

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

穆穆¹ 王洪利^{1, 2} 周非凡^{2, 3}

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

3 中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室, 北京 100029

摘 要 针对适应性观测中敏感性区域的确定问题, 考虑初始误差对预报结果的影响, 比较了条件非线性最优扰动 (CNOP) 与第一线性奇异向量 (FSV) 在两个降水个例中的空间结构的差异, 考察了它们总能量范数随时间发展演变的异同。结合敏感性试验的分析, 揭示了预报结果对 CNOP 类型的初始误差的敏感性要大于对 FSV 类型的初始误差的敏感性, 因而减少初值中 CNOP 类型误差的振幅比减少 FSV 类型的收益要大。这一结果表明可以把 CNOP 方法应用于适应性观测来识别大气的敏感区。关于将 CNOP 方法有效地应用于适应性观测所面临的挑战及需要采取的对策等也进行了讨论。

关键词 适应性观测 敏感性区域 条件非线性最优扰动 第一奇异向量

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1102-11

中图分类号 P456

文献标识码 A

A Preliminary Application of Conditional Nonlinear Optimal Perturbation to Adaptive Observation

MU Mu¹, WANG Hong-Li^{1, 2}, and ZHOU Fei-Fan^{2, 3}

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 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract This study is concerned with the applicability of conditional optimal perturbation (CNOP) to the determination of sensitivity area in adaptive observation. MM5 (Mesoscale Model 5) model and its adjoint form are utilized to study the effects of initial errors on the forecasts of two precipitation cases in July 2003 and in August 1996. The authors compare the differences between the structures of the conditional nonlinear optimal perturbations (CNOPs) and the first linear singular vectors (FSVs), and calculate the developments of their total energies. It is found that the structures of CNOPs differ much from those of FSVs as well as the developments of their total energies. The results of sensitivity experiments indicate that the forecast results are more sensitive to the CNOP-type initial errors than the FSV-type ones. This suggests that the forecast results benefit more from the reductions of the CNOP-type initial errors than the reductions of the FSV-type ones. This indicates that it is feasible to use CNOP for the deter-

收稿日期 2007-05-30, 2007-06-20 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-230, 国家自然科学基金 NO. 40675030

作者简介 穆穆, 男, 1954 年出生, 研究员, 主要从事天气与气候的可预报性、资料同化、集合预报与目标观测研究。

E-mail: mumu@lasg.iap.ac.cn

mination of sensitivity area in adaptive observation. The authors also discuss the problems that may be confronted in applying CNOPs to adaptive observation and the potential solutions.

Key words adaptive observation, sensitivity area, Conditional Nonlinear Optimal Perturbation (CNOP), the first linear singular vector (FSV)

1 引言

适应性观测 (adaptive observation), 又被称为目标观测 (targeting observation)^[1, 2], 其基本思想是通过在特定区域增加观测以改进数值天气预报, 提高预报技巧。Palmer 等^[2]指出, 交互式耦合资料同化与适应性观测原则上能够引起确定性数值天气预报方法的革命性变革。适应性观测已经在一系列外场试验中得到实施 (FASTEX^[3]、NORPEX^[4]等), 并在利用简单、复杂模式的观测系统试验中不断得到完善。

适应性观测除了上述提高可预报性的目的外, 还被用来研究天气系统的发展变化。本文主要研究前者。适应性观测的主要研究内容是确定增加观测的区域、高度、观测频率及空间分布密度等。目前的研究主要集中在如何确定所增加的观测区域。上述要素的确定需要通过一些特定的技术和方法。最早应用于适应性观测的方法是繁殖方法 (breeding method)^[5]和位涡诊断方法^[2]。Langland 等^[6]指出也可以将敏感性向量 (sensitivity vector) 应用于适应性观测, 该方法事实上与奇异向量方法很相似^[7]。Palmer 等^[2]首次将奇异向量方法用于适应性观测, 并且考查了不同范数定义下的敏感性区域的异同, 同时也将该方法与繁殖方法和位涡诊断方法进行比较。结果表明, 除了敏感性矢量法外, 其他方法确定的敏感性区域和奇异向量法确定的敏感性区域差别较大, 然而哪个更优则只有对预报效果进行评估后, 通过实践检验才能确定。Aberson^[8]在研究热带气旋时发现, 可以用集合的办法来确定目标观测区域, 在此区域增加观测可以提高热带气旋移动路径预报的准确率。Bishop 等在反演方法基础上又提出了集合变换技术^[10]、集合变换卡曼滤波技术 (ETKF)^[10]。Thomas 等^[11]提出可以从集合卡曼滤波 (EnKF) 中改善的背景场误差协方差出发确定目标观测区域。在集合卡曼滤波被广泛运用的同时, 奇异向量也在不断地被完善和使用^[12~14]。Majumdar 等^[15]对集合变换卡曼滤波和

