

简单海气耦合模式大气运动方程的非线性对 ENSO 循环模拟的影响

林万涛 张博 林一骅

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

摘要 研究简单海气耦合模式大气运动方程非线性对 ENSO 循环的影响, 即讨论大气运动方程的纬向非线性、经向非线性、纬向和经向非线性对 ENSO 循环的影响。同时, 讨论了 ENSO 循环对大气运动方程非线性的敏感性问题。数值实验证明, 大气运动方程的非线性对 ENSO 循环的影响明显, 并且 ENSO 循环对大气运动方程的非线性非常敏感。因此, 研究简单海气耦合模式中大气运动方程的非线性对 ENSO 循环的影响, 对进一步理解 ENSO 循环的物理机制, 具有一定的理论意义和实用价值。

关键词 海气耦合模式 大气运动方程 非线性 ENSO 循环

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0253-07 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

Influences of Nonlinear Factors of Governing Equations for the Atmosphere on ENSO Cycles in a Coupled Ocean-Atmosphere Model

LIN Wan-Tao, ZHANG Bo, and LIN Yi-Hua

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

Abstract Based on a simple coupled ocean-atmosphere model, the influences of nonlinear factors on ENSO cycles are investigated when zonal or meridional factors or both of them are considered in governing equations for the atmosphere. At the same time, the sensitivity of ENSO cycles to nonlinear factors of governing equations for the atmosphere is further discussed. It is proved by results of numerical tests, the influences of nonlinear factors of governing equations for the atmosphere on ENSO cycles are obvious, and ENSO cycles are very sensitive for nonlinear factors. Therefore, it has a certain theoretical meaning and practical value to study the influences of nonlinear factors of governing equations for the atmosphere on ENSO cycles for further understanding of the cyclic mechanisms of ENSO.

Key words simple coupled ocean-atmosphere model, governing equations for the atmosphere, nonlinear, ENSO cycle, influence

1 引言

ENSO 是年际气候变化的重要信号, 它的出

现往往给全球不少地方造成严重的气候异常和灾害, 其对东亚季风的活动也有明显的影响。另一方面, 作为热带大气和海洋耦合相互作用的产物, ENSO 的发生也自然地与大气环流的异常, 尤其

是东亚季风活动的异常有关^[1]。而东亚季风的
活动异常对我国夏季旱涝有重要的影响^[2, 3]。因此，
研究 ENSO 的发生、发展及变化规律并对其进行
预测，具有十分重要的意义。

虽然国际国内在 ENSO 预测研究上取得了一
定的成绩，但仍存在许多问题。如 Zebiak 和 Cane
发展的一个简单的海气耦合距平模式（称 ZC 模
式）提前一年预报出了 1987 年和 1991 年的 EN-
SO 事件，但它没有预报出 1997 年的 ENSO 事件。

其他模式也不同程度地存在这样或那样不尽
人意的地方。究其原因，首先是由初始场误差所
引起的预报误差而导致结果的不确定性，即所谓
的第 1 类可预报性问题^[4]。除此之外，对 ENSO

的发生、发展和变化机制，即 ENSO 的循环机制
还不十分清楚，也是一个非常重要的问题^[5]。

为弄清楚 ENSO 循环的机制，自 20 世纪 80
年代起，相继形成了一些旨在解释和模拟 ENSO
循环机制的海气耦合理论和模式^[6~8]。这些理论
和模式只能模拟或解释 ENSO 循环，但不能再现
ENSO 事件的非周期性变化。80 年代中后期 ZC
模式成功地模拟了 ENSO 事件发生的不规则间断，
所模拟的海温变化中有 3~4 年的非周期振
荡^[9, 10]。80 年代 ZC 模式的模拟和预报是成功
的，而这一时期内 ENSO 发生的时间间隔大致为
4 年，ZC 模式确定的参数正好可以再现它。90
年代初发生的 ENSO 事件其时间间隔已不是 4

