

ENSO 动力学及其数值模拟的研究评述*

倪允琪 沈新勇 杨修群

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

提 要

文章系统地评述了 ENSO 事件的观测事实及热带海-气相互作用方面的动力学、数值模拟研究进展, 并指出了有待解决的主要科学问题和发展前景。

关键词: ENSO 动力学 数值模拟 进展

引 言

ENSO 是高于气候噪声水平的热带海气相互作用引起的年际变化中最强的气候信号, 它不仅对热带大气海洋, 而且对全球大气环流和气候年际变化有明显的影响, 从而导致大范围气候异常现象的发生。因此, 以 ENSO 为中心的热带海气相互作用已被公认为气候研究的核心问题。世界气候研究计划(WCRP)也明确指出: 几年至数十年气候变化及其预测问题只有在充分了解全球大气和海洋动力学相互作用的基础上才有可能解决。显然, 研究 ENSO 演变规律、探索其产生条件和形成机制、揭示其与全球气候变化的联系, 进而预测它的发生、发展, 构成了当代 ENSO 动力学的全部内容, 并成为气候研究特别是气候动力学研究的重大关键性课题和探索年际气候预报的最有希望的途径之一。由此可见, ENSO 动力学的研究是具有明确应用前景的重要科学问题, 它已成为当今地球科学中发展最快的领域之一。

1 有关 ENSO 过程的重要观测事实

1.1 El Niño 发生发展的水平结构和季节依赖性

早期的研究指出, El Niño 的发生是信风减弱的结果, 例如 Bjerknes^[1]提出东南太平洋反气旋减弱伴随的东南信风的减弱是 El Niño 发生的基本条件。1975 年, 著名的海洋学家 Wyrtki^[2]根据海洋的观测事实, 提出了 El Niño 发生的海洋学模型。该模型提出了 El Niño 发生的前期特征为: (1)18 个月前开始信风加强; (2)西太平洋海平面升高; (3)西太平洋斜温层加深; (4)南美沿岸首先增暖。一旦信风松弛, 导致表层暖水西传, 出现

* 本文得到国家自然科学基金 49475256 资助。
1997-01-10 收到, 1997-07-21 收到修改稿。

El Niño 特征. 据此, 曾成功地预报了 1976 年的 El Niño 事件. 而到 1982 年, Rasmusson 和 Carpenter^[3]根据二次大战以来历史上发生的几个重要 El Niño 事件进行合成分析, 提出了一种气象学模型. 该模型揭示了海洋异常热源与大气风场、散度场和降水分布异常的关系, 并指出与南方涛动相联系的大气风场和海表温度在空间和时间上的位相差才使 ENSO 得以发展, 因而从观测研究的角度揭示了 ENSO 和海气耦合系统的不稳定特征模态的联系. 同时还指出了 El Niño 的发生发展和季节循环有明显的依赖关系(即对季节循环的“锁相”性).

由以上可知, Wyrтки 和 Rasmusson 的模型分别从观测分析入手较完整地描述了海气耦合系统中一类重要的 ENSO 发生发展的海洋学和气象学特征.

1.2 1982/83 年 ENSO 观测事实及其对经典模型的修正

1982/83 年 ENSO 事件是一“非常特殊”的事件, 其发展的强度之大和发生、发展的方式均与以前的 ENSO 有显著不同. Gill 和 Rasmusson (1983), Rasmusson 和 Wallace (1983)等均对这次过程作了细致分析, 指出其最主要特征是这次 ENSO 首先产生于赤道西太平洋而不是传统认为的赤道东太平洋, 并缓慢地向东移动. 为此, Rasmusson 和 Wallace^[4]提出了对 El Niño 模型的修正, 认为 El Niño 增暖过程有两类, 一类首先出现在东部, 然后向西扩展; 另一类是日界线以东整个中东太平洋大范围增暖. 而传统典型的 ENSO 增暖被认为是两种类型的叠加. 因此, 上述观测事实表明 ENSO 事件不仅涉及赤道东太平洋而且也涉及到西太平洋, 后者的重要作用又为人们所注意. 后来 Bergman (1987)、Barston (1987)和 Nitta 等 (1987)分析 1986/87 年 El Niño 事件时再次证明了上述观点.