总能量奇异向量方法进行了比较, 发现二者对于较大尺度的飓风系统确定的目标区域相差不大, 当使用的是 NOGAPS 模式的时候, 相同区域达 86%, 若使用的是欧洲中心的模式, 则相同区域有 57%; 对于弱的热带气旋, 二者所确定的敏感性区域差别则比较大。因此, 他们指出可以将集合变换卡曼滤波和总能量奇异向量方法结合起来, 并从理论上说明了这种结合可以得到更优的敏感性区域, 但代价是需要较大的计算量。国内在适应性观测方面的研究还比较薄弱^[16, 17]。

奇异向量方法假定初始扰动充分小, 在较短的时间区间内, 该扰动的非线性发展可以用非线性模式的切线性模式刻画。由此可见, 该方法的适用性取决于线性近似的有效性, 也取决于个例、初始扰动大小和所关心时间区间的长短。为了克服线性近似假设的不足, Mu 等^[18, 19]提出了条件非线性最优扰动 (conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP) 方法。CNOP 作为线性奇异向量在非线性领域的一个自然推广, 避免了线性近似假设的不足。该方法已被应用于厄尔尼诺的可预报性与海洋热盐环流的敏感性分析等领域^[20~24]。条件非线性最优扰动是满足一定初始约束条件的所有扰动中, 在所考察的时间段结束时, 具有最大非线性发展的扰动。因此条件非线性最优扰动对可预报性的影响最大。如果初始约束取为初始观测误差的一个整体度量, 则 CNOP 在优化终止时刻的非线性发展是最大预报误差上界的估计。Mu 等^[19]的工作表明了二维准地转模式, Zebiak-Cance 模式中, CNOP 在预报时段内的发展是优于线性奇异向量的。那么类似于奇异向量方法, 能否将 CNOP 用于适应性观测实验的研究呢?

本文尝试将 CNOP 方法用于适应性观测研究。利用宾夕法尼亚大学和美国国家大气研究中心 (PSU-NCAR) 共同开发的 MM5 模式, 以两个降水天气过程为例, 分别计算了线性奇异向量与条件非线性最优扰动, 通过分析二者空间结构的差异及其随时间的发展演变, 考查了预报结果对线性奇异

向量与条件非线性最优扰动类型初始误差的敏感性,探讨了 CNOP 方法在目标观测研究中的应用前景、所面临的挑战及需要采取的策略。

2 方法介绍

2.1 线性奇异向量 (LSV)

考虑状态向量 $\mathbf{X}$ 的发展方程的初值问题:

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

其中, $\mathbf{F}$ 是一个非线性偏微分算子, $\mathbf{X}_0$ 初始状态向量。方程 (1) 在预报时刻 t 的数值解可以写成如下的形式:

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{M}(\mathbf{X}_0), \quad (2)$$

此处, $\mathbf{M}$ 是离散的非线性传播算子。 $\mathbf{X}_t$ 为状态向量 $\mathbf{X}$ 在 t 时刻的非线性发展。对于状态向量 $\mathbf{X}$ 的初始扰动 $\delta\mathbf{X}_0$, 假设其充分小, 在较短的时间内, 该扰动的发展可以用非线性传播算子 $\mathbf{M}$ 对应的切线性算子 $\mathbf{L}$ 来描述:

$$\delta\mathbf{X}_t = \mathbf{L}(\delta\mathbf{X}_0), \quad (3)$$

这里, $\delta\mathbf{X}_t$ 表示 $\delta\mathbf{X}_0$ 在 t 时刻的线性发展。

为了度量状态向量及其扰动的发展, 需要选取一合适的范数。在离散情形, 这等同于选定一个正定矩阵 $\mathbf{C}$ 。这时, 初始扰动 $\delta\mathbf{X}_0$ 的发展可用如下的目标函数 $J(\delta\mathbf{X}_0)$ 度量:

$$J(\delta\mathbf{X}_0) = [\mathbf{P}\mathbf{L}(\delta\mathbf{X}_0)]^T \mathbf{C} [\mathbf{P}\mathbf{L}(\delta\mathbf{X}_0)], \quad (4)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{P}$ 表示局地投影算子, 上标 T 表示矩阵的转秩。

