

用非线性最优化方法研究 El Niño 可预报性的进展与前瞻

段晚锁 穆 穆

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

摘 要 综述用非线性优化方法研究厄尔尼诺 (El Niño)-南方涛动 (ENSO) 事件可预报性的进展。针对 ENSO 可预报性研究中的热点问题——“前期征兆”、“春季可预报性障碍”, 以及如何量化研究 ENSO 可预报性和 ENSO 的不对称性问题, 作者在近年来的工作中先后用理论模式和中等复杂程度 ENSO 模式研究了 ENSO 可预报性的动力学, 揭示了 ENSO 的若干重要非线性特征。主要结果如下: (1) 条件非线性最优扰动 (CNOP) (局部 CNOP) 比线性奇异向量更易发展成 ENSO 事件, 扮演了 ENSO 的最优前期征兆。这些 ENSO 事件关于气候平均态是不对称的。理论分析表明, 非线性温度平流过程是造成这种不对称性的重要原因。1980~2002 年的海洋再分析资料验证了上述理论结果。(2) ENSO 事件 CNOP 型初始误差的发展有明显的季节依赖性, 该误差导致了 ENSO 事件最显著的春季可预报性障碍 (SPB) 现象。ENSO 事件 SPB 的发生不仅依赖于气候平均态, 而且依赖于 ENSO 事件本身及其初始误差模态, 是三者综合作用的结果。(3) 建立了关于 ENSO 可预报性的最大可预报时间下界、最大预报误差上界和最大允许初始误差下界的三类可预报性问题, 分别从三个方面揭示了 ENSO 事件的春季可预报性障碍现象, 比较有效地量化了其可预报性。(4) 通过 CNOP 方法, 揭示了非线性温度平流在年代际尺度 ENSO 不对称性研究中的重要作用, 解释了 ENSO 不对称性的年代际变化, 基于所用 ENSO 模式给出了 ENSO 不对称性年代际变化的机制。最后, 展望了非线性优化方法在 ENSO 可预报性中应用的前景, 并期望该方法能拓展到 ENSO 第二类可预报性问题的研究中。

关键词 非线性 El Niño 可预报性 非线性优化

文章编号 1006-9895 (2006) 05-0759-08

中图分类号 P732

文献标识码 A

Advance and Prospect of the Studies of El Niño Predictability by Nonlinear Optimization Method

DUAN Wan-Suo and MU Mu

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

Abstract The studies of El Niño - Southern Oscillation (ENSO) predictability by using nonlinear optimization method are reviewed in this paper. For the key problems of ENSO predictability, including optimal precursors, spring predictability barrier, how to quantify ENSO predictability, and ENSO asymmetry, the authors use the theoretical model and then intermediate model to investigate the dynamics of ENSO predictability. By these investigations, some nonlinear characteristics of ENSO behavior are revealed to a certain extent. The main results are summarized as follows: (i) Conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) (local CNOP) is more potential than the corresponding linear singular vector (LSV) in evolving into El Niño (La Niña) event. CNOP and local CNOP are

therefore regarded as the optimal precursor of El Niño and La Niña respectively. These derived El Niño and La Niña events are asymmetric in amplitude about the climatological mean state (i. e., Sea surface temperature is zero). Systematic theoretical analysis demonstrates that it is the nonlinear temperature advection process that enhances El Niño significantly and suppresses La Niña negligibly, then leading to the asymmetry of ENSO. The NCEP reanalysis data during 1980 – 2002 are used to verify the above results. Then these theoretical results are supported qualitatively. (ii) The CNOP – type initial error of ENSO induces the prominent seasonal-dependent error evolution. Furthermore, for a large number of initial error pattern differing from CNOP, extensive numerical experiments suggested that CNOP-type initial error causes the most obvious spring predictability barrier (SPB). The mechanism of SPB is also investigated by analyzing the tendency equations of error evolution of ENSO. The results demonstrate that the occurrence of SPB for ENSO depends on not only the climatological mean state, but also the ENSO event itself and the configuration of initial error. Therefore, SPB for ENSO is caused by the collective effect of these three factors. (iii) The lower bound of the maximum predictable time, the upper bound of maximum prediction error, and the lower bound of maximum allowable initial error for ENSO are established with three different nonlinear optimization problems. To a certain extent these three sub-problems of predictability quantified ENSO predictability are based on a theoretical coupled model. Then this work tell us how the nonlinear optimization method is used to quantify the predictability of ENSO. Besides, the SPB for ENSO is revealed from these three different perspectives, which also demonstrates the seasonal-dependent evolution of error for El Niño. (iv) CNOP approach is also used to study the decadal variability of ENSO. It is found that nonlinear temperature advection plays an important role in ENSO asymmetry, which explains not only the asymmetry of ENSO in interannual scale, but also that in interdecadal scale. Furthermore, the mechanism of decadal asymmetry of ENSO asymmetry is given, i. e., the decadal change of ENSO asymmetry may be caused by the collective effect of the changes in tropical background state and nonlinearity associated with ENSO. At the end of this paper, the authors analyze the prospect of application of nonlinear optimization method in ENSO study. It is expected that the nonlinear optimization method can be extended to the studies of the second predictability problems for ENSO.

