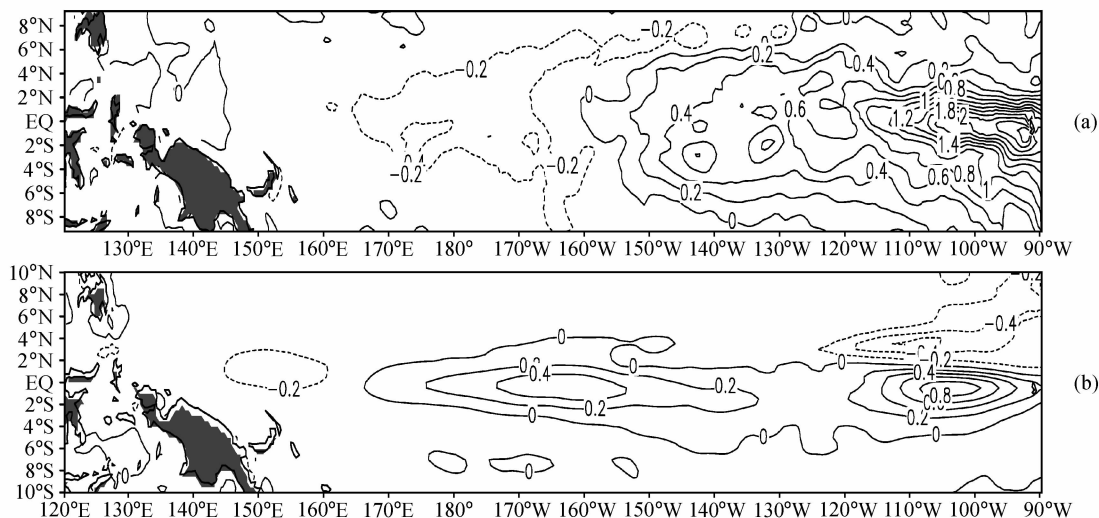


图 6 ENSO 的偏斜度 (单位: °C²): (a) SODA 同化资料结果; (b) 模式结果

Fig. 6 Skewness of ENSO (°C²) from (a) SODA and (b) model results

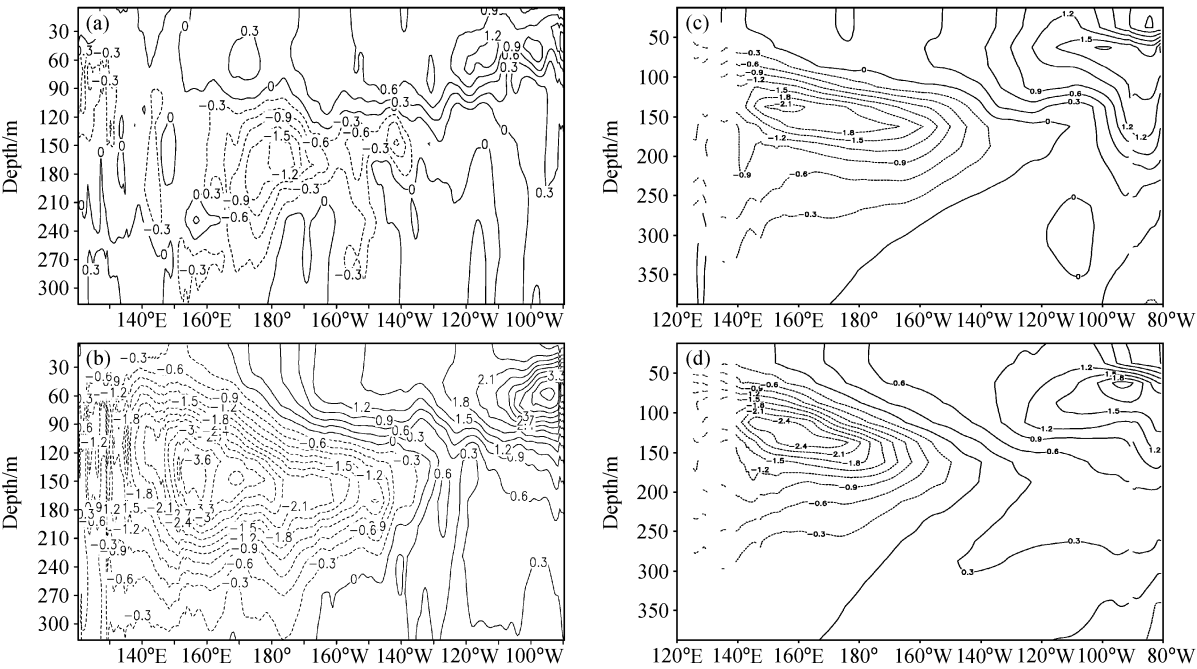


图 7 (a, c) 1958~1977 年和 (b, d) 1978~2001 年 El Niño 事件海温距平垂直剖面图: (a, b) SODA 同化资料的结果; (c, d) 模式结果
Fig. 7 Vertical cross sections of sea temperature anomalies for (a, c) 1958 – 1977 and (b, d) 1978 – 2001 El Niño events: (a, b) SODA re-sult; (c, d) model result