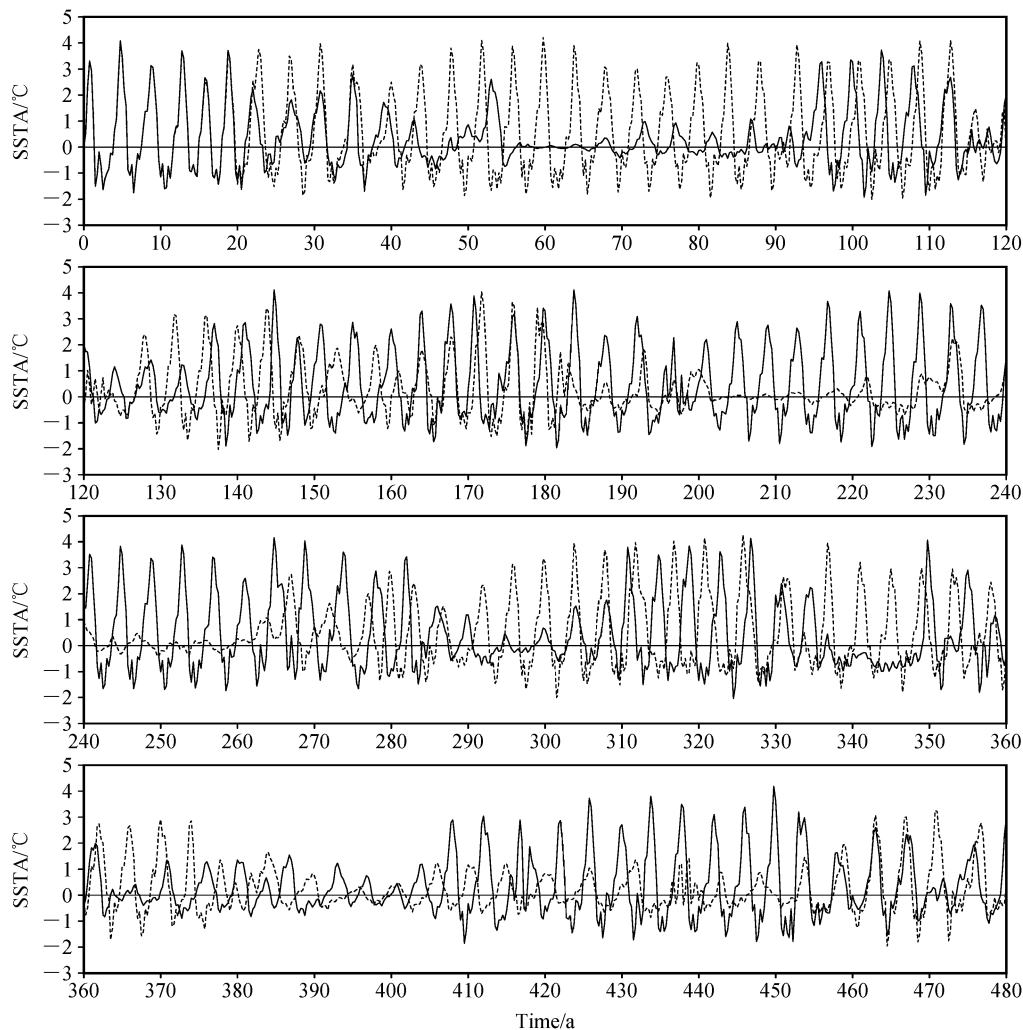


图 1 模式积分 480 年海面温度距平 (SSTA) 时间序列曲线 (实线: 原始模式; 虚线: 纬向非线性系数为 0.0009)
Fig. 1 The temporal sequence line of mean SSTA by model integral for 480 years (solid line: original ZC model; dashed line: zonal non-linear factor 0.0009)

