

穆穆, 段晚锁. 2013. 条件非线性最优扰动在可预报性问题研究中的应用 [J]. 大气科学, 37 (2): 281–296, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12319.  
Mu Mu, Duan Wansuo. 2013. Applications of conditional nonlinear optimal perturbation to the studies of predictability problems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 281–296.

# 条件非线性最优扰动在可预报性问题研究中的应用

穆穆<sup>1,2</sup> 段晚锁<sup>1</sup>

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 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

**摘 要** 本文总结了近年来条件非线性最优扰动方法的应用研究的主要进展。主要包括四个方面: (1) 将条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法拓展到既考虑初始扰动又考虑模式参数扰动, 形成了拓展的 CNOP 方法。拓展的 CNOP 方法不仅能够应用于研究分别由初始误差和模式参数误差导致的可预报性问题, 而且能够用于探讨初始误差和模式参数误差同时存在的情形; (2) 将拓展的 CNOP 方法分别应用于 ENSO 和黑潮可预报性研究, 考察了初始误差和模式参数误差对其可预报性的影响, 揭示了初始误差在导致 ENSO 和黑潮大弯曲路径预报不确定性中的重要作用; (3) 考察了阻塞事件发生的最优前期征兆 (OPR) 以及导致其预报不确定性的最优增长初始误差 (OGR), 揭示了 OPR 和 OGR 空间模态及其演变机制的相似性及其局地性特征; (4) 研究了台风预报的目标观测问题, 用 CNOP 方法确定了台风预报的目标观测敏感区, 通过观测系统模拟试验 (OSSEs) 和/或观测系统试验 (OSEs), 表明了 CNOP 敏感区在改进台风预报中的有效性。具体地, 台风 OGR 的主要误差分布在某一特定区域, 空间分布具有明显的局地性特征, 在台风 OGR 的局地性区域增加观测, 有效改进了台风的预报技巧, 该区域代表了台风预报的初值敏感区。事实上, 上述 El Niño 事件、黑潮路径变异以及阻塞事件的 OGR 的空间分布也具有明显的局地性特征, 这些事件的 OGR 刻画的局地性区域可能也代表了初值敏感区。

**关键词** 天气 气候 可预报性 最优扰动

文章编号 1006-9895(2013)02-0281-16

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12319

## Applications of Conditional Nonlinear Optimal Perturbation to the Studies of Predictability Problems

MU Mu<sup>1,2</sup> and DUAN Wansuo<sup>1</sup>

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

2 Institute of Ocean, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

**Abstract** This paper summarizes the applications of conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) in recent predictability studies. These include four main contributions. First, the CNOP approach was extended to consider not only initial perturbations but also model parametric perturbations. The extended CNOP approach can study the predictability problems induced by either initial errors or model errors as well as those induced by both initial errors and model errors. Second, the extended CNOP approach was applied to the predictability studies of ENSO events and Kuroshio path anomalies. The effect of initial errors and model parametric errors on the predictability of these events was demonstrated and it was shown that the initial errors play a dominant role in the predictability of ENSO and the Kuroshio path anomalies. The CNOP

收稿日期 2012-11-06, 2012-11-28 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417404 和国家自然科学基金项目 41176013

作者简介 穆穆, 男, 1954 年出生, 博士, 研究员, 主要从事天气和气候的可预报性研究。E-mail: mumu@lasg.iap.ac.cn

approach was also applied to investigate the optimal precursors (OPRs) of the onset of blocking events and optimally growing initial errors (OGRs). The results demonstrated that OPRs and OGRs are often concentrated at a localized region; furthermore, their patterns are very similar. Finally, the CNOP approach was used to study adaptive observations of typhoons. With the CNOP, the sensitive areas of some typhoon cases were determined and with the data from the Observing-Systems Simulation Experiments (OSSEs) and/or Observing-Systems Experiments (OSEs) the validity of the sensitive area was demonstrated. Specifically, the OGRs of typhoon cases often concentrate in a particular region. Increasing the number of the observations in this region may significantly improve the forecasting skill for typhoons. The region identified by OGRs may represent the sensitive area of typhoon forecasting. The OGRs of El Niño events, Kuroshio path anomalies, and blocking events are also localized in a particular region. Based on the approach of the typhoon adaptive observation, the sensitive areas associated with these events may be identified as the localized regions of the OGRs.

**Keywords** Weather, Climate, Predictability, Optimal perturbation

## 1 引言

可预报性是数值天气预报和气候预测研究的基本问题之一。在可预报性问题研究中,关于预报结果不确定性的估计是可预报性研究的重要问题之一。Tennekes (1991) 指出,对于一个预报产品,如果没有估计其可能的预报误差,那么这个预报产品是不能够被使用的。事实上,早在 1957 年,Thompson (1957) 已经意识到了估计预报结果不确定性的的重要性,业务天气预报也从此开始尝试在每一次预报中定量估计初始场不确定性的发展。这种观点后来也被海气耦合系统的预报所采纳 (Moore and Kleeman, 1996; Samelson and Tziperman, 2002; Mu et al., 2007a; Duan et al., 2009; Yu et al., 2012a, 2012b)。通过对预报误差演变规律的研究以及对预报误差的估计,人们对热带海气耦合系统的可预报性,获得了更为清晰的认识和理解。

可预报性研究的另一个关键问题是探寻所关注的天气和气候事件发生的前期征兆,即何种初始异常会发展成所关注的天气或气候事件 (Moore and Kleeman, 1996; Duan et al., 2004; Duan et al., 2012)。这也是动力气象学与气候动力学中的中心问题之一。在一定条件下,最容易发展成某一天气或气候事件的初始异常,我们称其为该事件的最优前期征兆 (Duan et al., 2004)。如何通过观测(或同化)捕捉到初始场(分析场)中的这种前期征兆信号是天气和气候预报中的关键问题。国际上有研究使用线性奇异向量 (LSV) 方法研究天气和气候事件的最优前兆信号。如, Moore and Kleeman (1996) 将 LSV 初始距平描述的海温状态作为 El Niño 事件发生的前期征兆。

LSV 是线性模式中增长最快的一类初始扰动,

该方法最早由 Lorenz (1965) 将其引入气象学研究。它不仅被用于可预报性最优前期征兆问题的研究,同时也被广泛地用于研究预报误差增长的可预报性问题。LSV 基于线性理论,其使用的前提条件是初始扰动充分小,其发展能够近似地由切线性模式 (TLM) 来描述。然而,大气和海洋的运动是非线性的,天气和气候的可预报性不可避免地会受到非线性物理过程的影响。所以,基于线性模式的 LSV 不能充分反映非线性物理过程的影响,不能用于描述非线性模式中增长最快的有限振幅的初始扰动 (Mu et al., 2003)。在可预报性研究中,LSV 不能有效代表天气和气候事件的最优前期征兆和增长最快初始误差 (Duan et al., 2004; Mu et al., 2007a, 2007b)。

为了考察非线性的影响, Mu et al. (2003) 提出了条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法。CNOP 代表了具有一定物理约束条件且在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动; LSV 代表了切线性模式中具有最大增长率的一类初始扰动, CNOP 是 LSV 在非线性系统中的自然推广。CNOP 在预报时刻的增长率可能没有 LSV 大,但其在预报时刻的非线性发展是最大的,从而代表了在预报时刻对预报结果有最大影响的一类初始误差,也代表了最容易发展成一类天气或气候事件的前期征兆。因此,在可预报性研究中, CNOP 比 LSV 具有更重要的作用。尤其在非线性系统中, CNOP 可以刻画有限振幅扰动大小的发展, LSV 只能描述充分小初始扰动的演变,而这正是非线性影响的结果。所以,通过比较 CNOP 和 LSV,可以揭示非线性物理过程对可预报性的影响。

CNOP 方法首先被应用于 ENSO 可预报性的研究,用来寻找 ENSO 事件的最优前期征兆和探讨预

报结果不确定性问题 (尤其是春季可预报性障碍 (SPB) 问题) (Duan et al., 2004; Mu et al., 2007a, 2007b; Duan et al., 2009; Duan et al., 2012; Yu et al., 2009; Yu et al., 2012a, 2012b)。继而又将 CNOP 方法应用于热盐环流 (THC) 稳定性和敏感性问题的研究中, 探讨非线性过程对 THC 稳定性和敏感性的影响 (Mu et al., 2004; Wu and Mu, 2009)。所有这些工作表明, 在考虑有限振幅初始扰动和/或较长预报时间的情况下, CNOP 和 LSV 存在明显区别。对于非线性大气和海洋系统, 我们相信 CNOP 的结果更能刻画大气和海洋的非线性运动特征, 因此在估计天气和气候的预报结果不确定性的研究中, 我们应该使用 CNOP 方法。Riviere et al. (2008) 也将 CNOP 方法用于一个二层准地转模式研究非线性物理过程对斜压不稳定流的影响。Terwisscha van Scheltinga (2007) 通过一种隐式 4D-Var 方法计算了描述 Double Gyre 海洋环流模式的 CNOP, 研究了有限振幅 double gyre 环流的稳定性, 揭示了非线性物理过程的影响。CNOP 方法还被应用于集合预报和目标观测敏感区的研究, 取得了满意的结果。这些研究拓展了 CNOP 方法的应用, 揭示了 CNOP 更丰富的物理意义, 为改进天气预报和气候预测的预报技巧提供了新思路 (Duan and Mu, 2009)。

近年来, CNOP 方法得到了进一步发展, 而且在对我国天气和气候异常有重要影响的 ENSO 事件、黑潮路径变异、台风和阻塞事件的可预报性研究中的应用取得了重要进展。Mu et al. (2010) 考虑到实际天气预报和气候预测初始误差和模式误差同时存在的情形, 将 CNOP 方法拓展到既考虑初始扰动又考虑数值模式参数扰动。拓展的 CNOP 方法要求求解初始扰动和模式参数扰动的组合模态的最优模态, 寻找导致最大预报误差的初始误差和模式参数误差的组合模态。应用拓展的 CNOP 方法, Yu et al. (2009) 和 Yu et al. (2012a) 考察了影响 ENSO 事件 SPB 的误差因子, 强调了初始误差是导致 SPB 的主要误差来源, 并且 Yu et al. (2012b) 和 Duan and Wei (2012) 先后在中等复杂程度模式和完全耦合的 GCM 模式的回报试验中发现了类似的初始误差模态, 从而阐明在实际预报中, 如果通过资料同化或目标观测方法滤掉 CNOP 类型的初始误差, ENSO 预报技巧可能会被大大提高; 拓展的 CNOP 方法也被 Wang et al. (2012) 用于黑潮路径变异的可预报性研究, 揭示了初始误差是导致黑潮