我国学者王绍武^[5]、张先恭^[6]等指出 ENSO 事件从发展特点上可以分为两类, 第一类开始于上半年, 正距平首先出现在南美沿岸, 称之为太平洋东部型; 第二类开始于下半年, 正距平首先出现于赤道中太平洋, 称之为太平洋中部型, 并且讨论了 ENSO 对中国气候异常(气温、降水)的影响.

1.3 ENSO 变化性中的多重时间和空间尺度的相互作用

ENSO 事件的周期为 2~9 年, 表现出较宽的谱带特征. Rasmusson 等 (1990)、Barnett (1991)和 Ni 等 (1996)^[7]根据观测研究均提出了 ENSO 主要由 3 种时间尺度的分量组成: 3 年以上的低频变化模态(LF)、准二年振荡(QB)和年循环(AC). ENSO 过程的多重时间尺度的概念已得到越来越多的观测事实证实.

热带太平洋大尺度海气年循环特征及其和 ENSO 过程年际变化性的关系一直受到人们的注意. Hore 等 (1982)较全面地揭示了海气年循环的基本特征, 指出赤道以外的年循环主要随纬向变化, 这是太阳加热年循环强迫的结果, 而沿赤道年循环主要是经向变化, 如 SST 最暖在 3 月位于南美沿岸, 然后随时间向西推移. Meehl (1987)揭示了年循环与热带太平洋/印度洋地区年际变化性之间的关系, 指出年循环在 QB 分量中起着最基本的作用, 固定或强烈地影响 QB 分量的位相.

ENSO 变化性中的准二年振荡的研究早为气象学家所重视, Yasunari (1987)、Gutzler 和 Harrison (1987)以及 Ni 和 Zhang (1995)^[8]均指出在 ENSO 强信号区、对流层大气中的风场、气压场和速度势场中存在 QB 信号. Ni 和 Zhang (1995)^[8]还进一步指出

QB 在热带太平洋上空所具有东传的波动性及其与亚洲季风的联系. Lau 和 Shen(1988) 指出 QB 分量是热带海气系统中的一种最基本的长期振荡过程, 可能正是 QB 通过非线性相互作用导致 ENSO 循环的产生.

Barnett(1991)、Ropelewski 等(1992)、Rasmusson 等(1990)以及 Ni 等(1996)进一步研究了 ENSO 过程中多重时间尺度相互作用. Barnett(1991)指出 QB 分量呈现向东传播特征, 而 LF 分量则主要呈弱波振荡. 而 Ni 等(1996)^[7]研究结果表明 LF 是一种具有非常明显的东传低频波特征, 它具有全球尺度, 沿赤道波数为 2, 同时它有可能是由中西热带太平洋对流低频振荡所激发的. 而现在的问题是上述 3 个分量是如何进行相互作用产生 2~9 年周期的 ENSO 循环, 亦即 ENSO 循环是 LF、QB、AC 等主要周期的振荡非线性相互作用所产生的结果.

2 ENSO 循环动力学及其数值模拟的研究进展

事实上, 从 Bjerknes(1969)以来大量的观测事实表明: (1) ENSO 过程本质上是海气相互作用问题, 因此, 研究其形成机理的模式必须是海气双向耦合的; (2) ENSO 事件不是单个事件问题, 而是一种循环, 即涉及其如何起始、持续、结束和不规则再现等动力学和热力学过程问题. 有关这方面的研究最重要的有如下几个方面:

2.1 耦合不稳定海气相互作用理论

Philander 等(1984)^[9]首次将简单大气动力学方程组与简单的海洋动力学方程组相耦合, 研究了海气耦合不稳定波, 成为 ENSO 动力学发展的一个新起点. 他的研究表明, 在非旋转和 f 平面近似条件下, 该系统确实存在不稳定模态; 在不简化条件下若给定一个初始扰动, 该扰动在数值积分过程中具有不稳定发展的 Kelvin 波特特性, 且伴随着海气相互作用缓慢地向东传播. Philander 等进一步指出, 大气平均辐合带及其季节移动对不稳定的海气相互作用的发生和维持起到制约作用. Yamagata(1985)研究指出不稳定模态类似于海洋中的 Kelvin 波, 大气风场和洋流之间的正相关是不稳定产生的必要条件, 并进一步提出不稳定海气相互作用使风场动能向洋流能量转换的结论. Rennick(1983)、Gill(1985)和 Hirst(1985)得到了一类和 Philander 等不同的不稳定模态, 该模态具有 Rossby 结构并缓慢向西移动. Anderson 和 McCreary(1985)利用 Gill 模式和较为完整的 SST 预报方程耦合研究指出: 耦合系统可以出现不稳定发展, 而这种不稳定不能无限发展, 而是获得最大振幅以后缓慢地向东传播. 巢纪平等(1988)^[10]指出即使从模式中滤去 Kelvin 波, 通过海气相互作用耦合波也可以向东传播, 产生不稳定.

上述研究表明, 通过海气耦合系统线性波动特征模的研究, 可揭示海气耦合线性系统中自由模的不稳定发展. 海气耦合诱导的正反馈机制是波动不稳定发展的原因, 也是 ENSO 循环中扰动发展的动力学机制. 但它不能解决 ENSO 循环的准周期问题, 也不能解决 ENSO 循环中的动力学和热力学过程, 这只有通过以下的数值模拟手段来解决.

2.2 ENSO 循环的形成机制

利用简单耦合模式比较真实地再现 ENSO 循环特征, 并对这种循环的产生机制进行

探讨. 具有代表性的工作是 Zebiak 和 Cane(1987)^[11]、Battisti 等(1988)以及 Schopf 和 Suarez(1988)^[12]的研究.

Zebiak 和 Cane(1987)^[11]研制了一个比较简单的海气耦合距平模式(简称 ZC 模式). 通过模式多年积分表明:(1)在没有外强迫条件下热带太平洋海气耦合系统可以产生准周期振荡现象,其主周期为 3~4 年;(2)平均场的季节变化对 ENSO 产生明显的“锁相”现象;作者进一步讨论认为模式 ENSO 循环的产生机制包含 3 个方面:一是存在一个大尺度海气异常的正反馈;二是存在使之平衡的非线性机制,使这种不稳定不能任意增长;三是东太平洋和相应的赤道风应力存在时滞关系. 作者断论 ENSO 循环主要受制于热带太平洋海气系统的确定性,可以提前 1~2 年预报出来.

Battisti(1988)利用 ZC 模式进一步研究,强调了海洋波动的传播及其在西边界的反射效应对 ENSO 循环的重要性,提出 ENSO 循环是热带太平洋东西边界反射作用的结果.

Schopf 和 Suarez(1988)^[12]利用海洋和大气均为非线性的两层原始方程模式耦合积分比较成功地模拟了 3~5 年时间尺度的 ENSO 振荡,强调耦合系统的非线性动力学的作用,并提出 ENSO 循环的形成主要是海气耦合不稳定和海洋波动传播过程决定的.

后来, Suarez 和 Schopf(1988)和 Battisti 等(1989)把上述模式结果归结为时滞振子(delayed oscillator)方程,即 $dT/dt = aT - cT(t-\tau) - bT^3$. 通过求解时滞振子方程得到一个增幅的振荡型解.

目前利用 OGCM 和 AGCM 耦合即 CGCM 对 ENSO 年际变化特征模拟已取得初步进展,如 GFDL 的 Philander 等(1992)、Lau 等(1992)和德国 MPI 的 Latif 等(1990)以及 UCLA 的 Mechoso 等均进行了这类研究,但其中大部分模式模拟结果展示了较弱的年际变化,其原因主要有两个:一是“耦合强度”普遍偏小,而耦合强度依赖于大量模式参数,如气候平均态特征,模式参数化过程等;二是气候漂移. 最近 Lau 等(1992)和 Philander 等(1992)分别使用低分辨和高分辨的 CGCM 对 ENSO 变化性的模拟取得了成功. 除了模拟出 ENSO 不规则变化特性外,还对 ENSO 形成机制进行了讨论,指出 CGCM 结果中并不存在“时滞振子”理论中所述的赤道波动的演变过程. 因此,“时滞振子”理论中的时滞 τ 不应是赤道海洋 Rossby 波和 Kelvin 波传播时间,而应理解为海洋对早期风场响应的记忆时间. 这些结果和“时滞振子”理论有明显不同.