年，于是 ZC 模式也包括其他所有的模式都未能预报出来。

由于海气相互作用的复杂性和非线性，用简单模式对 ENSO 进行理论解释是十分困难的。因此数值模拟成为常用的手段。近十几年来，运用中尺度耦合模式^[11~14]、大气环流模式^[15, 16]和混合模式^[17, 18]对 ENSO 进行数值模拟取得了很大进展。从数值试验得到的结果使我们对 ENSO 的物理机制有了更进一步的认识。

与此同时，依据 Bjerknes 的假设，对大气和海洋耦合系统特性的理论研究也有所进展，如 Neelin 等^[19]的研究工作。早期的理论工作所用的模式主要是典型的耦合模式^[20]。Philander 等^[8]首

先针对赤道 β 平面上的耦合浅水系统，给出了严格的稳定性分析。之后，其他人也做了大量的研究工作^[21~31]。暖事件的发生现在被认为是大气和海洋耦合不稳定的结果。然而，不可否认的是理论模式的发展始终被限制在线性动力框架之中，而耦合系统的非线性演变规律取得的进展非常少。

综上所述，在理论上解释 ENSO 的物理机制是十分困难的。这是因为 ENSO 是年际气候变化的重要信号，是一个复杂的非线性海洋—大气耦合系统。由于大气和海洋运动本质上的非线性，只有在对 ENSO 预报模式的研究中，对由非线性导致的问题与困难进行深入研究，才能真正揭示