Key words nonlinearity, El Niño, predictability, nonlinear optimization

1 引言

厄尔尼诺 (El Niño) – 南方涛动 (ENSO) 是重要的短期气候现象之一, 它的发生往往给全球众多地区造成严重的自然灾害^[1, 2], 尤其是 20 世纪 70 年代中期以来, 世界范围频繁出现异常严重的干旱、洪涝、热浪、冷害及沙尘暴等极端气候灾害, 给世界各国带来了严重损失, 引起国际社会、各国政府和公众的普遍关注^[2, 3]。关于 ENSO 变异及其可预报性的研究也因此成为我国乃至全世界科学家面临的重要科学问题之一。

ENSO 事件的“最优前期征兆”、“春季可预报性障碍”、不对称性问题、以及如何量化研究其可预报性都是近年来国际上关于 ENSO 可预报性研究的热点科学问题^[4~13]。

所谓 ENSO 事件的“最优前期征兆”, 即指最容易发展成 ENSO 事件的初始距平模态。寻找这种模态并考察其发展的动力学行为, 有助于人们探索 ENSO

事件发生、发展和衰亡的规律, 对于 ENSO 的成功预测也具有重要指导意义。另外, ENSO 不对称性的研究对于理解 ENSO 振荡的基本机制有重要意义。ENSO 不对称性, 即是指 El Niño 事件一般比拉妮娜 (La Niña) 事件强这一观测事实。

“春季可预报性障碍”是指当很多模式在跨春季预报 ENSO 时, 模式的预报技巧明显下降^[4, 5]。Chen 等^[14]改进前人的预报过程, 即在初始化时考虑海气相互作用, 克服了所谓的“春季可预报性障碍”; 文献^[8]则提出了 ENSO “暖相生长期的可预报性障碍”, 即 ENSO 在 El Niño 生长期可预报性很低, 并认为可预报性障碍是 ENSO 固有的特征。另外, 从近几年美国国家环境预测中心 (NCEP) 和欧洲中期天气预报中心 (ECWMF) 关于 ENSO 的实际预测结果也可看出, “春季可预报性障碍”仍然严重影响着 ENSO 的可预报性。所以, 春季可预报性障碍问题仍是需要深入研究的重要科学问题。

另外, 由于社会的需要与科学的发展, 可预报性问题的研究正呈现出从定性、半定量研究向定量研究发展的趋势。例如, “欧洲地球物理协会”于 2001 年至今, 每年在 “Nonlinear Processes in Geophysics” 分会中, 都组织了 “Quantifying predictability” 分会, 许多著名科学家做了精彩且具有前瞻性的报告。可预报性的量化研究 (包括 ENSO 可预报性的量化研究) 正日益成为大气和海洋科学研究的重要课题。

研究 ENSO 可预报性的重要方法之一是线性奇异向量 (LSV) 方法^[6~9]。对于这种方法, 人们利用有效的切线性模式 (TLM), 寻找发展最快的扰动, 从误差增长的角度研究可预报性。Thompson^[9]用一个耦合 ENSO 模式研究了 LSV 发展的动力学行为。考虑到 LSV 的线性最优性, Thompson 将其作为 ENSO 事件的最优前期征兆。文献[6, 11]也采用 LSV 方法研究耦合 ENSO 模式的误差增长, 试图揭示 ENSO 可预报性的动力学行为。尽管 LSV 被广泛地应用于 ENSO 可预报性研究中, 但 LSV 是建立在切线性模式 (TLM) 能够近似描述初始扰动发展的基础上, 它不考虑非线性的作用, 也就是说, LSV 不能描述有限振幅扰动的非线性特征, 不能代表非线性系统的最快增长扰动。然而, 许多研究表明 ENSO 变化在本质上具有非线性特征^[14~17], 其呈现的高度不规则性变化严重限制了 ENSO 事件的可预报性。因此, 对于必须考虑非线性影响的物理特征, 人们应该使用完整的非线性模式, 而不用 TLM 近似假定^[18]。