路径变异预报不确定性的主要误差因子, 其伴随的局地性特征为黑潮路径变异预报的目标观测敏感区提供了有用的信息。另外, CNOP 方法也被应用于阻塞的可预报性, 探讨了阻塞事件最优前期征兆 (OPR) 和最快增长初始误差 (OGR) 的相似性及其伴随的局地性特征, 从而为确定阻塞预报目标观测敏感区提供了新方法, 为提高数值天气预报和气候预测的预报技巧开拓了新思路 (Jiang and Wang, 2010; Mu and Jiang, 2011)。用 CNOP 确定目标观测敏感区的思路被较成功地应用于台风的目标观测研究, 为确定台风预报的初值敏感区、进而提高台风预报技巧提供了重要指导意义 (Wang and Tan, 2009; Qin and Mu, 2011a, 2011b; Zhou and Mu, 2011; Chen and Mu, 2012; Zhou and Mu, 2012a, 2012b)。可见, CNOP 方法在原有应用研究的基础上, 学者们近年来进一步将其用于实际天气预报或气候预测直接面对的一些困难问题 (如目标观测敏感区) 的研究, 获得了有特色的成果, 为提高数值天气预报和气候预测的预报技巧提供了新思路。

该文将简要回顾上述 CNOP 方法的拓展及其应用的研究进展。第二节将介绍拓展的 CNOP 方法及其物理意义; 第三节叙述 CNOP 方法在 ENSO 可预报性问题研究中的应用; 第四节回顾 CNOP 在黑潮路径变异可预报性研究中的应用; 第五节阐述阻塞前期征兆和最快增长初始误差的相似性及其对目标观测的指示意义; 第六节将说明 CNOP 在台风目标观测中的应用。最后, 在第七节讨论上述成果对于改进天气预报和气候预测的预报技巧的科学指导意义和应用前景。

## 2 条件非线性最优扰动方法的拓展

Mu et al. (2003) 提出的 CNOP 是指给定物理约束条件的具有最大非线性发展的一类初始扰动, 它既可以用来研究最容易导致某一天气或气候事件的初始异常, 又可以研究对预报结果具有最大影响的一类初始误差, 这两个问题是天气和气候可预报性研究中的两个关键问题。因此, CNOP 在有关初始场的可预报性问题研究中具有重要作用。考虑到实际天气预报和气候预测初始误差和模式误差同时存在的情形, Mu et al. (2010) 进一步将上述 CNOP 方法拓展到初始误差和数值模式参数误差同时存在的情形, 并提出了条件非线性最优参数扰动 (CNOP-P) 的概念。拓展的 CNOP (为方便叙述,

以下我们也称之为 CNOP), 即是求解初始扰动和模式参数扰动的最优组合模态。CNOP 有两种特殊情形: 一种是 Mu et al. (2003) 提出的仅与初始扰动有关, 并且在预报时刻具有最大非线性发展的 CNOP 初始扰动, 以下将之记为 CNOP-I; 另一种情形则只与数值模式参数扰动有关, 即 CNOP-P, CNOP-P 导致在预报时刻, 预报结果与参考态有最大差别。CNOP 方法既可以用来研究由初始误差引起的第一类可预报性问题, 又可以研究由参数误差引起的第二类可预报性问题, 同时也可用于研究初始误差和参数误差同时存在的情形。本节将简要回顾 CNOP 方法及其物理意义。

2.1 CNOP 的定义

假定状态向量  $w$  的发展由以下动力系统方程描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} + F(w, p, t) = 0, \\ w|_{t=0} = w_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $w(x, t) = (w_1(x, t), w_2(x, t), \dots, w_l(x, t))$  为包含  $l$  个状态变量 (如, 海表温度、温跃层深度、风速等) 的状态向量;  $w_0$  是初始条件;  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x \in \Omega$  ( $\Omega$  是欧氏空间  $R^n$  的一个集合);  $t$  是时间,  $0 \leq t < \infty$ ;  $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$  是模式参数向量;  $F$  是非线性算子。

若动力系统方程 (1) 和初始条件已知, 则未来时刻状态可以通过对方程 (1) 积分确定,

$$w(x, \tau) = M_\tau(p)(w_0), \quad (2)$$

这里  $M_\tau(p)$  代表含有参数  $p$  的动力系统方程 (1) 从 0 时刻到  $\tau$  时刻的传播算子。如果方程 (2) 对应于初始条件  $U_0$  和  $U_0 + u_0$  的解为  $U(t)$  和  $U(t) + u(t)$ , 那么其在  $\tau$  时刻的解为:

$$U(\tau) = M_\tau(p)(U_0), \quad U(\tau) + u_\tau(\tau) = M_\tau(p)(U_0 + u_0), \quad (3)$$

其中,  $u_0$  是  $U(t)$  的初始扰动,  $u_\tau(\tau)$  则代表了初始扰动的非线性发展。

如果  $p'$  是在模式参数向量  $P$  上的参数向量扰动, 方程 (2) 对应于  $P$  和  $P + p'$  的两个解可以表示为  $U(\tau) = M_\tau(P)(U_0)$ ,  $U(\tau) + u_p(\tau) = M_\tau(P + p')(U_0)$ , (4)

这里  $u_p(\tau)$  代表了由于参数扰动  $p'$  导致的预报结果和参考状态  $U(\tau)$  的偏差。

当同时考虑初始条件和模式参数的扰动时, 方程 (2) 的两个解为

$$U(\tau) = M_\tau(P)(U_0), \quad U(\tau) + u_{l,p}(\tau) = M_\tau(P + p')(U_0 + u_0), \quad (5)$$

这里  $u_{l,p}(\tau)$  代表了由初始扰动和模式参数扰动共同导致的预报结果和参考态  $U(\tau)$  的偏差。

定义如下非线性优化问题:

$$J_1(u_{0\delta}, p') = \max_{u_0 \in C_\delta, p' \in C_\sigma} J(u_0, p'), \quad (6)$$

其中,

$$J(u_0, p') = \|M_\tau(P + p')(U_0 + u_0) - M_\tau(P)(U_0)\|,$$

$u_0$  和  $p'$  分别是叠加在参考态初值  $U_0$  和模式参数向量  $P$  上的扰动,  $u_0 \in C_\delta$ ,  $p' \in C_\sigma$  是各自的约束条件。通过解优化问题 (6), 即可得到最优初始扰动和参数扰动的联合模态  $(u_{0\delta}, p')$ 。在给定约束条件下, 该模态导致预报时刻  $\tau$  的预报结果和参考态  $M_\tau(P)(U_0)$  的偏差最大。Mu et al. (2010) 将该模态定义为 CNOP。CNOP 包含两种特殊情形: 一种特殊情形是 CNOP-I (即优化问题 (7) 式中的  $u_{0\delta, l}$ ), 即 Mu et al. (2003) 提出的 CNOP 初始扰动, 其在预报时刻具有最大的非线性发展。CNOP-I 可通过求解下面优化问题得到:

$$J_{u_0}(u_{0\delta, l}) = \max_{u_0 \in C_\delta} \|M_\tau(P)(U_0 + u_0) - M_\tau(P)(U_0)\|. \quad (7)$$

CNOP 的另一种特殊情形是 CNOP-P (即 (8) 式中的  $p'_{\sigma, p}$ )。CNOP-P 代表了导致预报时刻预报结果与参考态的偏差最大的一类参数扰动, 可通过解下述优化问题得到:

$$J_p(p'_{\sigma, p}) = \max_{p' \in C_\sigma} \|M_\tau(P + p')(U_0) - M_\tau(P)(U_0)\|. \quad (8)$$

2.2 CNOP 的物理意义

CNOP 代表了满足一定物理约束条件的初始扰动和模式参数扰动的最优组合模态, 该模态导致预报结果与参考态的偏差最大。在可预报性研究中, CNOP 代表了导致最大预报误差的一类初始误差和参数误差的组合模态。

CNOP-I 是 CNOP 的一种特殊情形。作为初始扰动, CNOP-I 不仅可以描述最容易发展成某一天气或气候事件的最优前期征兆, 而且当 CNOP-I 被考虑为叠加在某一天气或气候事件上的初始误差时, 它可以描述在预报时刻对预报结果影响最大的一类初始误差; CNOP-I 也可用于表征非线性最不稳定 (或最敏感) 的初始扰动模态, 该类扰动在预报时刻具有最大的非线性发展。

CNOP-P 是 CNOP 的另一种特殊情形。CNOP-P 可以代表在预报时刻对预报结果具有最大影响的

一类参数误差; 在敏感性研究中, 它也可以用来描述最敏感的参数扰动, 从而为参数的敏感性排序提供有用的信息; 通过 CNOP-P 描述的敏感参数, 我们也可以据此确定最需要通过观测定量确定的参数。

如上所述, CNOP 可以代表导致最大预报误差的初始误差和参数误差的组合模态, CNOP-I 误差和 CNOP-P 误差分别代表导致最大预报误差的初始误差和参数误差。因此, 通过 CNOP 误差, 我们不仅可以探讨初始误差和参数误差对预报结果不确定性的影响, 而且可以分辨初始误差和参数误差的预报结果不确定性产生中的相对重要性, 最终确定导致预报结果不确定性的主要误差因子。

### 2.3 CNOP 的计算

已有的优化算法主要是用于求解极小值问题, 但 CNOP 优化问题 (6) 是一个极大值问题, 所以当计算 CNOP 时, 需要将极大值问题转变为极小值问题。即将目标函数 (7) 改写为:

$$J_1(\mathbf{u}_0, \mathbf{p}') = -\frac{1}{2} [J(\mathbf{u}_0, \mathbf{p}')]^2 = -\frac{1}{2} \|M_\tau(\mathbf{P} + \mathbf{p}')(\mathbf{U}_0 + \mathbf{u}_0) - M_\tau(\mathbf{P})(\mathbf{U}_0)\|^2 = -\frac{1}{2} \langle \mathbf{u}(\mathbf{u}_0, \mathbf{p}', \tau), \mathbf{u}(\mathbf{u}_0, \mathbf{p}', \tau) \rangle, \quad (9)$$

其中  $\langle \cdot \rangle$  表示内积, 这样极大值问题 (6) 就转换为极小值问题, 从而可用已有的优化算法求解 (9) 的极小值, 得到 CNOPs。求解 CNOPs, 一个重要的步骤是计算目标函数关于初始扰动和参数扰动的梯度。Mu et al. (2010) 给出了利用伴随模式计算目标函数  $J_1$  的梯度公式, 为进一步使用数值模式计算目标函数梯度提供了理论指导。Mu et al. (2010) 给出的计算梯度公式为

$$\frac{\partial J_1}{\partial \mathbf{u}_0} = -\lambda_1(0), \quad (10)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial \mathbf{p}'} = -\lambda_2(0) = -\int_0^\tau \left[ \frac{\partial F(\mathbf{U} + \mathbf{u}, \mathbf{P} + \mathbf{p}', t)}{\partial \mathbf{p}'} \right]^* \lambda_1(t) dt, \quad (11)$$