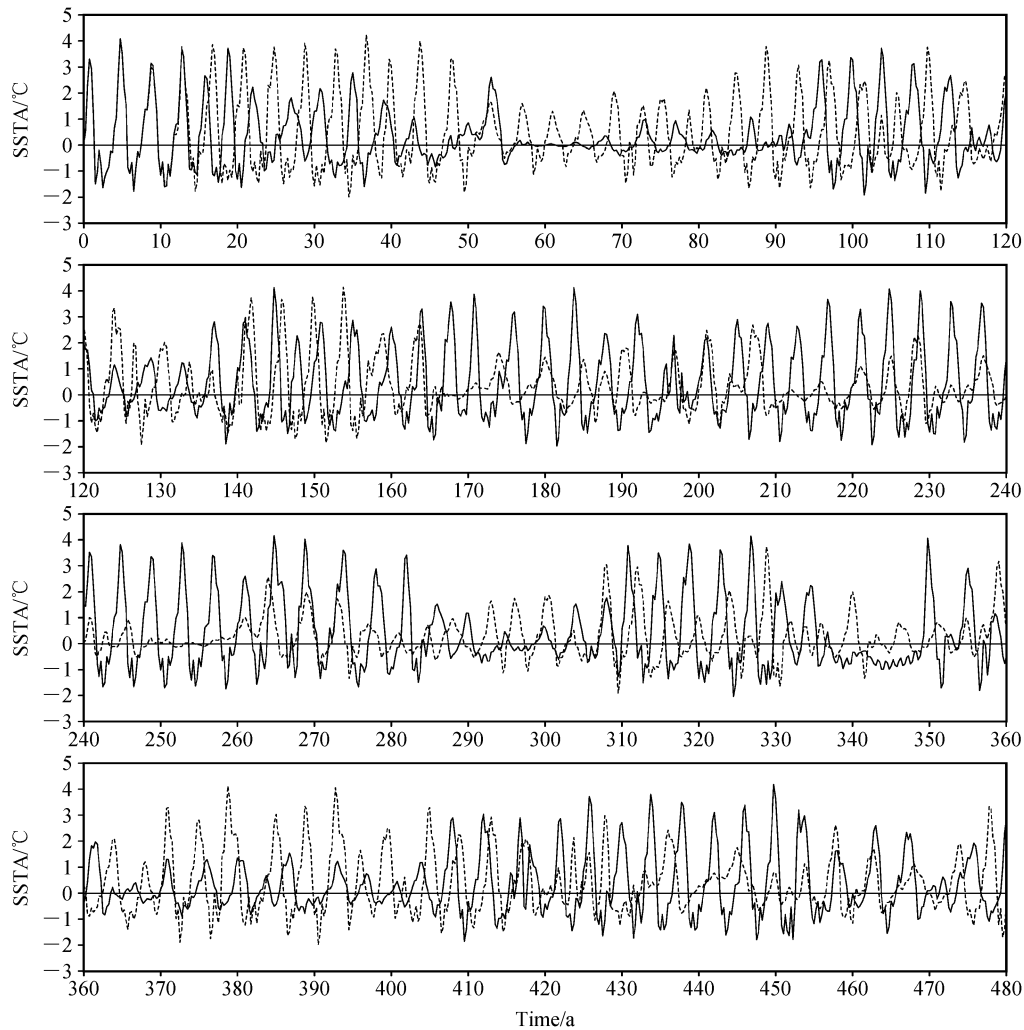


图 2 模式积分 480 年海面温度距平 (SSTA) 时间序列曲线 (实线: 原始模式; 虚线: 经向非线性系数为 0.9)

Fig. 2 The temporal sequence line of mean SSTA by model integral for 480 years (solid line: original ZC model; dashed line: meridional nonlinear factor 0.9)

ENSO 循环的机制, 形成有效的理论和方法, 提高对 ENSO 的预报、预测能力。为了研究 ENSO 的非线性特征, 针对一些简单的 ENSO 海气耦合模式, 许多学者用不同的方法对它的局部性和整体性的形态做了多方位的研究^[32~36]。

本文以 ZC 模式为例, 首先对模式中的线性大气模式进行了非线性拓展, 然后对海气耦合模式大气运动方程中非线性对 ENSO 循环的影响, 即大气运动方程中的纬向非线性、经向非线性、纬向及经向非线性对 ENSO 循环的影响分别进行了讨论。同时, 讨论了 ENSO 循环对大气运动方程非线性的敏感性问题。这对进一步认识 ENSO 循环的物理机制, 提高模式对 ENSO 的预测能力,

具有一定的理论意义和实用价值。

2 大气运动方程的非线性拓展及数值实验

ZC 模式中大气运动方程是线性的, 进行非线性拓展后大气运动方程的形式如下:

$$\begin{aligned}\epsilon u_a + \delta \cdot u_a u_{ax} + \delta \cdot v_a u_{ay} - \beta y v_a &= -p_x, \\ \epsilon v_a + \delta \cdot u_a v_{ax} + \delta \cdot v_a v_{ay} - \beta y u_a &= -p_y, \\ \epsilon p + \delta \cdot u_a p_x + \delta \cdot v_a p_y + c_a^2 [(u_a)_x + (v_a)_y] &= Q,\end{aligned}$$