在 $\delta\mathbf{X}_0^T \mathbf{C} \delta\mathbf{X}_0 = 1$ 的条件下求 (4) 式的极大值问题, 可以转化为求正定矩阵 $\mathbf{S} = \mathbf{L}^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} \mathbf{L}$ 的第一特征向量问题。令

$$\delta\mathbf{X}_0 = \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y},$$

则 (4) 式可写为

$$J(\delta\mathbf{Y}) = [\mathbf{P}\mathbf{L}(\mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y})]^T \mathbf{C} [\mathbf{P}\mathbf{L}(\mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y})], \quad (5)$$

且 $\delta\mathbf{Y}^T \delta\mathbf{Y} = 1$ 。再令

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{C}^{-\frac{1}{2}},$$

则 (5) 式可写为

$$J(\delta\mathbf{Y}) = [\mathbf{A}(\delta\mathbf{Y})]^T \mathbf{C} [\mathbf{A}(\delta\mathbf{Y})]. \quad (6)$$

相应的, 在 $\delta\mathbf{Y}^T \delta\mathbf{Y} = 1$ 的条件下求 (6) 式的极大值问题可以转化为求正定矩阵 $\mathbf{S}' = \mathbf{A}^T \mathbf{C} \mathbf{A}$ 的第一特征向量问题。正定矩阵 $\mathbf{S}'$ 的特征值 σ_i^2 对应的特征向量 $\mathbf{v}_i$ 在范数 $\mathbf{C}$ 的度量下是正交的, 其第一特征向量

(FSV) 即为 (6) 式极大值问题的解。称 σ_i 为算子 $\mathbf{A}$ 的奇异值, $\mathbf{v}_i$ 为 $\mathbf{A}$ 的奇异向量, FSV 为 $\mathbf{A}$ 的第一奇异向量。

2.2 条件非线性最优扰动 (CNOP) 的定义

对于给定的范数 (在离散情形由正定矩阵 $\mathbf{C}$ 确定), 初始扰动 $\delta\mathbf{X}_0^*$ 称为条件非线性最优扰动 (CNOP)^[19], 当且仅当

$$J(\delta\mathbf{X}_0^*) = \max_{\delta\mathbf{X}_0^T \mathbf{C} \delta\mathbf{X}_0 \leq \beta} J(\delta\mathbf{X}_0),$$

其中,

$$J(\delta\mathbf{X}_0) = (\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \delta\mathbf{X}_0) - \mathbf{M}(\mathbf{X}_0))^T \cdot \mathbf{C} (\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \delta\mathbf{X}_0) - \mathbf{M}(\mathbf{X}_0)). \quad (7)$$

不等式 $\delta\mathbf{X}_0^T \mathbf{C} \delta\mathbf{X}_0 \leq \beta$ 为约束条件。从 CNOP 的定义可知, 在所有满足 $\delta\mathbf{X}_0^T \mathbf{C} \delta\mathbf{X}_0 \leq \beta$ 的扰动中 CNOP 的非线性发展最大。同样, 令

$$\delta\mathbf{X}_0 = \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y},$$

则 (7) 式可写为

$$J(\delta\mathbf{Y}) = [\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y}) - \mathbf{M}(\mathbf{X}_0)]^T \cdot \mathbf{C} [\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y}) - \mathbf{M}(\mathbf{X}_0)], \quad (8)$$

且有 $\delta\mathbf{Y}^T \delta\mathbf{Y} \leq \beta$ 。

若也使用局地投影算子 $\mathbf{P}$, 则 (8) 式可写为

$$J(\delta\mathbf{Y}) = [\mathbf{P}\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y}) - \mathbf{P}\mathbf{M}(\mathbf{X}_0)]^T \cdot \mathbf{C} [\mathbf{P}\mathbf{M}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta\mathbf{Y}) - \mathbf{P}\mathbf{M}(\mathbf{X}_0)], \quad (9)$$