其中  $[\cdot]^*$  表示伴随算子,  $\lambda_1(t)$  和  $\lambda_2(t)$  满足,

$$\begin{cases} \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} + \left[ \frac{\partial F(\mathbf{U} + \mathbf{u}, \mathbf{P} + \mathbf{p}', t)}{\partial \mathbf{u}} \right]^* \lambda_1 = 0, \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} + \left[ \frac{\partial F(\mathbf{U} + \mathbf{u}, \mathbf{P} + \mathbf{p}', t)}{\partial \mathbf{p}'} \right]^* \lambda_1 = 0, \\ \lambda_1|_{t=\tau} = \mathbf{u}(\tau), \\ \lambda_2|_{t=\tau} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

利用上述梯度信息, 我们可以使用优化算法, 如 SPG2 (Spectral Projected Gradient 2) (Birgin et al., 2000), SQP (Sequential Quadratic Programming) Powell et al., 1982) 和 LBFGS-B (Limited memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno for Bound-constrained optimization) (Liu and Nocedal, 1989; Zhu et al., 1997) 等计算 CNOPs。

上述已经表明, CNOP 的求解需要采用伴随技术, 然而伴随模式的编写非常繁杂, 需要花费大量时间, 限制了该方法的推广应用。为了克服这一困难, Wang and Tan (2009) 提出了基于集合投影技术的 CNOP 求解算法, 避免了伴随编写困难。该算法使用多个相互线性独立或者说正交的初始扰动 ( $\mathbf{x}'$ ) 得到相应的预报增量 ( $\mathbf{y}'$ ), 通过集合方法建立  $\mathbf{x}'$  和  $\mathbf{y}'$  之间的统计相关模型, 用该统计模型向后积分计算目标函数的梯度, 以此进行非线性最优化迭代, 从而得到满足初始约束条件且在预报时刻有最大非线性发展的 CNOPs。Wang and Tan (2009) 表明, 新算法能够很好地抓住 CNOP 发展的非线性特征, 而且基于集合投影的新算法和基于伴随算法产生的 CNOPs 空间结构几乎完全相同。也就是说, 基于集合投影计算 CNOP 的新算法是有效可行的。

新算法的提出在一定程度上推广了 CNOP 在不同模式中的应用。例如, Wang and Tan (2009) 将新算法应用于 GRAPES 模式等研究台风的目标观测问题, 从而肯定了 CNOP 新算法的有效性。

## 3 CNOP 在 El Niño 事件春季可预报性障碍 (SPB) 问题研究中的应用

ENSO 事件的“春季可预报性障碍” (SPB) 问题是 ENSO 可预报性研究的一个重要内容。SPB 现象是指 ENSO 预报具有较大预报误差, 且预报误差的最快发展发生在春季和夏初, 即预报误差的发展呈现显著的季节依赖性特征。国际上许多研究探讨了 ENSO 事件的 SPB 问题, 但 SPB 产生的机制至今仍扑朔迷离, 具有很大争议。而且, 在业务预报中, ENSO 事件的 SPB 问题仍然严重影响着 ENSO 的预报技巧, 采用何种有效的预报策略减弱或消除 SPB 至今尚不清楚。作者们近期的工作强调了初始误差的特定结构及其局地性特征在 El Niño 事件 SPB 现象中的重要作用, 进而提出了用目标观测的方法提高 ENSO 预报技巧的新思路。

CNOP 误差导致最大预报误差, 所以最有可能

导致 El Niño 事件的 SPB 现象 (Mu et al., 2007a, 2007b)。因此, Duan and Zhang (2010) 用一个理论 ENSO 模式 (WF96 模式; Wang and Fang, 1996) 研究了 CNOP 误差 (即初始误差和模式参数误差的最优联合模态) 对 SPB 的影响。结果表明, CNOP 误差导致 El Niño 事件产生最大的预报误差, 尤其在春季误差增长最快, 具有明显的季节依赖性特征。CNOP 误差导致了 El Niño 事件显著的 SPB 现象。进一步研究表明, CNOP-P 误差导致较小的预报误差, 预报误差在每个季节的增长率也很小, 而且没有明显的季节依赖性, 没有导致 El Niño 事件的 SPB 现象。这些结果说明, 初始误差可能是导致 El Niño 事件 SPB 现象的主要误差因子。Yu et al. (2012) 进一步利用中等复杂程度的 Zebiak-Cane 模式, 研究了初始误差和模式参数误差对 El Niño 事件 SPB 现象的影响, 考察了它们在 SPB 产生中的相对重要性。结果表明, CNOP-P 误差导致的预报误差既没有显著的季节依赖性发展, 对预报结果不确定性也没有大的贡献, 因而未能导致 El Niño 事件的 SPB 现象。然而对于初始误差, CNOP-I 误差不仅导致显著的预报结果不确定性, 而且呈现明显的季节依赖性发展, 发生了显著的 SPB 现象。CNOP-I 误差和

CNOP-P 误差的组合模态也导致了明显的 SPB 现象, 而且组合模态导致的预报误差与 CNOP-I 误差导致的预报误差相差不大。所以, CNOP-I 误差可能更容易导致 SPB 现象。综上, Duan and Zhang (2010) 和 Yu et al. (2012) 一致表明, 初始误差可能比参数误差更容易导致 El Niño 事件的 SPB 现象, 即初始误差在 El Niño 事件 SPB 现象的产生中具有更加重要的作用, 可能是 SPB 误差增长的主要误差来源。

Mu et al. (2007b) 研究发现 CNOP-I 误差容易导致 El Niño 事件显著的 SPB 现象, 而且他们也发现存在一些其他类型初始误差, 该类误差与 CNOP-I 误差大小相同, 只是空间结构不同, 然而它们却没有导致大的预报误差, 也没有明显的季节依赖性发展, 最终未能导致 SPB。该结果说明 SPB 的发生依赖于初始误差的特定空间结构, 即具有特定空间结构的初始误差可能更容易导致 El Niño 事件的 SPB 现象。为进一步研究该问题, Yu et al. (2009) 针对不同强度的 El Niño 事件, 考察了 CNOP-I 误差、LSV 误差和随机初始误差在上述 El Niño 事件 SPB 产生中的作用 (图 1 和 2)。结果仍然表明, CNOP-I 误差导致 El Niño 事件显著的 SPB 现象, 但 LSV 误

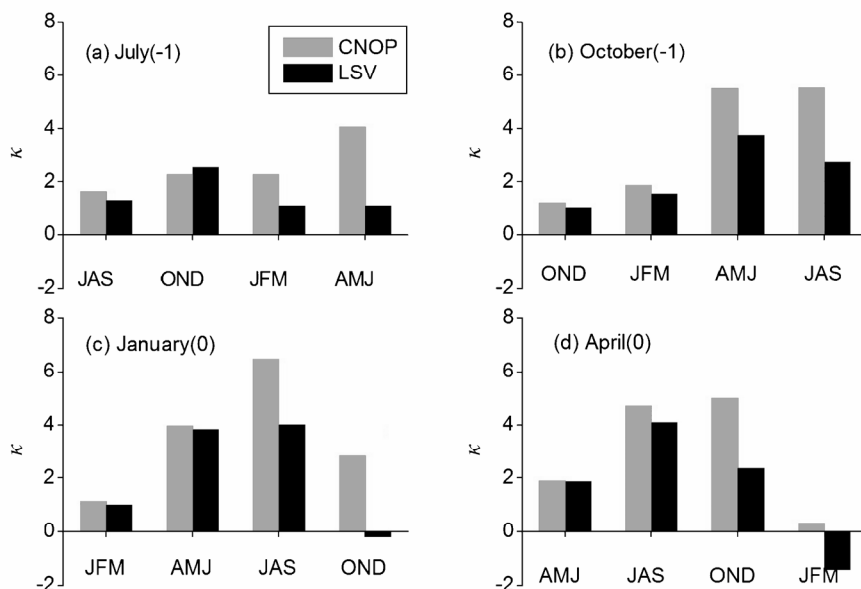


图 1 Zebiak-Cane 模式中 8 次具有代表性的 El Niño 事件 (初始变暖的时间分别为 1 月、4 月、7 月和 10 月的相对强和弱的 El Niño 事件) 的 CNOP-I 误差和 LSV 误差导致的 SSTA (SST anomaly) 预报误差 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 的季节增长率  $\kappa$ 。预报的起始月为 (a) July (-1), (b) October (-1), (c) January (0) 和 (d) April (0) (0 和 -1 表示 El Niño 年和前一年)。LSV 误差的季节增长率几乎在每个季节都小于 CNOP-I 误差的增长率。这里的预报误差季节增长率用一个季节内预报误差的增长与该季节时间跨度的比值来度量

Fig. 1 Ensemble mean of the seasonal growth rate  $\kappa$  of the SSTA prediction errors (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) caused by the CNOP-I-type errors and the LSV-type errors for eight El Niño events in the Zebiak-Cane model, where the seasonal growth rate of the prediction errors is measured by the ratio of the growth of the prediction errors in one season to the time length of the season. The start months of the predictions are (a) July (-1), (b) October (-1), (c) January (0), and (d) April (0). The growth rates of the LSV-type errors in almost each season are smaller than those of the CNOP-type errors

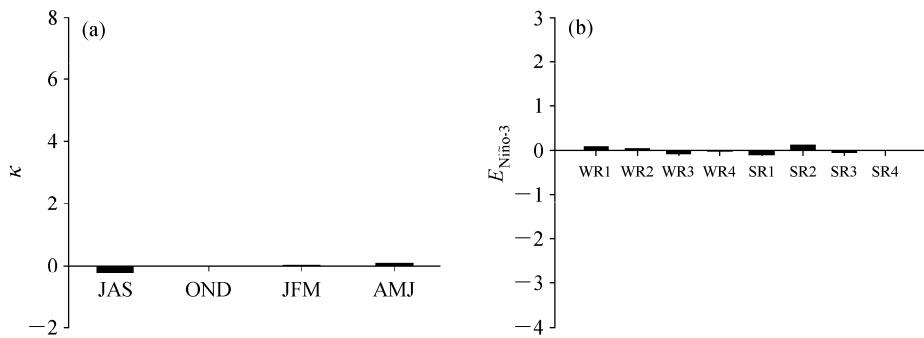


图2 Zebiak-Cane 模式中 8 次 El Niño 事件的 (a) 随机初始误差的季节增长率及其 (b) 导致的 SSTA 预报误差 (单位: °C) 的集合平均, 横坐标的数字表示 8 次 El Niño 事件。引自 Yu et al. (2009)