式中, u_a 和 v_a 分别是海表纬向和经向风距平, p 是气压, ρ_a 是空气密度, c_a 是大气波速, f 是科

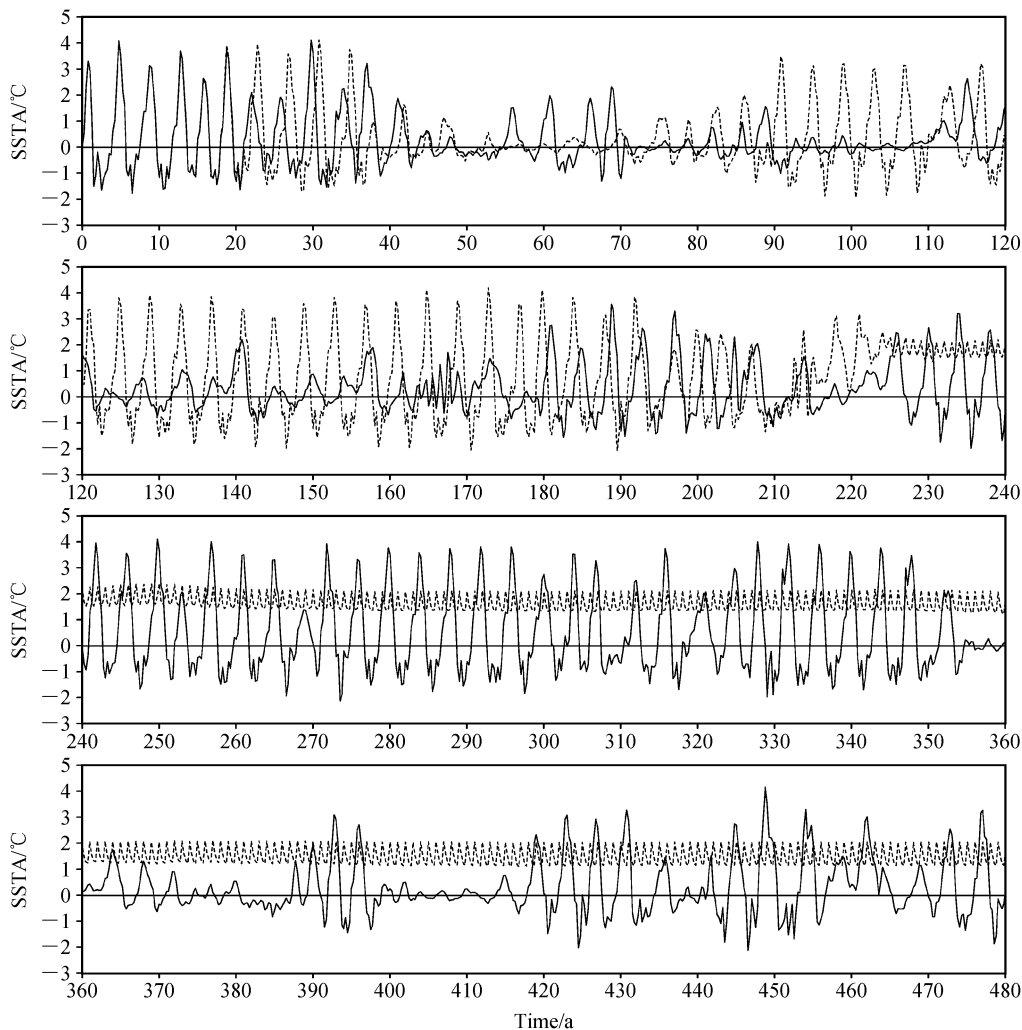


图3 模式积分480年海面温度距平(SSTA)时间序列曲线(实线:纬向非线性系数为0.0001;虚线:纬向非线性系数为0.00011)

Fig. 3 The temporal sequence line of mean SSTA by model integral for 480 years (solid line: zonal nonlinear factor 0.0001; dashed line: zonal nonlinear factor 0.00011)

里奥利参数, ϵ 是雷利摩擦系数, Q 为加热距平。这里 $0 \leq \delta \leq 1$, 为一小参数, 称为非线性系数。在讨论纬向非线性对 ENSO 循环的影响时, 称为纬向非线性系数; 讨论经向非线性对 ENSO 循环的影响时, 称为经向非线性系数。

针对以上非线性拓展后大气运动方程, 取 δ 初始值和终值分别为 0.0001 和 1, 步长 $\Delta\delta = 0.0001$, 进行了一系列数值实验, 实验的区域为 Niño 3 区 ($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{W}$)。在数值实验的基础上, 讨论了海气耦合模式大气运动方程中非线性对 ENSO 循环的影响及 ENSO 循环对大气运动方程非线性的敏感性问题。

3 大气运动方程的非线性对 ENSO 循环的影响

为了研究大气运动方程的非线性对 ENSO 循环的影响, 我们选择了几个比较典型的数值实验结果 (见图 1 和 2)。

由图 1 和 2 可以看出, 大气运动方程中的非线性对 ENSO 循环的具体影响相当明显。和原始模式的积分结果进行比较, 加入非线性的模式积分结果有明显不同的变化。非线性对 ENSO 循环的周期和振幅影响不是很大, 但对 ENSO 循环的