考虑到 ENSO 的非线性特征以及 LSV 的局限性, 同时为了进一步揭示非线性影响 ENSO 的机制, 作者近年来用非线性优化方法研究了 ENSO 事件的最优前期征兆、春季可预报性障碍、以及 ENSO 的不对称性等问题, 探讨了非线性过程在 ENSO 可预报性研究中的作用^[19~26]。为纪念《大气科学》创刊 30 周年, 本文将综述这些研究结果, 以及展望非线性优化方法在 ENSO 可预报性研究中的应用。

2 条件非线性最优扰动在 ENSO 可预报性研究中的应用

为了克服 LSV 在可预报性研究中的缺陷, 穆穆等^[19, 20, 27]提出了条件非线性最优扰动 (CNOP) 的概念。所谓 CNOP, 即是满足一定约束条件且在

预报时刻有最大非线性发展的一类初始扰动。如果用扰动的增长率度量扰动发展的快慢, CNOP 可能不是符合约束条件且发展最快的初始扰动, 但它具有在预报时刻非线性发展最大的特征, 在可预报性研究中可以扮演更重要的角色。在此意义下, 文献[19, 20, 27]将该类扰动称为非线性系统中满足一定物理约束条件的最优扰动, 即 CNOP。为方便讨论, 以下将首先以简明语言介绍 CNOP 方法。

2.1 条件非线性最优扰动

考虑如下初值问题

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + F(\mathbf{w}) = 0, \\ \mathbf{w}|_{t=0} = \mathbf{w}_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{w}(x, t) = [\mathbf{w}_1(x, t), \mathbf{w}_2(x, t), \dots, \mathbf{w}_n(x, t)]$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, t 代表时间, 且 $(x, t) \in \Omega \times [0, T]$, Ω 是欧氏空间 $\mathbf{R}^n$ 中的一个区域, $T < +\infty$ 。方程 (1) 中的 F 是一个非线性微分算子, $\mathbf{w}_0$ 为向量 $\mathbf{w}$ 的初始状态。假定确切知道动力系统方程 (1) 和初始态 $\mathbf{w}_0$, 那么, 通过以合适的初始值积分方程 (1), 我们可以确定系统将来的状态。系统方程 (1) 在预报时刻 τ 的数值解可以写成如下形式,

$$\mathbf{w}(x, \tau) = M_\tau(\mathbf{w}_0), \quad (2)$$

此处, M_τ 是离散的传播算子, 代表数值模式。如果我们取系统方程 (1) 的初值分别为 U_0 和 $U_0 + u_0$, 那么方程 (1) 的解 $U(x, t)$ 和 $U(x, t) + u(x, t)$ 可以表示为

$$\begin{cases} U(\tau) = M_\tau(U_0), \\ U(\tau) + u(\tau) = M_\tau(U_0 + u_0), \end{cases} \quad (3)$$

这里, u_0 代表初始扰动, $u(\tau)$ 刻画了 u_0 的发展。

对于给定的范数 $\|\cdot\|$, 初始扰动 $u_{0\delta}$ 称为 CNOP, 当且仅当

$$J(u_{0\delta}) = \max_{\|u_0\| \leq \delta} J(u_0),$$

其中,

$$J(u_0) = G[M_\tau(U_0 + u_0) - M_\tau(U_0)], \quad (4)$$

函数 $G(\cdot)$ 度量了扰动的发展, 在具体应用中, 它可以取为范数 ($\|\cdot\|$) 或某个单变量的绝对值 $|\cdot|$ 。对于约束条件, 本文简单用范数约束条件, 当然, 我们也可以研究初始扰动属于某一类泛函集合, 或者初始扰动满足某一物理规律, 这要依据具体的物理问题而定。

数学上, CNOP 是给定目标函数在约束条件下的全局极大值点。某些情况下, 目标函数可能存在

多极值点,即目标函数的极大值可能在多个相空间点取得;目标函数也可能存在局部极大值点,我们称之为局部 CNOP。CNOP 和局部 CNOP 可以通过 SQP 算法^[28]或 SPG2^[29]算法求得,这些算法是二次规划问题,用于解决带有等式和不等式约束条件的非线性优化问题。