Fig. 2 (a) The ensemble mean of the seasonal growth rate  $\kappa$  of the random initial errors for eight El Niño events in the Zebiak-Cane model; (b) the SSTA prediction errors (unit: °C) of the eight El Niño events that are caused by the random initial errors (the numbers on the horizontal axis denote eight El Niño events). From Yu et al. (2009)

差导致的 SPB 现象较 CNOP-I 误差弱, 随机初始误差导致的预报误差则在每个季节的增长率可以忽略不计, 而且其最大季节增长率没有明显的季节依赖性, 未能导致 SPB 现象。所以, Yu et al. (2009) 进一步表明, El Niño 事件 SPB 的发生依赖于初始误差的空间结构, 具有 CNOP-I 误差空间结构的初始误差更容易导致 SPB。CNOP-I 误差可以分为两类 (Yu et al., 2009): 一类误差的 SSTA 分量在赤道东太平洋呈现正异常, 而在赤道中西太平洋呈现负异常, 温跃层深度则沿着赤道一致加深; 另一类误差则呈现与前者几乎相反的模式。由此可见, CNOP-I 误差尽管存在不同的空间结构, 但空间模态一致地具有局地性特征, 即误差能量集中于某一特定局地区域。

上述两类 CNOP-I 误差是通过考察模式中 El Niño 事件而得到的对预报结果具有最大影响的初始误差。那么, 这些误差是否存在于 ENSO 的实际回报试验中? 我们试想, 如果在 ENSO 预测的初始分析场中确实存在与 CNOP-I 类似的误差 (记为 CNOP-I-like 误差), 那么我们可以通过合适的方法滤掉 CNOP-I 误差, 进而提高 ENSO 预报技巧。因此, 首先要弄清楚的一个关键问题是: 在 ENSO 的预测试验中是否存在 CNOP-I 误差? Yu et al. (2012b) 表明, 在所考察的 Zebiak-Cane 模式的最新版本 (LDEO5) (Chen et al., 2004) 关于 1980 年 1 月至 1999 年 12 月的回报试验的 240 个初始分析场误差中, 与 CNOP-I-like 误差模态相似性较高的误差, 一般对应于较大的预报误差, 也就是说, 在 LDEO5 关于 El Niño 的回报试验中, 确实存在 CNOP-I-like 误差, 而且该类误差对应了较大的预报误差。Duan and Wei (2012) 探讨了复杂 GCM 模式—FGOLAS-g

模式关于 El Niño 回报试验的初始分析场误差。结果表明, 在 FGOALS-g 关于 1982~2007 年 ENSO 事件的回报试验中, 导致 El Niño 事件显著 SPB 现象的初始分析误差的主模态具有 CNOP-I-like 误差的空间结构。该结果在一定程度上说明, 在 FGOALS-g 回报试验中, 与 CNOP-I-like 相似的误差更容易导致 El Niño 预报结果具有较大不确定性。从 Zebiak-Cane 模式和 FGOALS-g 模式的回报试验看, CNOP-I-like 误差可能确实存在于 ENSO 预测中。因此, 我们应该研究如何根据 CNOP-I 误差的特点想办法滤掉 ENSO 预测中的 CNOP-I-like 误差, 进而提高 ENSO 的预报技巧。

综上, 初始误差是 El Niño 事件 SPB 现象的主要误差来源, 而具有 CNOP-I 误差模态的初始误差更容易导致 SPB, 该类误差不仅是所考察模式 El Niño 事件的最优增长初始误差, 而且存在于有关模式的实际回报试验中, 因此, 如果在预报中通过合适的方法滤掉 CNOP-I-like 误差, ENSO 的预报技巧可能会大大提高; 另一方面, CNOP-I 误差的空间分布具有明显的局地性特征, 即误差主要集中在某一特定区域。Yu et al. (2012b) 表明, 在 CNOP-I 误差集中的局地性区域减小误差, ENSO 预报误差会大大减小, CNOP-I 误差集中的区域可能代表了 ENSO 预测的敏感区。该结果建议我们可以通过在 CNOP-I 敏感区进行目标观测, 消除 CNOP-I-like 误差, 改进初始场, 进而提高 ENSO 预报技巧。

#### 4 CNOP 在黑潮路径变异可预报性研究中的应用

黑潮路径变异对区域气候产生重要影响 (Xu

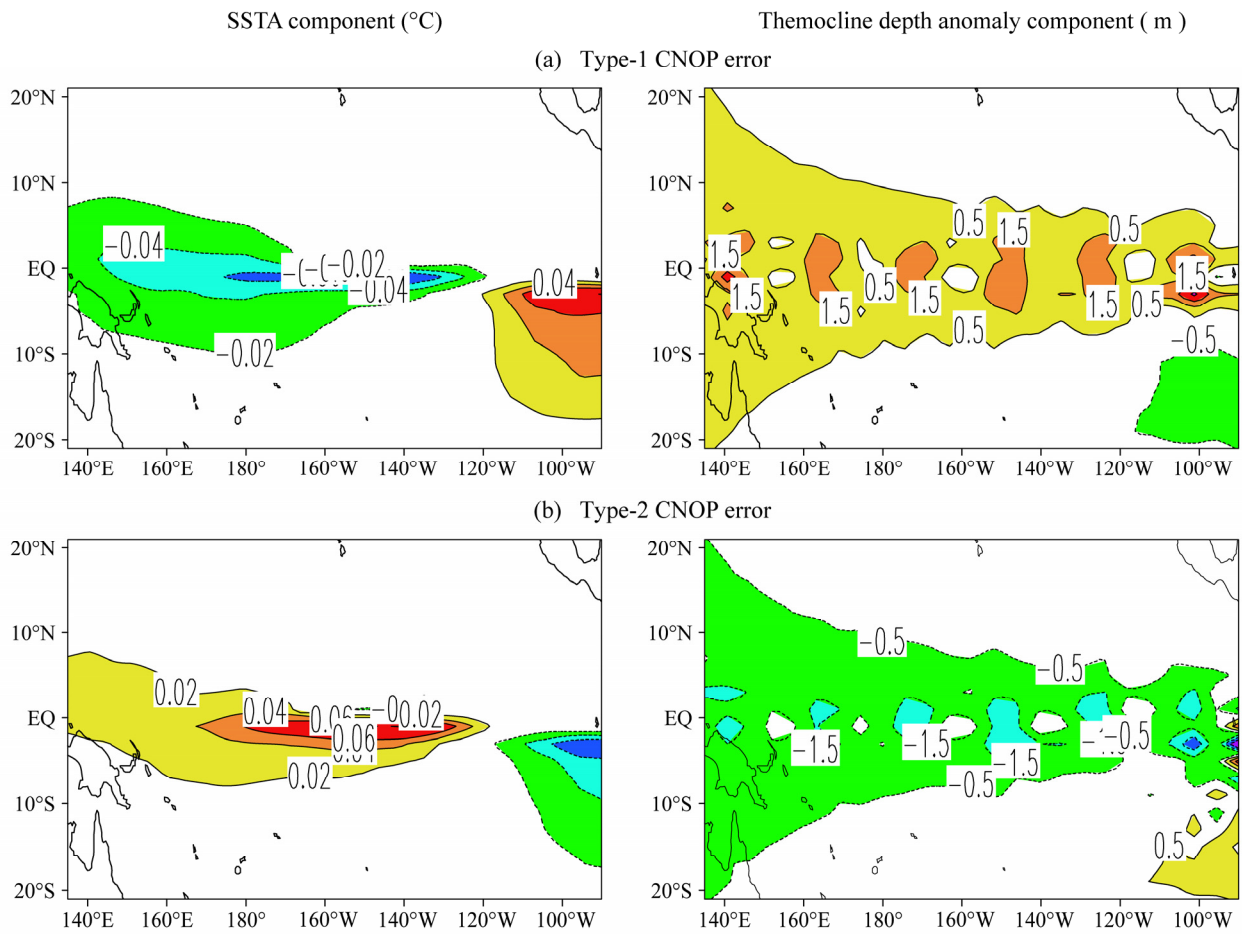


图3 两类 CNOP-I 误差。左列为 SSTA 分量，右列为温跃层深度异常分量。引自 Yu et al. (2009)

Fig. 3 The patterns for the two categories of CNOP-I-type errors. The left column is for the SSTA component, while the right column is for the thermocline depth anomaly. From Yu et al. (2009)

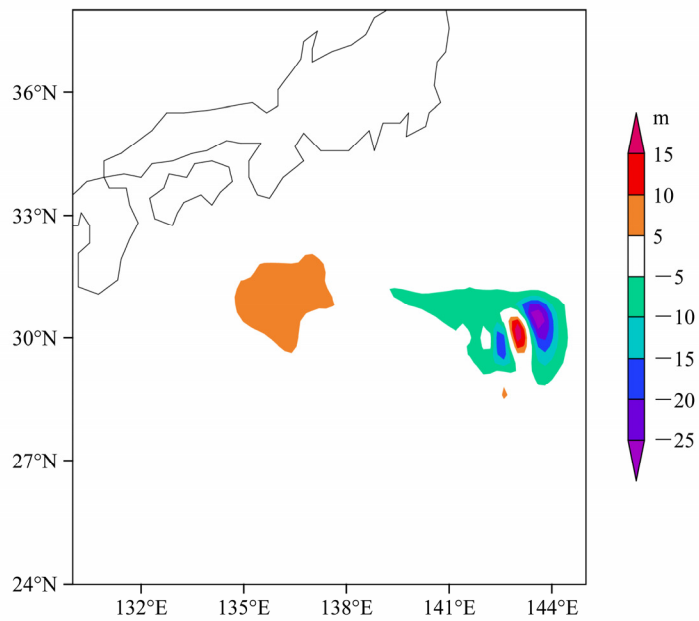


图4 CNOP-I 的上层厚度分量，单位：m。引自 Wang et al. (2012)

Fig. 4 Upper-layer thickness (unit: m) component of CNOP-I. From Wang et al. (2012)



et al. 2010), 对我国长江流域降水也具有较大影响 (侍茂崇, 2004)。黑潮路径变异的可预报性研究具有重要意义。国际上关于黑潮路径变异可预报性的研究, 主要从初始误差增长的角度进行研究 (Komori et al. 2003; Ishikawa et al. 2004; Fujii et al. 2008)。模式误差对黑潮路径变异预报的影响研究则很少。近年来, 作者们将 CNOP 方法应用于黑潮路径变异的可预报性研究, 分辨了初始误差和模式参数误差对黑潮路径变异预报影响的相对重要性, 强调了初始误差的作用 (Wang et al., 2012)。