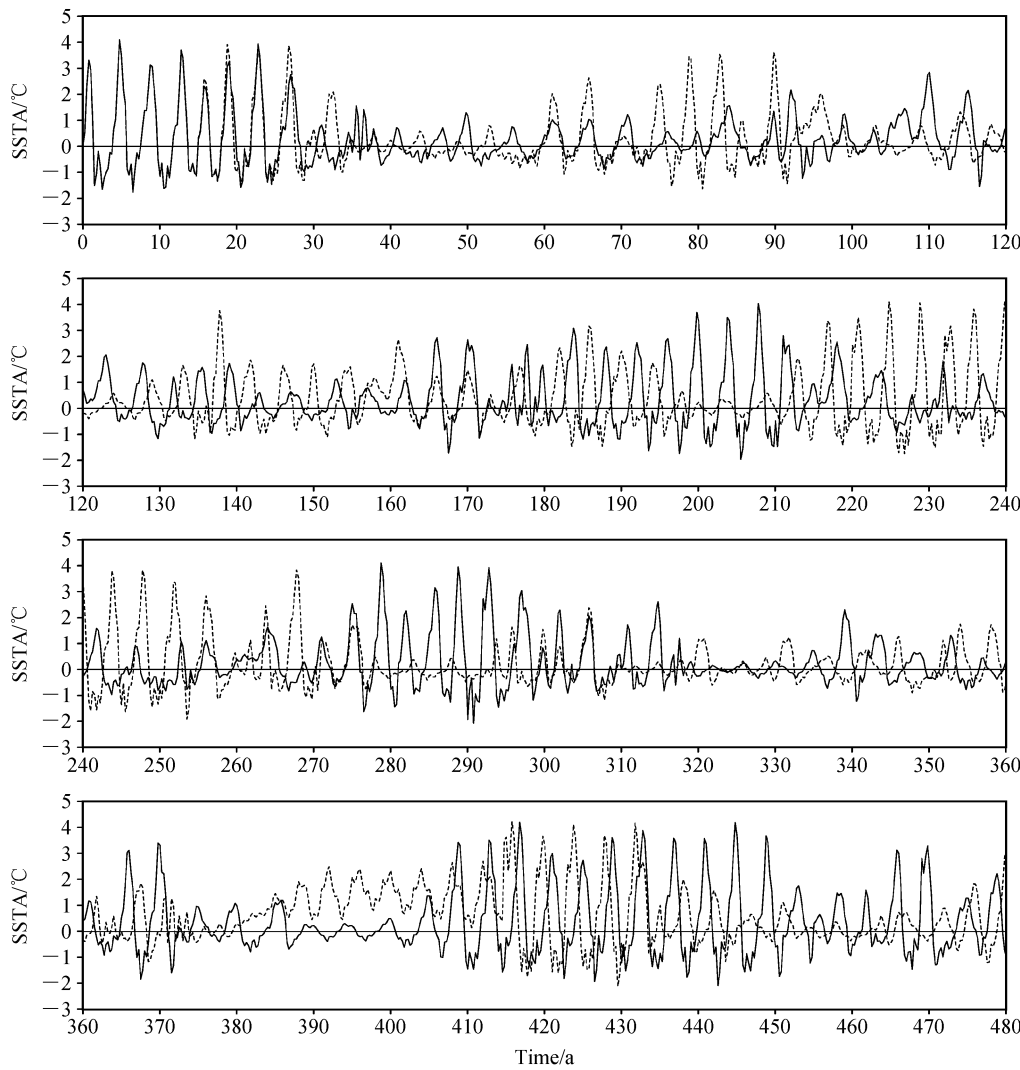


图 4 模式积分 480 年海面温度距平 (SSTA) 时间序列曲线 (实线: 经向非线性系数为 0.0001; 虚线: 经向非线性系数为 0.00011)
Fig. 4 The temporal sequence line of mean SSTA by model integral for 480 years (solid line: meridional nonlinear factor 0.0001; dashed line: meridional nonlinear factor 0.00011)