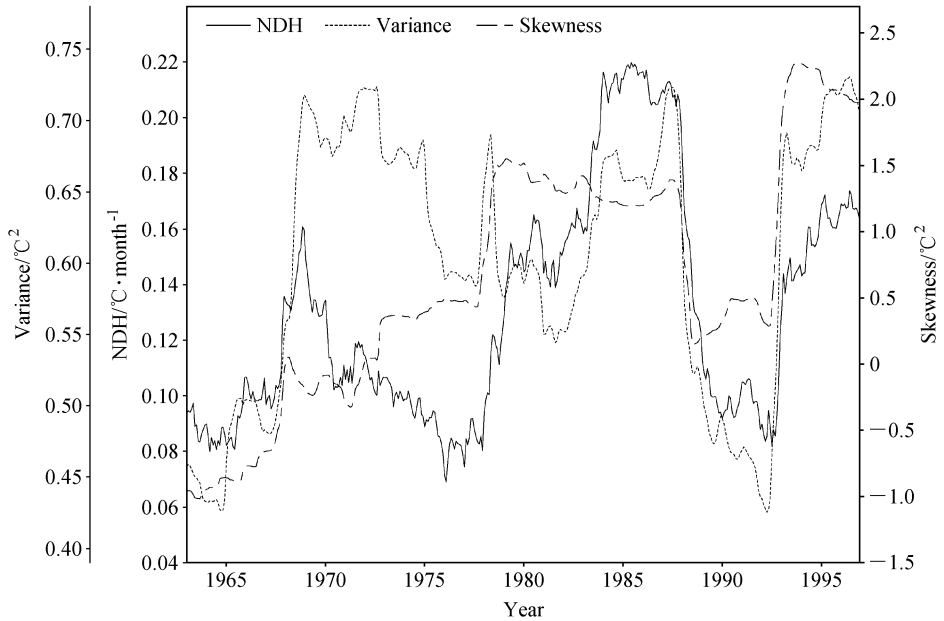


图 8 10 年滑动平均的 ENSO 偏斜度、Niño3 指数的方差以及非线性加热时间变化曲线
Fig. 8 Time series of the 10-year running means of ENSO skewness, variance of SST anomalies, and Nonlinear Dynamic Heating (NDH)

通常超前 SST 约 4~6 个月, 这样垂直的海温梯度就加大, 那么以垂直平流为主的 NDH 也就变得更大; 相反, 西传的暖事件, 次表层和海表海温几乎同时产生异常增温, 那么 NDH 就小了^[31, 32]。而近几十年出现的强 ENSO 事件也多表现为东传的特征^[33], 这样 ENSO 事件的不对称性也就表现出了年代际的变化。

那么, 偏斜度指数 (skewness)、Niño 3 指数的

方差 (variance) 以及非线性加热项 (NDH) 在年代际变化尺度上是否也有很好的关系? 图 8 是选取图 6 所示的不对称性最显著的区域 ($2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{W}\sim 100^{\circ}\text{W}$) 进行区域平均, 并做了 10 年滑动平均得到的偏斜度、方差以及非线性加热 (NDH) 的时间变化曲线。模式结果反映出了这三个变量的明显的年代际变化, 同时显示 NDH 的作用始终为正, 偏斜度指数也主要表现为正值, 且三条曲线有较好的相关关系, 偏斜度指数与 NDH 之间的相关系数达到 0.64, Niño 3 指数的方差与 NDH 之间的相关系数为 0.51。这说明偏斜度指数、方差及 NDH 在年代际尺度上呈现一致的变化, 这也许意味着当 ENSO 的强度达到一定值时, 非线性不稳定会导致激发出更大的 NDH, 而增强的 NDH 会引起更大的偏斜度。

NDH 在 1976/1977 年后的增强使 ENSO 不对称性更突出, 这种不对称性又使得赤道太平洋上的平均海温发生改变, Jin 等^[31]认为它们之间应该存在一个正的反馈机制。由于气候态和 ENSO 循环同时出现显著的年代际改变, 是否气候态的年代际变化就是 ENSO 年代际变化的直接原因? 它们之间究竟存在着怎样的相互作用, 仅仅通过单独的海洋模式进行数值试验可能远远不够, 将来有必要用海气耦合模式作更加深入细致的研究分析。