Wang et al. (2012) 采用 1.5 层浅水模式计算了黑潮大弯曲路径的 CNOP-I (图 4) 和 CNOP-P, 其中 CNOP-P 包括参数风应力的最优扰动 (CNOP<sub>TAU</sub>-P)、侧向摩擦系数的最优扰动 (CNOP<sub>AH</sub>-P)、界面摩擦系数的最优扰动 (CNOP<sub>RI</sub>-P) 和上述三个参数扰动的最优组合模态 (CNOP<sub>ALL</sub>-P)。计算结果表明, 如果以预报时刻扰动的动能作为预报误差的度量, 那么 CNOP-I 所导致的预报误差比不同参数的最优扰动导致的预报误差大 (图 5), 也就是说, 在黑潮路径变异的预报中, 初始误差可能比模式参数误差对预报结果不确定性的影响更大。具体地, 由 CNOP-I 导致的海洋上层厚度的均方根误差最大 (图 6), 并且大约在预报时刻 120 天时, 均方根误差开始大于均方根变化 (RMS variation), 这表明在预报时刻 120 天时, 以具有 CNOP-I 误差的初始场作为模式的初始场预报黑潮路径变异时, 该时刻的预报结果

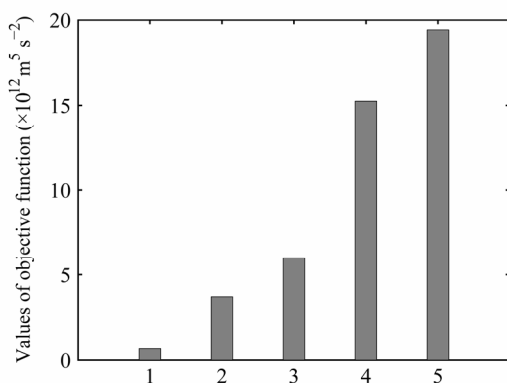


图 5 CNOP-I 误差和不同参数的最优扰动导致的预报误差. 横轴上的数字 1~5 分别代表 CNOPRI-P, CNOPTAU-P, CNOPAH-P, CNOPALL-P 和 CNOP-I, 纵轴表示横轴所示的最优扰动导致的预报误差 (用扰动动能度量)。引自 Wang et al. (2012)

Fig. 5 The prediction errors caused by the CNOP-I and optimal perturbations of different parameters. The numbers 1-5 in the horizontal axis denote CNOPRI-P, CNOPTAU-P, CNOPAH-P, CNOPALL-P, and CNOP-I, respectively. The vertical axis denotes the prediction errors (measured by kinetic energy of perturbations). From Wang et al. (2012)

不在预报技巧允许的范围; 然而当模式参数误差为 CNOP<sub>ALL</sub>-P 时, 虽然 CNOP<sub>ALL</sub>-P 也导致了显著的预报误差, 但其在预报时刻 210 天时 (远大于 120 天), 预报结果才开始不能被接受。也就是说, 对于给定的预报时刻, 初始误差比参数误差更容易导致海洋上层厚度的预报不可接受。

对 1.5 层浅水模式来说, 初始误差, 尤其是 CNOP-I 误差, 比参数误差导致更大的预报误差, 更易导致黑潮路径变异预报结果的不确定性 (图 7), 因此, 改进 1.5 层浅水模式的初始场比改进参数化方案更容易使得黑潮路径变异的预报技巧显著提高。那么如何改进初始场? 事实上, 黑潮路径变异预报的 CNOP-I 误差与 ENSO 预报的 CNOP-I 误差有类似的特征, 即 CNOP-I 误差的空间模态具有明显的局地性特征, 该局地性特征使我们联想到, 可以通过目标观测方法滤掉模式初始场中的 CNOP-I 误差, 进而提高黑潮路径变异的可预报性。

## 5 阻塞发生的最优前期征兆和最快增长初始误差

阻塞是一个典型的大尺度环流, 其对区域天气

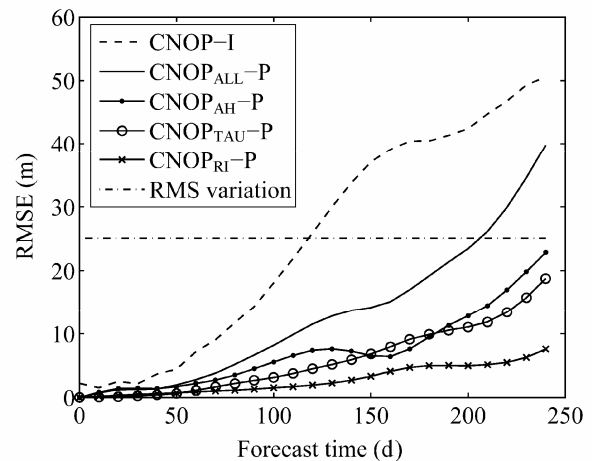


图 6 不同误差导致的海洋上层厚度均方根误差的时间序列。“RMS variation”表示海洋上层厚度的均方根变化, 作为黑潮路径预报误差是否可以接受的判断标准, 该标准也被 Komori et al. (2003) 用于研究黑潮路径变异的预报时效。当均方根误差大于“RMS variation”时, 预报结果不可接受; 反之, 预报结果能被接受。引自 Wang et al. (2012)

Fig. 6 Time series of root-mean-square error (RMSE) of upper-layer thickness caused by different errors. RMS variation, the root mean square variation of the upper-layer thickness, is used as a criterion determining whether the prediction results of Kuroshio path are acceptable. This criterion was also used by Komori et al. (2003) to study the time limits for the prediction of Kuroshio path variation. When RMSE is larger than RMS variation, the prediction results are unacceptable; otherwise, the predictions are acceptable. From Wang et al. (2012)

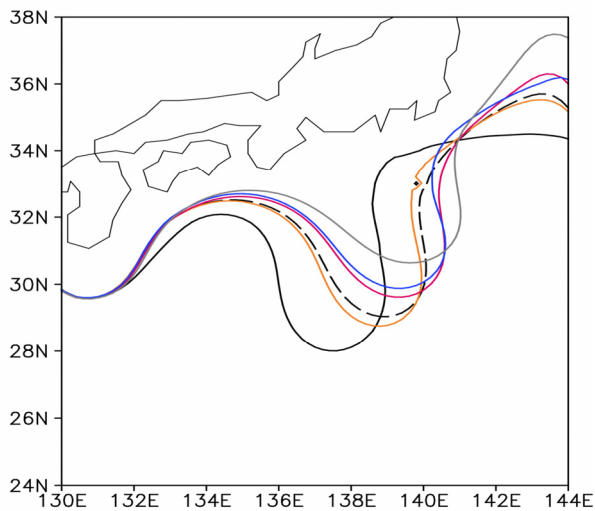


图 7 模式具有  $CNOP_{RI-P}$  (黄线),  $CNOP_{TAU-P}$  (红线),  $CNOP_{AH-P}$  (蓝线),  $CNOP_{All-P}$  (灰线) 和  $CNOP-I$  (黑实线) 误差时, 关于参考态黑潮大弯曲路径 (黑虚线) 的预报结果, 其中黑潮流轴由海洋上层厚度 520 m 等值线表征。CNOP-I 误差导致的黑潮路径的变异比其他类型误差更显著。引自 Wang et al. (2012)

Fig. 7 The reference Kuroshio large meander axis (black dashed line) and the predicted Kuroshio axes caused by  $CNOP_{RI-P}$  (yellow line),  $CNOP_{TAU-P}$  (red line),  $CNOP_{AH-P}$  (blue line),  $CNOP_{All-P}$  (gray line), and  $CNOP-I$  (black solid line). The Kuroshio axis is described by the 520-m contour of the upper-layer thickness.  $CNOP-I$  results in larger prediction error than other types of errors. From Wang et al. (2012)

和气候有着深远的影响 (Rex, 1950)。阻塞发生对初始场的不确定性具有极端敏感性, 阻塞环流转型预报常常因此失效。所以, 阻塞预报能力的提高仍然是中长期数值天气预报研究的核心问题之一 (Tibaldi and Molteni 1990; Kimoto et al. 1992; Frederiksen et al. 2005)。最优前期征兆 (OPR) 和增长最快初始误差 (OGR) 是可预报性研究的两个重要问题, 许多研究基于线性近似方法研究阻塞的 OPR 和 OGR (Frederiksen, 1998; Molteni and Palmer, 1993)。然而, 线性近似方法不能充分刻画非线性物理过程的影响, 存在着较大的局限性。

考虑到线性方法的局限性, Jiang and Wang (2010) 用 CNOP 方法, 基于 Liu (1994) 提出的阻塞指数定义, 用 T21L3 准地转模式计算了最容易激发欧洲—大西洋阻塞事件发生的 OPR (图 8)。该 OPR 的空间模态呈现很强的局地性特征, 扰动的主要能量位于阻塞区域的上游。该 OPR 主要呈现为北美大陆的波列结构, 且随高度西倾, 分布于大西洋急流的北侧, 轴线沿着东北—西南方向。该 OPR 随着时间的演变, 逐渐向下游传播并发展, 最终在大西洋区域形成典型的偶极子阻塞结构。上述 OPR

扰动能量的发展主要来自于基本流的水平切变, 斜压调整仅起着小部分的作用。OPR 扰动引发的行星尺度涡度平流向阻塞的高压区 (低压区) 输送反气旋涡度 (气旋涡度) (图 9), 从而促进了偶极子阻塞的发生。

Mu and Jiang (2011) 同样基于 T21L3 准地转模式, 选取了欧洲—大西洋区域 1985 年冬至 1991 年冬的 20 个个例, 进一步探讨了阻塞发生的 OPR; 而且他们又探讨了阻塞预报的 OGR。OGR 分为两类, 一类为局部 CNOP-I, 记为 type-1-OGR (图 9); 另一类为全局 CNOP-I, 记为 type-2-OGR (图 10)。结果发现, OPR 和 OGR 具有很高的相似性。以优化时间 3 天为例, 阻塞的 OPR 与 type-1-OGR 的相似指数达到 0.95, 与 type-2-OGR 的相似指数达到 -0.87。优化时间为 5 天时, OPR 与 type-1-OGR 相似指数达到 0.85, 与 type-2-OGR 相似指数达到 -0.69。而且, OPR 和 type-1-OGR 具有类似的演变行为, 且都发展成为欧洲—大西洋区域的偶极子阻塞模态; type-2-OGR 则随着时间的演变, 发展成为上述偶极子阻塞的相反模态。也就是说, 阻塞发生的 OPR 与 OGR 不仅在初始结构上存在着相似性, 在发展机理上也具有很高的相似性。

综上所述, 阻塞发生的 OPR 与 OGR 的空间模态高度相似, 且具有明显的局地性特征。这种相似性及其局地性特征启发我们: 如果在 OGR 局地性特征描述的误差大值区实施目标观测, 一方面可以消除 OGR 出现的可能性, 改进初始场; 另一方面可以改善局地观测网, 有助于捕捉最优前期征兆的信号, 从而提高我们对阻塞事件的预报能力。