CNOP 有特殊的物理意义^[30]。首先,当初始扰动代表某一气候距平模式的初始距平时,相应的 CNOP 描述了某一天气或气候事件的最优前期征兆,也就是说, CNOP 是最容易发展成该天气或气候事件的初始模态;其次,当 CNOP 被考虑为叠加在某一天气或气候事件上的初始扰动时,它代表了在预报时刻对预报结果影响最大的一类初始误差;第三, CNOP 由于表征了满足约束条件且在预报时刻有最大非线性发展的特点,从而在敏感性和稳定性研究中代表了有限时段非线性最不稳定(或最敏感)的初始扰动;第四, CNOP 也可被用来估计预报误差的上界。

2.2 条件非线性最优扰动在 ENSO 事件最优前期征兆问题研究中的应用

一些研究试图用线性奇异向量探讨 ENSO 事件的最优前期征兆^[6, 9]。然而, LSV 总是在初始扰动充分小,对应的 TLM 有效时成立。对于非线性有较大影响的 ENSO 系统,用 LSV 研究 ENSO 可预报性有局限性。考虑到这一点,文献[21, 22]基于理论 ENSO 模式^[15, 16](WF96 模式),使用 CNOP 方法研究了 ENSO 事件的最优前期征兆,揭示了非线性对 ENSO 最优前期征兆距平模态的影响。

文献[22]根据所要刻划的物理问题构造了描述 ENSO 事件发生的目标函数,即用赤道东太平洋海表温度距平的最大发展作为目标函数,继而非线性优化方法计算了该理论模式中季节循环作为基态时的条件非线性最优扰动,并与传统的线性奇异向量方法进行了比较。结果表明:条件非线性最优扰动(和局部条件非线性最优扰动)的模态结构定性地与优化时间区间无关,也就是说,无论从什么时候开始计算,条件非线性最优扰动(和局部条件非线性最优扰动)总是定性的具有负(正)的赤道东太平洋海表温度距平和正(负)的斜温层深度距平。虽然对应的线性奇异向量也总是具有类似的结构,但从定量的角度看, CNOP 和 LSV 有较大的差

别,并且,随着初始扰动的增大,它们的差别也越来越大;另外, CNOP(局部 CNOP)的非线性发展和线性发展也有较大差别:当优化时间区间跨度较小,扰动幅度较小时, CNOP(局部 CNOP)的非线性发展和线性发展区别不大,当优化时间区间跨度较大,扰动较大时,它们的差别很大,其非线性发展远远大于(小于)线性发展。

CNOP(局部 CNOP)和 LSV 代表的物理特征方面也存在着大的差别:季节循环的 CNOP(局部 CNOP)比对应的 LSV 更容易发展成 El Niño (La Niña)事件,代表了 El Niño (La Niña)事件的最优前期征兆,也就是说,负(正)的海表温度距平和正(负)的斜温层深度距平最容易发展成 El Niño (La Niña)事件。通过近 20 年的海洋资料,验证了该理论结果。

在文献[22]的最后,还比较了 El Niño 和 La Niña 事件的强度。当用 LSV 研究 ENSO 事件的强度时,切线性模式中对应的 El Niño 和 La Niña 事件具有相同的强度,或者说, El Niño 和 La Niña 事件关于气候平均态是线性对称的。然而,使用 CNOP 方法得出的结论是: El Niño 事件的强度明显大于 La Niña 事件的强度,这符合观测事实。显然,奇异向量的线性理论不能揭示 ENSO 事件的不对称性。原因是 ENSO 事件的不对称性是非线性反馈的结果^[11],即非线性温度平流促进 El Niño、而抑制 La Niña 事件,从而导致 CNOP(局部 CNOP)的非线性发展显著大于(小于)线性发展,这说明 El Niño 和 La Niña 事件在非线性的模式中是不对称的,这种不对称性源于非线性物理过程的影响。

对于上述理论结果,文献[22]诊断分析了 1980~2002 年的 NCEP 海洋再分析资料,所得结论定性地支持了以上分析结果。

考虑到上述所用 WF96 模式的简单性,徐辉^[31]用 Zebiak-Cane 中等复杂程度 ENSO 模式^[32](CZ 模式)进一步研究了 ENSO 事件的最优前期征兆问题。大量的数值试验表明,气候平均态季节循环的 CNOPs(而不是 LSVs)最适合用来描述发展成 ENSO 事件的前期征兆,而且, CNOPs 及其发展的物理特征揭示了斜温层位移超前海表温度距平变化的事实。中等复杂程度模式的结果不仅支持了上述 WF96 模式的结果,而且进一步揭示了 CNOPs