5 总结和讨论

本文利用再分析的风应力资料强迫一个全球海洋环流模式 LICOM, 模拟结果表明 LICOM 基本能够将 ENSO 循环的变化过程模拟出来; 同时对于 ENSO 循环的年代际调制, 即在 1970 年代后期发生的 ENSO 循环在周期、强度和冷暖事件不对称性等方面的转变, 模式也在一定程度上重现了基本的观测事实, 主要结论如下:

(1) 赤道太平洋热含量的变化对于维持 ENSO 循环起了很重要的作用, 海洋表层的 Ekman 流以及次表层的地转流, 即 Severdrup 输送的共同作用, 维持着海洋上赤道与副热带之间热量和质量的输送过程。

(2) ENSO 冷暖位相的不对称性与赤道太平洋的气候平均态密切相关。在年代际尺度上, El Niño 较 La Niña 的振幅增强且发生次数更多, 同时伴随赤道东太平洋海温增加和赤道西太平洋海温降

低。

(3) 赤道太平洋的非线性过程与 El Niño 的周期、强度以及不对称性之间有密切的相关关系。由于气候的年代际变化的影响, 海温在赤道中部太平洋首先增温从而改变了 ENSO 的传播方向, 同时平均风场和环流的年代际改变使得热带东太平洋的垂直输送作用增强了, 这些变化影响海洋内部的非线性过程, 例如增强了 NDH 的作用, 从而使 ENSO 的不对称性更加突出, 不对称性的加强也反过来对气候平均态产生影响。尽管对于 El Niño 的年代际转变的原因以及海-气相互作用的具体过程还没有明确的解释, 但是从本文的分析结果上可以看到, 气候风场与海洋的动力热力过程、非线性作用等有着密切的联系, 这一系列的变化势必影响到 El Niño 时空特征的转变。不过对于全球变暖这一气候的年代际变化事件是如何影响到赤道风场以及海气之间的反馈机制究竟是怎样的, 仍然没有很确定的答案。

(4) 海洋环流模式 LICOM 模拟的结果与 SO-DA 同化资料的结果仍然存在差异, 例如不管在年际还是年代际时间尺度上模式模拟的 SST 都存在过分西伸和范围狭窄的问题, 对于引起误差的原因还有待于更进一步的研究, 模式也有待于进一步的改进。

人们对于 ENSO 的变化和其机制的研究仍在不懈的努力之中, 如何从风场到海温场再到海洋内部的动力过程等多方面的联系和作用来解释 ENSO 的机制还没有很确定的结论, 尤其是关于非线性过程的研究。例如, 上层海洋混合层就有高度的非线性性。在上部海洋, 垂直混合受垂直海温的分层所限制, La Niña 期间, 有很强的温度垂直梯度, 这将会阻断垂直混合; 而 El Niño 期间海表和次表层的海温差异没有那么明显, 这会引起较大的垂直混合^[32]。还有文章^[34]指出, 从观测的资料分析发现 ENSO 循环过程中热量和质量的输送在冷暖位相不同阶段是存在不对称性的, El Niño 期间向副热带的热量质量输送强于 La Niña 期间在热带地区的热量质量的累积, 而且北半球的热量质量输送强于南半球。Kug 等^[35]认为这种南北半球热量质量输送的不对称可能与纬向风应力异常中心的南移有关。另外, 还有文章^[36]提出气候平均态例如纬向风应力、纬向 SST 梯度以及纬向温跃层梯度的空

间型和动力配置的系统性东移现象。总之, ENSO 的年代际调制现象是一个复杂的海气相互作用的结果, 其与气候平均态之间的相互作用和密切联系使得全面深入的认识 ENSO 的变化机理变得更加困难和复杂, 那么提高海洋模式的模拟能力将有助于今后对它进行更进一步的研究分析。

致谢 张学洪老师提出的宝贵意见使我受益匪浅; 感谢吴方华、郑伟鹏、林鹏飞和肖潺, 与他们的学习和讨论让我不断进步。

参考文献 (References)