年代际变化有较大的影响。这种影响随着积分时间的增加变得越来越明显,尤其在积分时间段 240~480 年,原模式和非线性模式对 ENSO 年代际变化的模拟结果明显不同。

4 ENSO 循环对大气运动方程非线性的敏感性

为了研究 ENSO 循环对大气运动方程非线性的敏感性问题,我们进行了一系列的数值实验。图 3 和 4 所示的是典型事例。

由图 3 和 4 可以看出,ENSO 循环对大气运动方程的非线性是非常敏感的。无论是纬向非线性系数及经向非线性系数分别发生微小改变,都会使 ENSO 循环的年代际变化发生根本的改变。尤其是在模式积分 20 年以后,这种变化随着积分时间的增加变得越来越明显。同时,数值实验的结果表明,虽然 ENSO 循环对大气运动方程的非线性,即纬向非线性、经向非线性以及纬向和经向非线性都是敏感的,但对纬向非线性似乎更为敏感。

5 结论与讨论

本文对一个简单的海气耦合模式大气运动方程进行了非线性拓展,在此基础上通过数值实验来讨论非线性对 ENSO 循环的影响。数值实验的结果表明:大气运动方程中的非线性对 ENSO 循环的影响是明显的。模式积分的时间越长,非线性对 ENSO 循环的影响就越大。同时,ENSO 循环对大气运动方程的非线性是非常敏感的。非线性任何一点微小的变化,都将导致 ENSO 循环的年代际变化发生很大的改变。

以上结果表明,大气运动方程的非线性对 ENSO 循环的预测预报起着非常重要的作用。目前之所以不能对 ENSO 循环进行准确的预测,主要原因就是不清楚 ENSO 循环的物理机制。而影响 ENSO 循环的主要因素是 ENSO 循环过程中非线性所起的作用。由于海气相互作用的复杂性和非线性,从理论上解释 ENSO 循环的物理机制是十分困难的。因此,数值模拟成为研究 ENSO 循环物理机制的重要手段。但对 ENSO 循环进行数

值模拟时,只有充分考虑非线性对 ENSO 循环的影响,才能进一步了解 ENSO 循环的物理机制。同时,在具体设计预测预报 ENSO 循环的数值模式时,只有充分考虑非线性对模式预报结果的影响,才能建立对 ENSO 循环预报更加准确的模式。

参考文献 (References)

- [1] 黄荣辉,陈文. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 146~159
Huang Ronghui, Chen Wen. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycles. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 146~159
- [2] 陈烈庭. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响. 大气科学, 1977, **1** (1): 1~12
Chen Lieting. Influence of sea surface temperature anomaly over the equatorial eastern Pacific on tropical general circulation and flood season precipitation in China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1977, **1** (1): 1~12
- [3] 李崇银. 厄尔尼诺影响西太平洋台风活动的研究. 气象学报, 1987, **45** (2): 229~236
Li Chongyin. A study on the influence of El Niño upon typhoon action over western Pacific. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1987, **45** (2): 229~236
- [4] Thompson C J. Initial conditions for optimal growth in a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 537~557
- [5] 巢纪平. 厄尔尼诺和南方涛动动力学. 北京: 气象出版社, 1993. 309pp
Chao Jiping. *ENSO Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 309pp
- [6] Gill A E. Some simple solution for heat induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 447~462
- [7] McCreary J P. A model of tropical ocean-atmosphere interaction. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 370~387
- [8] Philander S G H, Yamagata T, Pacanowski R C. Unstable air-sea interaction in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 604~613
- [9] Canessa A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecast of ENSO. *Nature*, 1986, **321**: 827~832
- [10] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-southern oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2278
- [11] McCreary J P, Anderson D L T. A simple model of El Niño and the southern oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 934~946
- [12] Cane M A, Zebiak S E. A theory for El Niño and the