的空间结构, 强调了 ENSO 事件最优前期征兆模态的局地性。

2.3 条件非线性最优扰动在 ENSO 事件“春季可预报性障碍”问题研究中的应用

许多海气耦合模式在跨春季预测 ENSO 时, 常常发生预报技巧明显下降的现象。然而, 造成这种现象的根本原因至今仍扑朔迷离。考虑到这一点, 文献[20, 21, 24]在研究 ENSO 事件最优前期征兆问题的基础上, 用 WF96 模式, 通过条件非线性最优扰动方法, 从初始误差增长的角度研究了 ENSO 事件预报不确定性的季节依赖性, 探讨了 ENSO 事件的“春季可预报性障碍”问题。结果表明: El Niño 事件的条件非线性最优扰动在春季增长最大, 具有明显的季节依赖性, 并且该现象随着初始误差的增大变得越来越明显; 虽然 LSV 也表明了 El Niño 的上述现象, 但 LSV 在春季的发展远远小于 CNOP 的发展, 可见, 非线性在 ENSO 事件春季可预报性障碍问题研究中具有重要作用, 对于 ENSO 预报结果的不确定性有重要影响。理论和数值试验分析表明, 初始误差越大, 非线性对春季可预报性障碍的影响越大, 模式跨春季预测 ENSO 的不确定性越大。物理上, 这种非线性代表了非线性温度平流过程, 其对 El Niño 误差的发展有促进作用, 而对 La Niña 事件误差发展的影响不大。另外, 文献[24]对于随机选取的其他大量初始扰动, 比较了其 CNOP 型初始误差发展的季节依赖性。结果发现, 不是所有初始误差的发展有明显的季节依赖性, 只有 CNOP 型初始误差能够诱发最显著的误差发展的季节变化。所有这些说明 El Niño 春季可预报性障碍的发生与气候平均态、El Niño 事件本身以及初始误差的结构特征有紧密联系。

文献[24]基于误差增长的倾向方程对春季可预报性障碍的机制进行了理论分析。结果表明, ENSO 事件的春季可预报性障碍现象不依赖 ENSO 预测的起始时间, 具有锁相到季节循环的特征。所用模式之所以发生春季可预报性障碍, 依赖以下三方面的综合作用: (1) 季节循环在春季具有强的海气耦合不稳定性, (2) El Niño 在春季具有强的动力学不稳定性, (3) El Niño 事件初始误差模态的性质。

与 ENSO 最优前期征兆研究类似, 考虑到上述所用理论模式的简单性, 徐辉^[31]也用 CZ 模式研究

了 ENSO 暖事件误差增长的季节依赖性。结果表明, El Niño 事件增长相的误差发展比其他位相(成熟相和衰减相)的误差发展大。对于不同的误差类型, 文献[31]做了大量数值试验, 结果表明 El Niño 的 CNOP 型初始误差最能刻画 El Niño 误差发展对其增长相的依赖性。进一步分析表明, El Niño CNOP 型初始误差空间结构具有局地位于中东太平洋的特征, 该结果暗指该地区观测资料的精度对于 ENSO 预测是重要的。

上述结果强调 CNOP 型初始误差导致了 ENSO 事件最显著的可预报性障碍, 即是说, 如果初始误差不是 CNOP 类型, ENSO 预测可能具有相对较高的可预报性。从这些结论, 我们可以理解为什么一些作者认为 ENSO 预测发生春季可预报性障碍, 而 Chen 等^[14, 17]则指出春季可预报性障碍能够通过改善初始场而消除。可见, CNOP 型初始误差的模态结构对于 ENSO 预测的不确定性有重要的影响, 如果用一种资料同化方法可以滤掉该类误差, 那么 ENSO 预报技巧应该会提高。基于这一点, 我们认为可以把上述理论结果作为用资料同化方法进行 ENSO 预测的理论基础。另外, CNOP 型初始误差的局地性也激励我们用 CNOP 方法确定导致 ENSO 预测不确定性的最敏感区域, 这方面的研究属于“target observation”的研究。