2.3 热带大气 30~60 天低频振荡和 ENSO 相互作用

Lau 和 Chan(1988)^[13]研究指出,周期为 30~60 天向东传播的热带大气低频振荡在海气耦合相互作用下有可能触发 El Niño 的发生. Lau 和 Shen(1988)^[14]利用一简单海气耦合模式并引入一个蒸发反馈机制,研究结果表明,在有海气耦合相互作用下,其平流波在东传过程中由于受 SST 影响,海温不断上升,大气波动稳定性减小而发展起来,大气季节内振荡被减速增幅,最后可导致 ENSO 的发生. Hirst 和 Lau(1990)利用较复杂的模式在较为真实的参数条件下进一步做了研究,指出在一定条件下失稳的“高频模”(30~60 天周期)和“低频”海气耦合模可以同时存在,并有可能通过非线性过程发生相互作用. Nitta 和 Motoki(1987)、Nitta(1987)和 Nakazawa(1987)分析了 1986/87 年 ENSO 事件的对流活动情况,指出周期为 30~60 天的超级云团东移发展可诱导出赤道太平洋对

流层低层西风暴发.

我国学者陈隆勋、谢安(1987)^[15]采用 OLR 资料讨论了 1982~1983 年 ENSO 和 30~60 天低频振荡之间的关系,指出 El Niño 前 9 个月到 2 个月,东半球赤道附近 LFO 突然异常活跃,在 90°E 和 135°E 处出现明显的振荡中心,向东传播也十分明显. El Niño 发生后,东半球赤道附近 LFO 活动突然减弱,上述两处振荡中心消失. 无论从全年的 OLR 资料 LFO 分量的 EEOF 分析或冬季的 EOF 分析,都可以发现两种正常的 LFO 扰动分布在 El Niño 前半年有一个异常活跃期,El Niño 发生后突然被抑制.

还应指出,观测研究和 GCM 研究都表明 El Niño 对热带大气 30~60 天振荡起削弱作用. 这就清楚地表明热带大气季节内振荡和 ENSO 是相互影响的,异常强的赤道中西太平洋 30~60 天振荡对 ENSO 有触发作用,而 El Niño 的发生反过来又削弱 30~60 天振荡的强度.

2.4 ENSO 和亚洲季风的相互作用

90 年代提出了一个崭新的研究方向,即 ENSO 和季风的联系. 目前,这一课题研究吸引了不少气象学家,初步研究表明,ENSO 的发生可以严重影响亚洲季风活动,如 El Niño 年夏季印度季风减弱,而东亚季风加强,La Niña 年夏季则反之(倪允琪等,1996;孙淑清等,1996),这一结果清楚地表明 ENSO 对亚洲季风的影响. 反过来,亚洲季风对 ENSO 的形成、发展有没有影响呢? 这一问题最近引起了气象学家的普遍关注. 李崇银(1988)^[16]指出在 El Niño 发生前的冬半年,东亚地区有频繁的强寒潮活动,导致赤道中西太平洋地区信风减弱,认为这一现象对 El Niño 的发生有重要作用. Lau 等(1996)、Yang 等(1996)、Zou 和 Ni(1996)^[17]均指出在两年的时间尺度上 ENSO 和季风之间可以发生相互作用. 上述研究目前正在展开,相信会有更进一步的结果.

此外,陆面过程也是气候系统中不可分割的组成部分,陆地表面与大气环流的相互作用问题日益引起人们的关注. 要完整系统地研究 ENSO 现象及其对气候的影响,必须要讨论海-陆-气相互作用问题.