- southern oscillation. *Science*, 1985, **228**: 1084~1087
- [13] Anderson D L T, McCreary J P. Slowly propagating disturbances in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 615~629
- [14] Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 549~566
- [15] Philander S G H, Launc N C, Pacanowski R C, et al. Two different simulations of southern oscillation and El Niño with coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Philos. Trans. Roy. Soc. London Ser. A*, 1989, **329**: 167~178
- [16] Latif M, Sterl A, Maier-Reimer E, et al. Structure and predictability of the El Niño/southern oscillation phenomenon in a coupled ocean-atmosphere general circulation model. *J. Climate*, 1993, **6**: 700~708
- [17] Neelin J D. The slow sea surface temperature mode and the fast-wave limit: Analytic theory for tropical interannual oscillations and experiments in a hybrid coupled model. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 584~606
- [18] Neelin J D, Jin F F. Models of interannual tropical ocean-atmosphere interaction-A unified view. Part II: Analytical results in the weak-coupling limit. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 3504~3522
- [19] Neelin J D, Latif M, Jin F F. Dynamics of coupled ocean-atmosphere models: The tropical problem. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1994, **26**: 617~659
- [20] McWilliams J C, Gent P R. A coupled air and sea model for the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **35**: 962~989
- [21] Lau K M. Oscillations in a simple equatorial climate system. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 248~261
- [22] Gill A E. Elements of coupled ocean-atmosphere models for the Tropics. In: *Coupled Ocean-Atmosphere Models*, Nihoul J C J, Ed. Elsevier; Elsevier Oceanography Series, 1985. **40**: 303~327
- [23] Yamagata T. Stability of a simple air - sea coupled model in the Tropics. In: *Coupled Ocean-Atmosphere Models*, Nihoul J C J, Ed. Elsevier; Elsevier Oceanography Series, 1985. **40**: 637~657
- [24] Battisti D S, Hirst A C. Interannual variability in the tropical atmosphere-ocean system: Influence of the basic state and ocean geometry. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 1687~1712
- [25] Xie S P, Kubikawa A, Hanawa K. Oscillations with two feedback processes in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1989, **2**: 946~964
- [26] Wakata Y, Sarachik E S. Unstable coupled ocean-atmosphere basin modes in the presence of a spatially varying basic state. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 2060~2077
- [27] Jin F F, Neelin J D. Modes of interannual tropical ocean-atmosphere interaction-A unified view. Part I: Numerical results. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 3477~3503
- [28] Jin F F, Neelin J D. Modes of interannual tropical ocean-atmosphere interaction-A unified view. Part III: Analytical results in fully coupled cases. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 3523~3540
- [29] Jin F F, Neelin J D, Ghil M. El Niño on the Devil's Staircase: Annual subharmonic steps to chaos. *Science*, 1994, **264**: 70~72
- [30] Wang C, Weisberg R H. On the "slow mode" mechanism in ENSO-related coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1994, **7**: 1657~1667
- [31] Wang B, Wang Y. Temporal structure of the southern oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. *J. Climate*, 1996, **9**: 1586~1598
- [32] 封国林, 董文杰, 贾晓静, 等. 海-气振荡子中的极限环解. *物理学报*, 2002, **51** (6): 1181~1185
Feng Guolin, Dong Wenjie, Jia Xiaojing, et al. On the dynamics behavior and instability evolution of air-sea oscillation. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2002, **51** (6): 1181~1185
- [33] 戴新刚, 王爱慧, 丑纪范, 等. 混沌系统中可预报性的研究. *物理学报*, 2001, **50** (4): 606~611
Dai Xingang, Wang Aihui, Chou Jifan, et al. On numerical predictability in the chaos system. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2001, **50** (4): 606~611
- [34] Lin Wantao, Mo Jiaqi. Asymptotic behavior of perturbed solution for simple coupled ocean-atmosphere model for ENSO. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (Suppl.) (II): 5~8
- [35] Wang B, Fang Z. Chaotic oscillation of tropical climate: A dynamic system theory for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2786~2802
- [36] Wang B, Barillon A, Fang Z. Stochastic dynamics of El Niño-southern oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 5~23