3 用可预报性的三类子问题量化研究 ENSO 的可预报性

采用非线性优化方法, 建立了关于 ENSO 事件的最大可预报时间下界、最大预报误差和最大允许初始误差上界的非线性优化问题^[21, 25, 33]。首先, 对于给定的初始观测误差界和最大允许预报误差(预报精度), 我们得到了 El Niño 和 La Niña 事件的最大可预报时间的下界。进一步比较 El Niño 和 La Niña 事件的可预报性表明: El Niño 事件在初始观测误差界充分小的情况下, 随着最大允许预报误差范围的逐渐变大, 模式可以跨过春季在允许的误差范围内对 El Niño 作较长时间的预测; 对于较大的初始观测误差界, 模式无法跨过春季在允许的预报误差范围内预测 El Niño 事件, 其最大预报时效总是停滞在 4~6 月间。对于 La Niña 事件, 在所允许的预报误差范围内, 它可以跨过春季作长时间的预测, 不发生春季可预报性障碍的现象。其次,

我们计算了 El Niño 和 La Niña 事件在预报时刻的最大预报误差,结果表明:对于给定的最大允许预报误差,当海表温度距平初始观测误差界小于一个确定的门槛值时,模式可以跨过春季预测 El Niña 的发展;当初始观测误差界超出此定值范围时,模式则不能跨春季预测 El Niño 事件。但用切线性模式估计误差的信息却高于非线性估计,也就是说,当初始海表温度距平误差界超出该定值一定范围时,模式仍然可以跨春季预测 El Niño 事件。所以,在假定非线性模式反映真实 ENSO 事件的情况下,切线性模式是对非线性模式的近似,其估计误差的结果只能近似刻划 ENSO 的预报误差,不能定量反映非线性模式的误差发展。对于 La Niña 事件,当其与 El Niño 事件具有相同初始观察误差界时,模式能够从不同时刻,在上述允许的预报精度范围内跨春季预测 La Niña 事件。第三,讨论了模式能够跨春季预测 ENSO 时,初始条件最大允许初始观察误差界应该满足的条件。

4 条件非线性最优扰动在 ENSO 年代际变化研究中的应用

El Niño 事件比 La Niña 事件强的性质称为 ENSO 事件的不对称性。段晚锁和穆穆^[26]用简单海洋同化资料(SODA)表明,自从 1976 气候变异以来,伴随着 ENSO 强度的变化,这种不对称性也发生了显著的变化。为了弄清 ENSO 不对称性发生年代际变化的物理机制,文献[26]通过 CNOP 方法,用理论海气耦合 ENSO 模式,结合 SODA 资料研究了 ENSO 的不对称性。对于刻划 1961~1975 和 1981~1995 两组年代际时间段的气候基本态参数,分别计算了这两组气候基本态的 CNOPs。通过考察 CNOPs 的发展,在模式中再现了 ENSO 不对称性的年代际变化。分析表明,通过改变气候基本态可以使 El Niño 的强度显著增强,而且与之相联系的非线性温度平流项也明显增大,从而更加促进 El Niño,导致更加显著的 ENSO 不对称性。所以,文献[26]的结果强调, ENSO 不对称性的年代际变化是由于气候基本态和非线性发生变化的缘故。

ENSO 不对称性的研究涉及到 ENSO 振荡的基本机制。关于 ENSO 不规则振荡的形成机制目前仍有争议。一种观点认为 ENSO 是自维持振荡,其不规则性来源于 ENSO 的非线性,该理论属于

ENSO 的混沌理论;另一种观点则认为 ENSO 是随机强迫驱动的线性稳定振荡子。文献[24]用非线性解释了 ENSO 的不对称性,而文献[26]则进一步用非线性在年代际时间尺度上解释了 ENSO 的不对称性。由此看来, ENSO 不规则振荡具有非线性特征。

5 讨论和展望

综述了使用非线性优化方法研究 ENSO 事件可预报性的进展。主要从以下方面进行介绍:首先, ENSO 事件最优前期征兆问题。在该问题的研究中,分别采用理论模式和中等复杂程度的模式进行研究。所得结果为:条件非线性最优扰动(CNOP)(局部 CNOP)比相应的线性奇异向量更容易发展成 El Niño (La Niña) 事件,而且这些 El Niño 事件的强度显著大于 La Niña 事件,即 El Niño 和 La Niña 事件是不对称的。非线性温度平流过程是造成 ENSO 这种不对称现象的重要原因。其次,春季可预报性障碍问题。该方面的研究表明, ENSO 事件 CNOP 型初始误差发展具有最明显的季节依赖性,从而形成了最显著的春季可预报性障碍现象。 ENSO 事件春季可预报性障碍的发生不仅依赖于气候平均态,而且依赖于 ENSO 事件本身及其初始误差模态,是三者综合作用的结果。第三, ENSO 可预报性的量化研究。在以往的工作中建立了关于 ENSO 可预报性的最大可预报时间下界、最大预报误差上界和最大允许初始误差下界的三类可预报性问题,分别从三个不同方面揭示了 ENSO 事件的春季可预报性障碍现象,比较有效地量化了 ENSO 的可预报性。第四 ENSO 不对称性的年代际变化。通过 CNOP 方法,揭示了非线性温度平流在 ENSO 不对称性研究中的重要作用,并用该非线性物理过程解释了 ENSO 不对称性的年代际变化,给出了 ENSO 不对称性年代际变化的机制。