3 ENSO 研究中存在的主要问题

虽然 ENSO 研究已开展了有 10 多年时间,但目前不论在观测事实的揭露上,还是理论和模式、模拟研究方面仍存在一系列问题,这些问题大致上可归为如下 8 个方面:

(1) 准周期性 ENSO 循环形成机制的核心问题及发生发展条件. 这一问题尤其在 1991/94 年 ENSO 异常发展后显得更为重要. 因此,讨论 ENSO 循环形成机理就显得更为迫切. ENSO 形成应包含以下 4 个方面: (a) ENSO 发生发展或能量维持的物理机制; (b) ENSO 的恢复机制或负反馈机制; (c) ENSO 的时间尺度选择机制; (d) ENSO 过程主要是线性还是非线性过程.

(2) 模式 ENSO 循环的真实性,真实的指标应为时间谱相似和水平空间结构演变相似.

(3) ENSO 过程的全球特征,即 ENSO 形成完全是热带太平洋海气相互作用的结果,还是具有全球尺度特征和全球热带海气相互作用有关的现象. Ni 等(1996)已经清楚

指出 ENSO 变化性的低频分量具有全球尺度的低频东传波的特性, 这表明 ENSO 过程可能具有全球特征。

- (4) 亚洲季风和 ENSO 的相互影响及相互作用。
- (5) 中低纬相互作用在 ENSO 形成和发展中的作用。
- (6) ENSO 对中纬度大气环流和气候异常的影响(另文讨论)。
- (7) 海洋大气耦合系统中的突变现象和海气之间的非线性相互作用。
- (8) ENSO 的可预报性。

上述 8 个方面问题应继续开展研究, 才有可能在 ENSO 动力学方面取得更大的进展。

参 考 文 献

- 1 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 163~172.
- 2 Wyrtki K. El Niño—The dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**: 572~584.
- 3 Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 354~384.
- 4 Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, **222**: 1195~1202.
- 5 王绍武. 气候系统引论. 北京: 气象出版社, 1994. 94~99.
- 6 赵汉光, 张先恭, 丁一汇. 厄尔尼诺与我国气候异常. 1988 年长期天气预报文集. 北京: 气象出版社, 1990. 334~336.
- 7 Ni Y, Zou L. Diagnosis of low-frequency component of ENSO variability. Part I: Origin of the component. *Acta Meteor. Sinica*, 1997, **11**(1): 19~28.
- 8 Ni Y, Zhang Q. Low frequency characteristics of tropical Pacific windstress anomalies in observation and simulations from simple and comprehensive models. *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**(4): 445~460.
- 9 Philander S G, Yamagata T, Pacanowski R C. Unstable air-sea interactions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 604~613.
- 10 Chao J, Zhang R. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities. *Acta Meteor. Sinica*, 1988, **2**: 275~287.
- 11 Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2279.
- 12 Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 549~566.
- 13 Lau K M, Chan P H. Interannual and intraseasonal variations of tropical convection: A possible link between the 40~50 day oscillation and ENSO? *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 506~521.
- 14 Lau K M, Shen S. On the dynamics of intraseasonal oscillations and ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1781~1797.
- 15 陈隆勋, 谢安. OLR 资料所揭示的 El Niño 和 30~60 天振荡之间的关系. 气象科学技术集刊. 北京: 气象出版社, 1987. 26~35.
- 16 李崇银. 频繁的强大东亚大槽活动与 El Niño 发生. 中国科学, 1988, 667~674.
- 17 Zou L, Ni Y. Diagnosis of low-frequency component of ENSO variability. Part I: Global-scale dynamic characteristics of the component. *Acta Meteor. Sinica*, 1996, **10**(4): 419~429.

A REVIEW OF ENSO DYNAMICS AND ITS NUMERICAL SIMULATION

Ni Yunqi Shen Xinyong Yang Xiuqun

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

The present paper has comprehensively reviewed the advances in observations of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) phenomenon and in dynamics and numerical simulation of the tropical air-sea interaction. Some major scientific problems which need to be emphasized and solved are put forward here.

Key words: ENSO dynamics Numerical simulation Advances