且 $\delta\mathbf{Y}^T \delta\mathbf{Y} \leq \beta$ 。

在某些情况下, 目标函数 (9) 式可能存在局部极大值点, 此时对应的初始扰动称之为局部 CNOP。对于 LSV 和 CNOP 方法的详细阐述可参阅文献 [18, 19, 25]。

3 试验设计

3.1 模式与优化算法

本文使用的模式是宾夕法尼亚大学和美国国家大气研究中心 (PSU-NCAR) 共同开发的中尺度模式 MM5^[26] 及其伴随系统^[27]。物理过程包括干对流调整、大尺度降水和 KuO 方案对流参数化降水。

模式水平格点数为 51×61 , 垂直方向 10 层。水平分辨率为 120 km, 模式顶取在 100 hPa。本文的度量范数 $\mathbf{C}$ 采用干能量范数, 这是因为用干能量范数计算的线性奇异向量的空间谱和分析误差的谱一致^[2], 因此干能量范数可以作为分析误差协方差模的一阶近似用于计算奇异向量。具体地, 对应于

干能量范数的正定矩阵 $\mathbf{C}$ 可以表示为

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{e} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_p}{T_r} \mathbf{e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_a T_r}{p_r^2} \mathbf{e} \end{pmatrix}$$

其中, $\mathbf{e}$ 为单位矢量。

本文的状态向量取 $\mathbf{X}=(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}, p_s)$ 。 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{T}, p_s$ 分别为纬向风场、经向风场、温度场及地面气压场。因此, 在干能量范数度量下, 目标函数可以表示为

$$J(\delta \mathbf{Y}) = \frac{1}{D} \int_D \int_0^1 \left[\mathbf{u}'^2 + \mathbf{v}'^2 + \frac{c_p}{T_r} \mathbf{T}'^2 + R_a T_r \left(\frac{p'_s}{p_r} \right)^2 \right] d\sigma ds,$$

这里, c_p 、 R_a 为定压比热和干空气气体常数, 分别为 $1005.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 287.04 K^{-1} ; $T_r=270 \text{ K}$, $p_r=1000 \text{ hPa}$; D 为验证区域的大小, σ 为垂直方向坐标; $\mathbf{u}', \mathbf{v}', \mathbf{T}'$ 及 p'_s 在条件非线性最优扰动方法下对应于状态向量 $[\mathbf{PM}(\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}^{-\frac{1}{2}} \delta \mathbf{Y}) - \mathbf{PM}(\mathbf{X}_0)]$ 的分量场。

本文应用有约束的迭代算法 SPG2^[28] 计算 CNOP。采用 Lanczos 方法^[29] 计算奇异向量。一般, 约束条件 β 应该是初始分析场误差方差的一种表征。因为一般难以精确获取初始分析场的误差方差, 在本文中, 我们取 $\beta=860.37$, 这样使得 CNOP 的 U 、 V 风场分量的最大值为 $1 \sim 2 \text{ m/s}$ 左右, 温度场分量的最大值为 2 K 左右, 与目前数值天气预报分析场误差方差大体相当。关于 β 的选取问题, 在本文的讨论中我们还会涉及。

3.2 个例介绍

个例 A 为 2003 年 7 月 4 日 00 时~5 日 00 时 (国际协调时, 下同) 发生在淮河流域的一次梅雨锋降水过程。模式启动时间为 4 日 00 时, 利用美国国家环境预报中心 (NCEP) 分析资料和常规观测资料形成初值以及侧边界条件。个例 B 是 1996 年 8 月 5 日 00 时~6 日 00 时发生在华北平原上的一次降水过程。利用欧洲中期数值预报中心 (EC-MWF) 再分析资料形成模式初值和侧边界条件。局地投影算子在验证区域 (图 1 的矩形区域) 内取值为 1, 其他区域为 0。