从上述研究结果可知,非线性优化方法不仅能够一定程度上考察 ENSO 的运动机理,而且可以探讨非线性对 ENSO 模式可预报性的影响。因此,在复杂的模式中,我们有理由相信,非线性优化方法会有更好的应用前景,也希望复杂模式的结果能够验证上述观点。

另外,注意到上述研究 ENSO 可预报性,不考虑模式误差,只研究由初始误差引起的 ENSO 预测

的不确定性, 即 ENSO 的第一类可预报性问题。然而, 近来越来越多的研究表明, 模式误差在很大程度上同样影响着 ENSO 的预报技巧^[34~39], 其中的一个重要方面即是关于模式中不确定的参数(参数向量)对 ENSO 模拟效果或 ENSO 可预报性的影响^[32, 34, 36]。这些研究实际上在很大程度上反映了不确定的模式参数引起的模式误差对 ENSO 可预报性有重要的影响。与 ENSO 第一类可预报性类似, 我们可以提出如下问题: 参数(或参数向量)的不确定性引起的模式误差是如何发展演变的? 其对 ENSO 可预报性影响的动力学机制是什么? 耦合过程的非线性在其中扮演了什么角色等等, 这些问题都是 ENSO 可预报性亟待研究并需解决的。

非线性最优化方法是定量研究气候可预报性的一个重要方法^[18, 27, 40, 41]。穆穆等^[18~26]针对数值模式初始场的不确定性, 较成功地将非线性优化方法用于研究 ENSO 的第一类可预报性问题, 比较有效地揭示了非线性的影响。受该方法在第一类可预报性研究中较成功应用的鼓舞, 我们期望该方法也能够用于研究 ENSO 第二类可预报性, 有效地揭示模式的不确定性对 ENSO 可预报性的影响, 为进一步发展和改进模式, 提高 ENSO 可预报性提供新的思路。

参考文献 (References)

- [1] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 1995. 461 pp
Li Chongyin. *Introduction of Climate Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 461pp
- [2] 黄荣辉. 我国气候灾害的特征、成因和预测研究进展. 中国科学院院刊, 1999, **3**: 188~192
Huang Ronghui. Advance of the studies of the characteristics, cause of formation, and prediction study for climate disaster in China. *Chinese Academy of Sciences Bulletin* (in Chinese), 1999, **3**: 188~192
- [3] Mcphaden M J.. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. *Geophy. Res. Lett.*, 2003, **30**; doi:10.1029/2003GL016872
- [4] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [5] Webster P J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1995, **56**: 33~55
- [6] Moore A M, Kleeman R. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 1405~1446
- [7] Xue Y, Cane M A, Zebiak S E. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part I: Optimal growth in seasonal background and ENSO cycles. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 2043~2056
- [8] Xue Y, Cane M A, Zebiak S E, et al. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis. Part II: Optimal growth and forecast skill. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 2057~2073
- [9] Thompson C J. Initial conditions for optimal growth in a coupled ocean-atmosphere model of ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 537~557
- [10] An S I, Wang B. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. *J. Climate*, 2000, **13**: 2044~2055
- [11] Samelson R M, Tziperman E. Instability of the chaotic ENSO: The growth-phase predictability barrier. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 3613~3625
- [12] An S I, Jin F F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *J. Climate*, 2004, **17**: 2399~2412
- [13] An S I. Interdecadal changes in the El Niño–La Niña asymmetry. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L23210, doi:10.1029/2004GL021699
- [14] Chen D, Zebiak S E, Busalacchi A J, et al. An improved procedure for El Niño forecasting: Implications for predictability. *Science*, 1995, **269**: 1699~1702
- [15] Wang B, Fang Z. Chaotic oscillation of tropical climate: A dynamic system theory for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2786~2802
- [16] Wang B, Barcilon A, Fang Z. Stochastic dynamics of El Niño–Southern Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 5~23
- [17] Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 2004, **428**: 733~736
- [18] Mu M. Nonlinear singular vectors and nonlinear singular values. *Science in China*. (D), 2000, **43**: 375~385
- [19] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, **10**: 493~501
- [20] Mu M, Duan W S. A new approach to studying ENSO predictability: conditional nonlinear optimal perturbation. *Chinese Sci. Bull.*, 2003, **48**: 1045~1047
- [21] 段晚锁. 非线性最优化方法在 ENSO 可预报性研究中的应用. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003. 120pp
Duan Wansuo. Applications of nonlinear optimization method in the studies of ENSO predictability. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 120pp
- [22] Duan W S, Mu M, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for El Niño–Southern Oscillation events. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D23105, doi:10.1029/2004JD004756