## 6 CNOP 在台风目标观测研究中的应用

目标观测是指为了提高高影响天气和气候事件的预报技巧, 在一些关键地区 (敏感区) 加强观测 (Lorenz and Emanuel, 1998) 的一种观测手段。在一系列理论和方法研究的基础上, 国际上针对热带气旋、冬季风暴与温带气旋等, 进行了一系列外场试验 (Snyder, 1996; Langland et al., 1999; Szunyogh et al., 2000; Wu et al., 2005; Rabier et al., 2008)。这些试验的结果表明, 目标观测能够有效提高预报技巧。目标观测的关键之一是确定敏感区。目前确定目标观测敏感区的主要方法有两大类, 一类是线性方法 (Gelaro et al., 1998; Palmer et

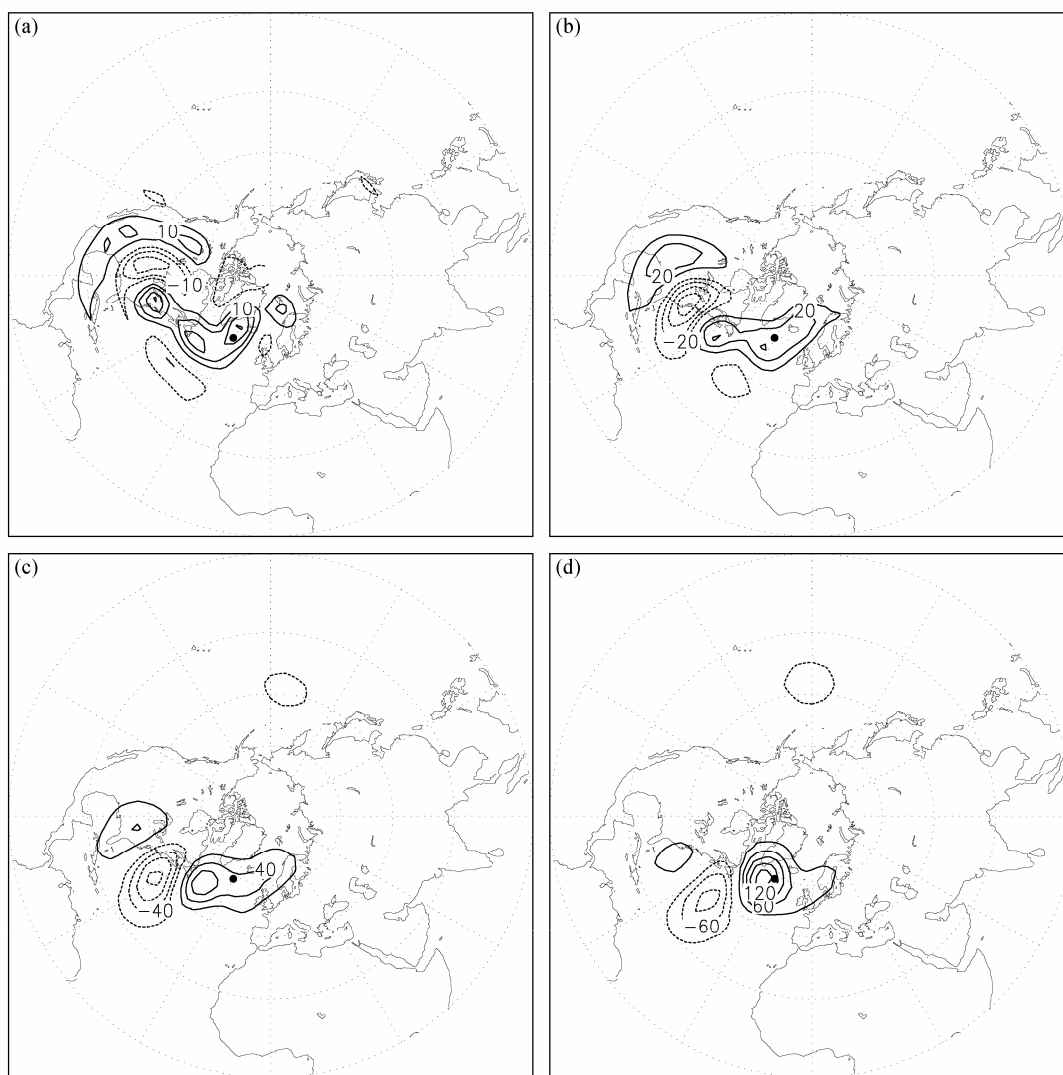


图8 500 hPa上优化时间为3天的激发欧洲—大西洋阻塞发生的OPR及其演变(单位:gpm)。(a)第0天;(b)第1天;(c)第2天;(d)第3天。欧洲—大西洋阻塞的OPR(见(a)图所示)主要呈现为北美大陆的波列结构,且随高度西倾,分布于大西洋急流的北侧,轴线沿着东北—西南方向。该OPR随着时间的演变,逐渐向下游传播并发展,最终在大西洋区域形成典型的偶极子阻塞结构(见(b),(c)和(d)图所示)。引自Jiang and Wang (2010)

Fig. 8 (a) The optimal precursor (OPR) triggering the North Atlantic–European blocking at 500 hPa with optimization time 3 days and its nonlinear evolution (gpm) with (b) leading time 1 day; (c) leading time 2 days; and (d) leading time 3 days. The OPR (see Fig. (a)) triggering the North Atlantic–European blocking presents wave trains over North America, westward with height. The disturbances, which mostly focus on the northward flanks of the corresponding Atlantic upper-level jet, take on northeast–southwest trend. With time development, it propagates downwards and develops into a typical dipole blocking over the North Atlantic–European area (see Figs. (b), (c), and (d)). From Jiang and Wang (2010)

al., 1998; Bergot, 1999; Buizza and Montani, 1999); 另一类是集合方法 (Bishop and Toth, 1999)。然而这两类方法都是基于初始扰动发展的线性性质这一假定,不能考虑非线性物理过程的影响。

为揭示非线性的影响,一些研究将CNOP方法应用于暴雨和台风的目标观测敏感区的研究中,表明了CNOP初始扰动,即CNOP-I模态具有明显的局地性特征,尝试将其应用于确定台风预报的敏感区,并在敏感区减小误差,考察其对台风预报结果

的影响。结果表明,CNOP-I敏感区较LSV敏感区更有潜力改进预报技巧(穆穆等, 2007; 谭晓伟, 2009; Mu et al., 2009; Wang and Tan, 2009; Chen, 2011; Qin and Mu, 2011a, 2011b; Zhou and Mu, 2011; Chen and Mu, 2012; Zhou and Mu, 2012a, 2012b)。

近来,作者们进一步通过OSSE和/或OSE研究了CNOP-I确定的敏感区的有效性。Chen and Mu (2012)利用MM5模式和WRF模式,以台风Longwang (2005)和Sinlaku (2008)为例,通过

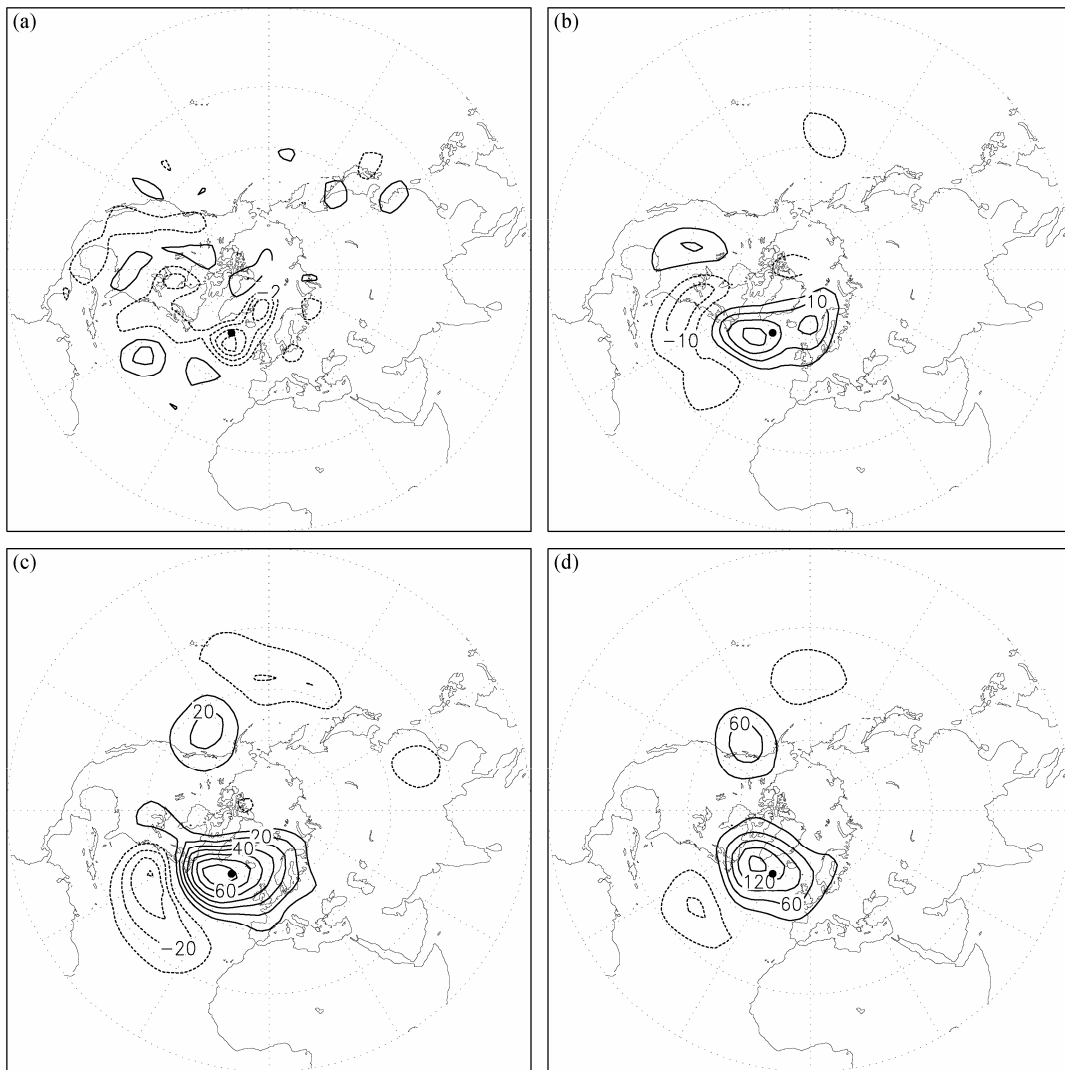


图9 500 hPa上20个个例的type-1-OGR的合成场。(a)第0天及其在(b)第1天、(c)第2天、(d)第3天的非线性演变的合成场(单位:gpm)。引自 Mu and Jiang (2011)