图 1a、b 给出了个例 A、B 在初始时刻 $\sigma=0.45$

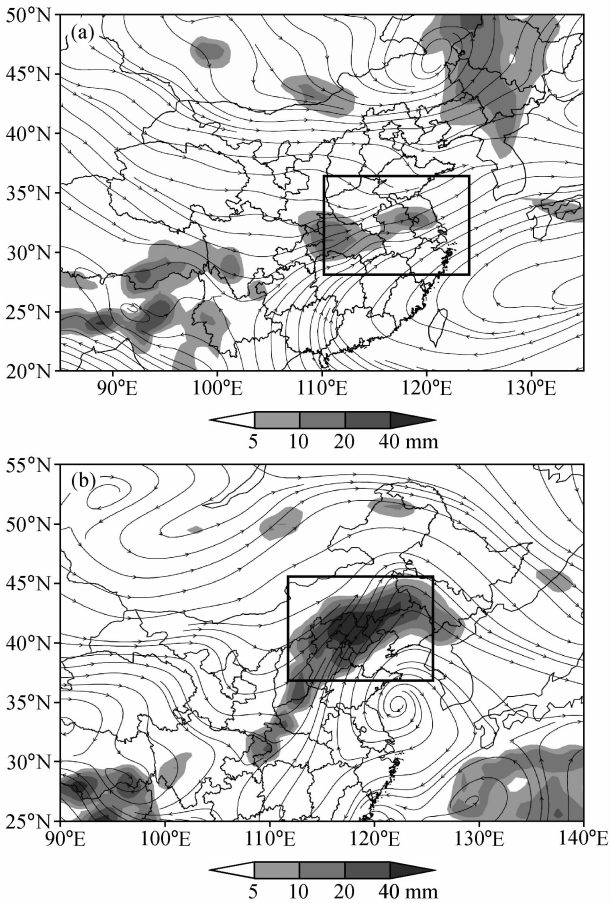


图 1 个例 A(a)、个例 B(b) 在初始时刻 0.45 等 σ 面上的流场和 24 小时模拟降水场 (阴影) 分布图。矩形表示验证区
Fig. 1 The streamline field at level $\sigma=0.45$ at the initial time and the simulated 24-hour precipitation (shaded): (a) Case A, (b) case B. Rectangular area is the verification area

面上的流场和 24 小时的模拟降水。对于个例 A、B 模拟降水型和观测具有一定的可比性, 基本再现了降水的落区; 对于大尺度天气形势也具有较好的模拟 (图略)。个例 A 模拟的降水量偏低, 这可能与本试验的模式分辨率以及采用的降水物理过程相对简单有关。

4 个例分析

4.1 个例 A 结果

4.1.1 CNOP 空间结构

由 CNOP 的定义可知, 给定基态以及初始约束后, CNOP 的空间模态决定了它的发展。对于个例 A, 我们的计算得到了 CNOP 和局部 CNOP。两者都具有显著的随高度向西倾斜的斜压结构特征。图

2 给出了个例 A 的 0.2°C (深色) 和 -0.2°C (浅色) 等温度面的三维空间结构。

CNOP、局部 CNOP 和 FSV 的水平结构都具有局地性特征, 但具体结构有一定差异。图 3 给出了 4 日 00 时 0.45 等 σ 面上 CNOP、局部 CNOP 和