- [23] Duan W S, Mu M. Applications of nonlinear optimization method to numerical studies of atmospheric and oceanic sciences. *Appl. Math. Mech.*, 2005, **26**: 636~646
- [24] Mu M, Duan W S, Wang B. The seasonal dependence of error growth and the dynamics of predictability in a theoretical coupled ENSO model. *J. Geophys. Res.* 2005, In revising
- [25] Duan W S, Mu M. Applications of nonlinear optimization method to quantifying the predictability of numerical model for El Niño – Southern Oscillation. *Progress in Natural Science*, 2005, **15**: 915~921
- [26] Duan W S, Mu M. Investigating decadal variability of ENSO asymmetry by conditional nonlinear optimal perturbation. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: C07015, doi:10.1029/2005JC003458
- [27] Mu M, Zhang Z Y. Conditional nonlinear optimal perturbation of a barotropic model. *J. Atmos. Sci.*, 2006, **63**: 1587~1604
- [28] Powell M J D. VMCWD: A FORTRAN subroutine for constrained optimization. *Report DAMTP 1982/NA4*. England: University of Cambridge, 1982.
- [29] Birgin E G, Martinez J M, Raydan M. Nonmonotone spectral projected gradient methods on convex sets. *SIAM Journal on Optimization*, 2000, **10**: 1196~1211
- [30] 穆穆, 段晚锁. 条件非线性最优扰动及其在天气和气候可预报性研究中的应用. 科学通报, 2005, **50**: 2695~2701
Mu M, Duan W S. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications to the studies of weather and climate predictability. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**: 2401~2407
- [31] 徐辉. Zebiak-Cane ENSO 预报模式的可预报性问题研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2006. 145pp
Xu Hui. Studies of predictability problems for Zebiak-Cane ENSO forecast model. Ph. D. dissertation (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 145pp
- [32] Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño – Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2262~2278
- [33] Mu M, Duan W S, Wang J C. The predictability problems in numerical weather and climate prediction. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 191~204
- [34] Hao Z, Ghil M. Data assimilation in a simple tropical ocean model with wind stress errors. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, **24**: 2111~2128
- [35] Flügel M, Chang P. Impacts of dynamical and stochastic processes on the predictability of ENSO. *Geophys. Res. Lett.* 1996, **23**: 2089~2092
- [36] Liu Z Y. A simple model study of ENSO suppression by external periodic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **15**: 1088~1098
- [37] Zhang L, Flügel M, Chang P. Testing the stochastic mechanism for low-frequency variations in ENSO predictability. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: doi:10.1029/2003GL017505
- [38] Zavala-Garay J, Moore A M, Kleeman R. Influence of stochastic forcing on ENSO prediction. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: C11007, doi:10.1029/2004JC002406
- [39] Williams P D. Modelling climate change: the role of unresolved processes. *Royal Society of London Transactions (Series A)*, 2005, **363**: 2931~2946
- [40] 范新岗, 丑纪范. 提为反问题的数值预报方法与试验 I. 三类反问题及数值解法. 大气科学, 1999, **23**: 543~550
Fan Xingang, Chou Jifan. Methods and experiments of numerical prediction raised as inverse problem. Part I: Three kinds of inverse problems and numerical solutions. *Chinese J. Atmos. Sci* (in Chinese), 1999, **23**: 543~550
- [41] Grimstad A A, Mannseth T, Nævdal G, et al. Adaptive multiscale permeability estimation. *Computational Geosciences*, 2003, **7**: 1~25