Fig. 9 (a) The composite field of type-1 OGR of 20 cases at 500 hPa and its nonlinear evolution with (b) lead time 1 day, (c) lead time 2 days, and (d) lead time 3 days. From Mu and Jiang (2011)

OSSE 试验研究了不同方法确定的敏感区和不同类型初始误差对台风初值敏感区的影响以及敏感区对模式的依赖性。结果表明,敏感区内的随机初始误差的发展一般要大于其他随机选择的区域内误差的发展;而在所有选择的区域中,CNOP-I 所识别的敏感区内的随机误差的发展是最大的;在同一个区域中,具有特定空间结构的初始误差的发展一般要大于随机误差的发展,如 CNOP-I、singular vectors (SVs) 和 LSV 类型的初始误差的结构。综合比较研究的结果,发现 CNOP-I 所识别的敏感区内 CNOP-I 类型初始误差对预报结果不确定性的影响最大。将 MM5 模式计算得到的台风预报的敏感区应用于 WRF 模式,结果发现由 MM5 模式确定

的敏感区在 WRF 模式中也能非常有效地减小预报误差,说明台风预报的初值敏感区对模式(至少在 MM5 和 WRF 模式)的依赖性可能较弱。

针对上述 CNOP-I 确定的敏感区,Chen (2011) 结合台湾的“追风计划”收集的下投探空资料,通过 OSE 试验表明,在 CNOP-I 敏感区内同化目标观测资料,各气象要素的总扰动能量(TPE)的均方根误差(RMSE)的减小幅度要明显大于在随机区域的情况。这说明在 CNOP-I 确定的敏感区内进行目标观测,确实能够有效减小台风预报误差。

Qin and Mu (2011b) 将其应用于 2009 年西太平洋 7 个个例台风路径预报的研究。结果表明,选择占全场 1% 的敏感区作为目标观测区。将同化了

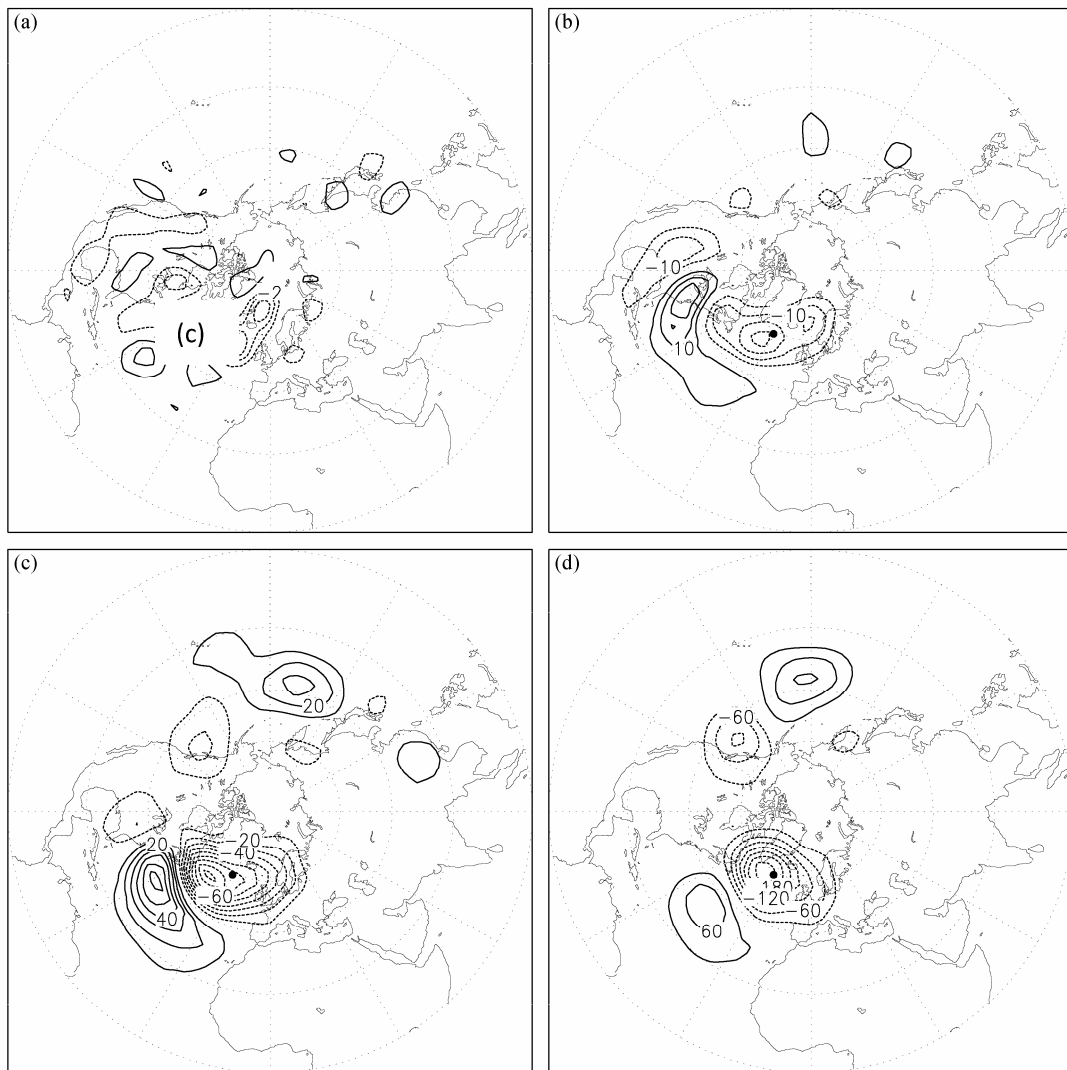


图 10 500 hPa 上 20 个个例的 type-2-OGR 的合成场。(a) 第 0 天及其在 (b) 第 1 天、(c) 第 2 天、(d) 第 3 天的非线性演变的合成场 (单位: gpm)。引自 Mu and Jiang (2011)

Fig. 10 (a) The composite field of type-2 OGR of 20 cases at 500 hPa and its nonlinear evolution with (b) lead time 1 day, (c) lead time 2 days, and (d) lead time 3 days. From Mu and Jiang (2011)

观测资料后的初始场作为进行了目标观测后改善的初始场, 进行每 6 h 一次的路径预报, 总共预报时长为 72 h。试验结果表明: 7 个台风个例中有 6 个个例的路径预报得到了明显改善 (图 11)。在 CNOP 敏感区内进行目标观测, 路径预报改善程度为 13%~46%, 48 h 路径预报误差平均减少 89.6 km 左右, 验证区内预报气压平均减小 7 hPa; 在 SVs 敏感区内进行目标观测, 改善程度仅为 14%~23%; 而且上述改善不仅出现在优化时间段内 (24~48 h), 甚至延续到 72 h, 台风路径 72 h 预报误差平均减少 25.9 km。这说明 CNOP 适应性资料同化技术可以有效地改进台风路径的预报技巧。

综上, CNOP 方法比其他方法更能抓住台风预

报初始误差的敏感区域, OSEs (OSSEs) 试验验证了 CNOP 确定的敏感区在改进台风预报技巧中的有效性。所以, 用 CNOP 方法所识别的敏感区是有效的, 通过在敏感区加密观测或者进行资料同化, 可以大大提高台风的预报技巧。

## 7 讨论

CNOP 方法已被应用于台风的目标观测问题研究, CNOP-I 在确定敏感区中发挥了重要作用。上述所考察台风个例的 CNOP-I 误差具有明显的局地性特征, 即误差主要分布在某一特定区域, 该区域可能代表了目标观测敏感区, 而且作者们通过 OSSEs 或 OSEs 试验, 验证了这一想法, 即通过在

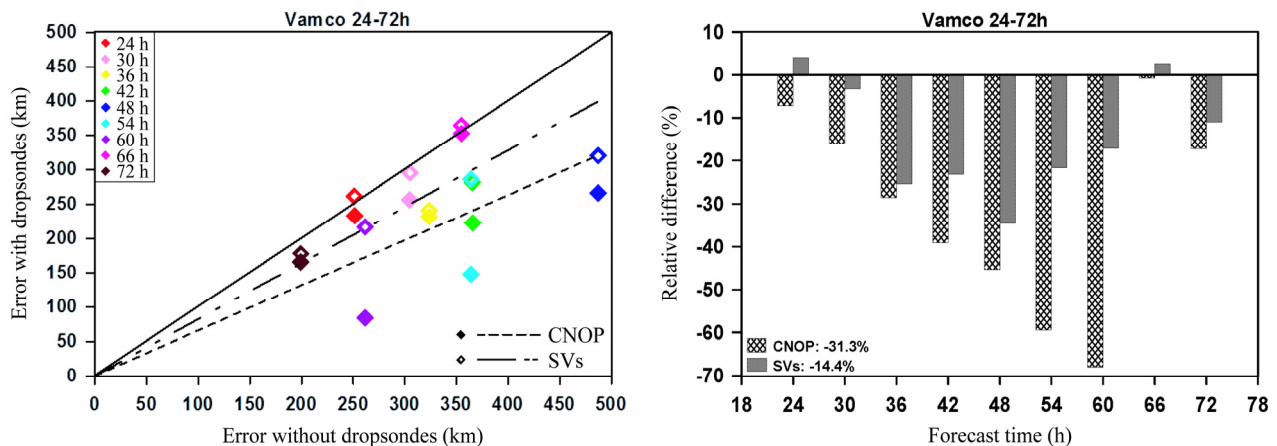


图 11 左图: 台风环高 (Vamco) 在 CNOP (实心菱形) 和 SVs (空心菱形) 敏感区进行与不进行目标观测预报路径误差 (24~72 h) 比较; 右图: 路径预报误差减小程度。引自 Qin and Mu (2011b)

Fig. 11 Scatter diagrams for cases Vamco (left). The y-axis represents the track forecast errors with dropsondes, and the x-axis represents those without dropsondes. Filled and empty diamonds denote the results of CNOPs and SVs, respectively. The colour of each diamond indicates the forecast time. Histograms on the right are relative differences corresponding to each case. From Qin and Mu (2011b)

敏感区进行资料同化, 减小敏感区误差, 显著改进了台风的预报技巧。该事实告诉人们, 在 CNOP-I 确定的敏感区加强观测, 对于改进台风预报技巧具有重要作用。事实上, 对于本文介绍的高影响天气和气候事件: El Niño 事件、黑潮路径变异以及阻塞事件, 它们的 CNOP-I 误差都导致显著的预报误差, 且误差也主要分布在某一特定区域, 具有明显的局地性特征。考虑到台风的目标观测问题, 我们自然联想到, 这些事件的 CNOP-I 呈现的局地性区域是否也代表了初始误差敏感区, 在该区域加强观测或进行资料同化, 上述事件的预报技巧是否也有显著提高? 等等问题都是需要进一步解决的问题。因此, 在未来的工作中, 我们有必要尝试开展关于 El Niño、黑潮路径变异以及阻塞事件等高影响天气和气候事件的目标观测研究。