- [1] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 163~172
- [2] The Special Issue of *Journal of Geophysical Research*. 1998, **103** (C7): 14167~14510
- [3] Chang P, Yamagata T, Schopf P, et al. Climate fluctuations of tropical coupled systems—The role of ocean dynamics. *J. Climate*, 2005, **19**: 5122~5136
- [4] Graham N E. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during 1970s and 1980s. *Climate Dyn.*, 1994, **10**: 135~162
- [5] Zhang Xuehong, Liang Xinzong. A numerical world ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6** (1): 43~61
- [6] Zhang Xuehong, Bao Ning, Wang Wanguo. Numerical simulation of seasonal cycle of world oceanic general circulation. The Proceedings of The Sixth Japan and East China Sea Study Workshop (JECSS-VI), Fukuoka, Japan, April 22~27, 1991
- [7] Roeske F. An atlas of surface fluxes based on the ECMWF reanalysis—A climatological dataset to force global ocean general circulation models. Technical Report 323, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2001
- [8] 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式. *大气科学*, 2003, **27**: 607~617
Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Liu Hailong. The development and application of the oceanic general circulation models. Part I: The global oceanic general circulation models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 607~617
- [9] Jin X, Zhang X, Zhou T. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (2): 197~215
- [10] Gent P R, McWilliams J C. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1990, **20**: 150~155
- [11] Pacanowski R C, Philander G. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, **11**: 1442~1451
- [12] 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册. 北京, 科学出版社, 2003
Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. *LASG/IAP Climate System Ocean Model Manual*. Beijing: Science Press, 2003
- [13] Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 675~690
- [14] 俞永强, 张学洪, 郭裕福, 等. IAP/LASG 海洋环流模式对风应力的响应. *大气科学*, 2001, **25**: 721~739
Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, Guo Yufu, et al. A response of IAP/LASG ocean general circulation model to the observed wind stress. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**: 721~739
- [15] Levitus S, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4. US Department of Commerce, Washington, D C, 1994, 1~177
- [16] Levitus S, Burgett R, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 3: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 3. US Department of Commerce, Washington, D C, 1994, 1~99
- [17] Frank R. An atlas of surface fluxes based on the ECMWF reanalysis—A climatological dataset to force global ocean general circulation models. Report No. 323, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2001, 1~31
- [18] Gibson J K, Kallberg P, Uppala S, et al. ECMWF Re-analysis Project Report Series. 1997
- [19] Simmons A J, Gibson J K. ERA-40 Project Plan, ERA-20 Project Rep. 1. ECMWF, 2000
- [20] Carton J, Giese B. Simple Ocean Data Assimilation (SODA) reanalysis effort. CLIVER Workshop on Ocean Reanalysis. 2004
- [21] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D14), 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- [22] Jin F-F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 811~829
- [23] Jin F-F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 830~847
- [24] 肖栋, 李建平. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态. *大气科学*, 2007, **31** (5): 839~854
Xiao Dong, Li Jianping. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 839~854
- [25] Wu A, Hsieh W W. Nonlinear interdecadal changes of the El Niño–Southern Oscillation. *Climate Dyn.*, 2003, **21**: 719~730

- [26] Latif M, Sterl A, Majer-Reimer E, et al. Climate variability in a coupled GCM. Part I: The tropical Pacific. *J. Climate*, 1993, **6**: 5~21
- [27] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J. Climate*, 1995, **8**: 267~285
- [28] Wang B, An S-I. Why the properties of El Niño changed during the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 3709~3712
- [29] An, S-I, Yoo-Geun Ham, Kug J-S, et al. El Niño–La Niña asymmetry in the coupled model intercomparison project simulations. *J. Climate*, 2005, **18**: 2617~2627
- [30] Thompson C J, Battisti D S. A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part I: Model development. *J. Climate*, 2000, **14**: 445~466
- [31] Jin F-F, An S-I, Timmermann A, et al. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (3), 1120, doi: 10.1029/2002GL016356
- [32] An S-I, Jin F-F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *J. Climate*, 2004, **17**: 2399~2412
- [33] 张庆云, 常蕊. El Niño 事件大气-洋流异常与暖海温传播机理研究. *大气科学*, 2007, **31** (6): 1160~1170
Zhang Qing-Yun, Chang Rui. A study of anomalous atmosphere – ocean currents and the propagation mechanism for warm signal of sea temperature during El Niño events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (6): 1160~1170
- [34] An W W, Hsieh F-F, Jin A. Nonlinear analysis of the ENSO cycle and its interdecadal changes. *J. Climate*, 2005, **18**: 3229~3239
- [35] Kug J-S, Kang I-S. Symmetric and antisymmetric mass exchanges between the equatorial and off-equatorial Pacific associated with ENSO. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (C8), 3284, doi: 10.1029/2002JC001671
- [36] Wang B, An S-I. A mechanism for decadal changes of ENSO behavior: Roles of background wind changes. *Climate Dynamics*, 2002, **18**: 475~486