另一方面, 上述工作提到, 阻塞事件的 CNOP-I 前期征兆和初始误差的空间模态具有高度相似性。因此, 如果阻塞事件的 CNOP-I 误差局地性区域代表了阻塞预报的敏感区, 那么表现在前期征兆中的同一局地性区域说明在 OGR 敏感区增加观测不仅可以提高预报技巧, 而且有利于增强识别阻塞事件发生的前期信号, 进而提高阻塞事件的预报技巧。也就是说, 阻塞事件前期征兆和最快增长初始误差的相似性和局地性特征可以为目标观测的布控提供有用信息。既然前期征兆和初始误差的相似性和局地性特征对于目标观测有重要作用, 那么发生在阻塞事件中的相似性和局地性特征是否在 El Niño

事件、黑潮路径变异以及台风等高影响天气和气候事件中也存在? 这种相似性和局地性特征是否确实能够指导这些天气和气候事件的目标观测敏感区确定, 提高预报技巧? 这些问题也是亟待解决的重要问题。

总之, 可预报性研究是一个具有挑战性的课题, 仍然有大量的科学问题需要解决, 这不仅需要学者具备扎实的气象学知识, 而且需要具备坚实的数理基础和高性能计算机计算的能力。随着计算机的发展以及有效的学科交叉和来自不同领域的学者的通力合作, 大力提高天气和气候可预报性的目的将能很快变为现实。

## 参考文献 (References)

- Bergot T. 1999. Adaptive observations during FASTEX: A systematic survey of upstream flights [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (561): 3271–3298.
- Birgin E G, Martinez M J, Raydan M. 2000. Nonmonotone spectral projected gradient methods on convex sets [J]. *SIAM J. Optim.*, 10 (4): 1196–1211.
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56: 1748–1765.
- Buizza R, Montani A. 1999. Targeting observations using singular vectors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56: 2965–2985.
- Chen B Y. 2011. Observation system experiments for typhoon Nida (2004) using the CNOP method and DOTSTAR data [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4 (2): 118–123.
- Chen B Y, Mu M. 2012. The roles of spatial locations and patterns of initial errors in the uncertainties of tropical cyclone forecasts [J]. *Adv. Atmos.*



- Sci., 29 (1): 63–78.
- Chen D, Cane M A, Kaplan A, et al. 2004. Predictability of El Niño over the past 148 years [J]. *Nature*, 428: 733–736.
- Duan W S, Mu M, Wang B. 2004. Conditional nonlinear optimal perturbation as the optimal precursors for ENSO events [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D23): 4756–4768.
- Duan W S, Mu M. 2009. Conditional nonlinear optimal perturbation: Applications to stability, sensitivity, and predictability [J]. *Science in China (D)*, 52 (7): 884–906.
- Duan W S, Liu X C, Zhu K Y, et al. 2009. Exploring the initial errors that cause a significant “spring predictability barrier” for El Niño events [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: C04022, doi:10.1029/2008JC004925.
- Duan W, Zhang R. 2010. Is model parameter error related to a significant spring predictability barrier for El-Niño event? Result from Theoretical Model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27: 1003–1013.
- Duan W S, Wei C. 2012. The spring predictability barrier for El Niño events and its possible mechanism results from a fully coupled model [J]. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.3513, in press.
- Duan W S, Yu Y S, Xu H, et al. 2012. Behaviors of nonlinearities modulating the El Niño events induced by optimal precursory disturbances [J]. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382–012-1557-z, in press.
- Frederiksen J S. 1998. Precursors to blocking anomalies: The tangent linear and inverse problems [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 2419–2436.
- Frederiksen J S, Collier M A, Watkins A B. 2005. Dependence of ensemble prediction skill on blocking instability regimes [J]. *Tellus*, 56A: 485–500.
- Fujii Y, Tsujino H, Usui N, et al. 2008. Application of singular vector analysis to the Kuroshio large meander [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: C07026, doi:10.1029/2007JC004476.
- Gelaro R, Buizza R, Palmer T N, et al. 1998. Sensitivity analysis of forecast errors and the construction of optimal perturbations using singular vectors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 1012–1037.
- Ishikawa Y, Awaji T, Komori N, et al. 2004. Application of sensitivity analysis using an adjoint model for short-range forecasts of the Kuroshio path south of Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 60: 293–301.
- Jiang Zhina, Wang Donghai. 2010. A study on precursors to blocking anomalies in climatological flows by using conditional nonlinear optimal perturbations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136 (650): 1170–1180.
- Kimoto M, Mukougawa H, Yoden S. 1992. Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 1616–1627.
- Komori N, Awaji T, Ishikawa Y, et al. 2003. Short-range forecast experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan using TOPEX/Poseidon altimetric data [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (C1): 3010, doi:10.1029/2001JC001282.
- Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. 1999. The North Pacific Experiment (NORPEX-98). Targeted observations for improved North American weather forecasts [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80: 1363–1384.
- Liu D C, Nocedal J. 1989. On the limited memory BFGS method for large scale optimization [J]. *Math. Program.*, 45 (3): 503–528.
- Liu Q. 1994. On the definition and persistence of blocking [J]. *Tellus*, 46 (3): 286–298.
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J]. *Tellus*, 17: 321–333.
- Lorenz E N, Emanuel K A. 1998. Optimal sites for supplementary observation sites: Simulation with a small model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 399–414.
- Molteni F, Palmer T N. 1993. Predictability and finite-time instability of the northern winter circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119: 269–198.
- Moore A M, Kleeman R. 1996. The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 1405–1446.
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlin. Processes Geophys.*, 10: 493–501.
- Mu M, Sun L, Henk D A. 2004. The sensitivity and stability of the ocean’s thermocline circulation to finite amplitude freshwater perturbations [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 34: 2305–2315.
- 穆穆, 王洪利, 周非凡. 2007. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1102–1112. Mu Mu, Wang Hongli, Zhou Feifan. 2007. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1102–1112.
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2007a. Season-dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño-Southern Oscillation predictability in a theoretical model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D10113, doi:10.1029/2005JD006981.
- Mu M, Xu H, Duan W S. 2007b. A kind of initial errors related to “spring predictability barrier” for El Niño events in Zebiak-Cane model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 234: L03709, doi:10.1029/2006GL027412.
- Mu M, Zhou F F, Wang H H. 2009. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: Conditional nonlinear optimal perturbation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 1623–1639.
- Mu M, Duan W S, Wang Q, et al. 2010. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2010, 17: 211–220.
- Mu M, Jiang Z N. 2011. Similarities between optimal precursors that trigger the onset of blocking events and optimally growing initial errors in onset prediction [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68: 2860–2877.
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 633–653.
- Powell M J D. 1982. VMCWD: A FORTRAN subroutine for constrained optimization [R]. DAMTP Report 1982/NA4, University of Cambridge, England.
- Qin X H, Mu M. 2011a. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139: 2218–2232.
- Qin X H, Mu M. 2011b. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138: 185–197.
- Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. 2008. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies [J]. *Nonlin. Processes Geophys.*, 15: 81–94.
- Rex D F. 1950. Blocking action in the middle troposphere and its effects upon regional climate. I: An aerological study of blocking action [J].

- Tellus, 2: 196–211.
- Riviere O, Lapeyre G, Talagrand O. 2008. Nonlinear generalization of singular vectors: Behavior in a baroclinic unstable flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 1896–1911.
- Samelson R G, Tziperman E. 2001. Instability of the chaotic ENSO: The growth-phase predictability barrier [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58: 3613–3625.
- 侍茂崇. 2004. 物理海洋学 [M]. 济南: 山东教育出版社. 462pp.
- Maochong. 2004. Physical Oceanography (in Chinese) [M]. Jinan: Shandong Education Press, 462pp.
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 953–961.
- Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 3520–3537.
- 谭晓伟. 2009. CNOP 新算法研究及其在目标观测中的应用检验 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 99pp.
- Tan Xiaowei. 2009. Studies on new algorithms to obtain CNOP and their applications in the targeting observations [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 99pp.
- Tennekes H. 1991. Karl Popper and the accountability of numerical forecasting [C] // *New Developments in Predictability*. ECMWF Workshop Proceedings, ECMWF, Shinfield Park, Reading UK.
- Terwisscha van Scheltinga A D. 2007. Data assimilation with implicit ocean models [D]. Ph. D. dissertation, Institute for Marine and Atmospheric research, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands, 119pp.
- Thompson P. 1957. Uncertainty of the initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns [J]. *Tellus*, 9: 275–295
- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. *Tellus*, 42A: 343–365.
- Wang B, Fang Z. 1996. Chaotic oscillation of tropical climate: A dynamic system theory for ENSO [J]. *J. Atmos. Sci.*, 53: 2786–2802.
- Wang B, Tan X. 2009. A fast algorithm for solving CNOP and associated target observation tests [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 23: 387–402.
- Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. 2012. Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method to the predictability study of the Kuroshio large meander [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (1): 118–134.
- Wu X G, Mu M. 2009. Impact of horizontal diffusion on the nonlinear stability of thermohaline circulation in a modified box model [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 39: 798–805.
- Wu C C, Lin P H, Abernethy S, et al. 2005. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOSTAR): An overview [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86: 787–790.
- Xu H, Tokinaga H, Xie S P. 2010. Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05 [J]. *J. Climate.*, 23: 4704–4715.
- Yu Y S, Duan M S, Xu H, et al. 2009. Dynamics of nonlinear error growth and season-dependent predictability of El Niño events in the Zebiak-Cane model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135: 2146–2160. doi:10.1002/qj.526.
- Yu Y S, Mu M, Duan W S. 2012a. Does model parameter error cause a significant spring predictability barrier for El Niño events in the Zebiak-Cane model? [J]. *J. Climate.*, 25: 1263–1277.
- Yu Y S, Mu M, Duan W S, et al. 2012b. Contribution of the location and spatial pattern of initial error to uncertainties in El Niño predictions [J]. *J. Geophys. Res.-Ocean*, 117: C06018, doi:10.1029/2011JC007758.
- Zhou F F, Mu M. 2011. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (5): 997–1010.
- Zhou F F, Mu M. 2012a. The impact of horizontal resolution on the CNOP and on its identified sensitive areas for tropical cyclone predictions [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (1): 36–46.
- Zhou F F, Mu M. 2012b. The time and regime dependences of sensitive areas for tropical cyclone prediction using the CNOP method [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s00376-012-1174-0.
- Zhu C Y, Byrd R H, Lu P H, et al. 1997. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization [J]. *ACM T. Math. Software*, 23 (4): 550–560.