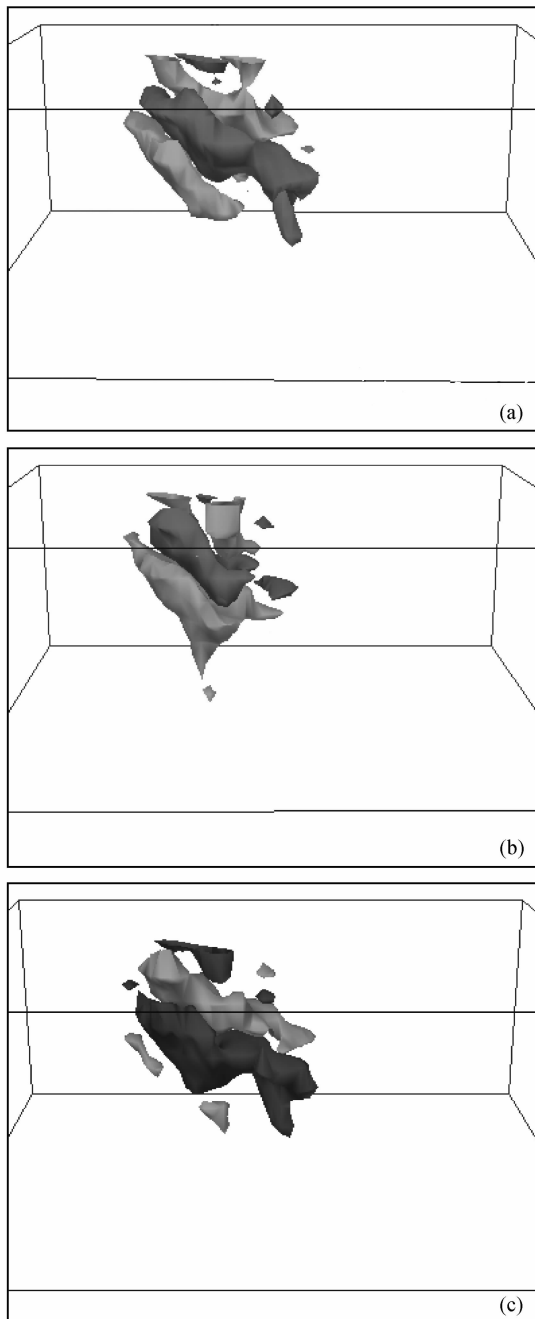


图2 个例 A 7 月 4 日 00 时 0.2 K (深色) 和 -0.2 K (浅色) 等温度面的三维空间分布: (a) CNOP, (b) FSV, (c) 局部 CNOP

Fig. 2 Three-dimensional distribution of isothermal surfaces 0.2 K (dark) and -0.2 K (light) at 0000 UTC 4 Jul for case A: (a) CNOP, (b) FSV, (c) local CNOP

FSV 的温度 (阴影部分) 和风矢量。其他 σ 面上 CNOP、局部 CNOP 也具有局地性 (图略)。由图 3 可知, 极值中心都位于青藏高原东北上空槽的附近。仔细观察图 3 可知, CNOP, FSV 与局部 CNOP 空间模态有位相上的一个偏移: FSV 比 CNOP 右偏 $1/4$ 位相, 局部 CNOP 比 CNOP 左偏 $1/4$ 位相左右。

由图 3a 可见, CNOP 在 $(32^{\circ}\text{N}, 101^{\circ}\text{E})$ 和 $(35^{\circ}\text{N}, 109^{\circ}\text{E})$ 附近存在两个强的暖中心, $(37^{\circ}\text{N}, 111^{\circ}\text{E})$ 附近为一个中等的冷中心。而对于 FSV, $(33^{\circ}\text{N}, 97^{\circ}\text{E})$ 为一个冷中心, 两个弱的暖中心位于其右侧。同时 CNOP 和 FSV 两者气旋性环流的位置也不相同。在此 σ 面上, CNOP 和局部 CNOP 的空间结构有些相似, 但是温度场中心位置有些不同。特别对于 CNOP, 主要冷中心位于 $(37^{\circ}\text{N}, 111^{\circ}\text{E})$ (图 3a); 而对于局部 CNOP, 主要冷中心位于 $(33^{\circ}\text{N}, 92^{\circ}\text{E})$ (图 3c)。

我们计算了以上几种扰动间的相似系数, 即两个矢量间夹角的余弦

$$S_{ij} = \frac{\langle \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_i \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{X}_j, \mathbf{X}_j \rangle}}$$

来定量考察它们之间的相似性。CNOP 和局部 CNOP 的相似系数为 0.347。CNOP (局部 CNOP) 与 FSV 之间的相似系数为 0.454 (-0.609)。以上结果说明 CNOP、局部 CNOP 的空间结构与 FSV 有一定的差异。

4.1.2 CNOP 的演变

下面考查优化期间 CNOP 的演变情况, 并且与 FSV 和局部 CNOP 的演变做比较。图 4a~c 给出了优化终止时刻 CNOP、FSV 和局部 CNOP 的非线性演变。由图 4a 可见, CNOP 已经到达我们所关心的区域同时保持局地性的特征。

在 0.45 等 σ 面上, CNOP、FSV 和局部 CNOP 表现出很明显的波列结构, 位相之间的偏移更加明显。表 1 给出了 0.45 等 σ 面上的 CNOP 和 FSV 的温度、纬向风、经向风分量的最大 (最小) 值。由表 1 可见, 在初始时刻, CNOP 与 FSV 的温度、纬向风、经向风的最大 (最小) 值差别不大, 甚至 CNOP 的部分量值还小于 FSV。但到优化终止时刻, CNOP 的各个极值都超过了 FSV, 这说明 CNOP 的非线性发展比 FSV 的发展大得多。在 $\sigma=0.25$ 面上这一特征更加明显, 我们也考查了

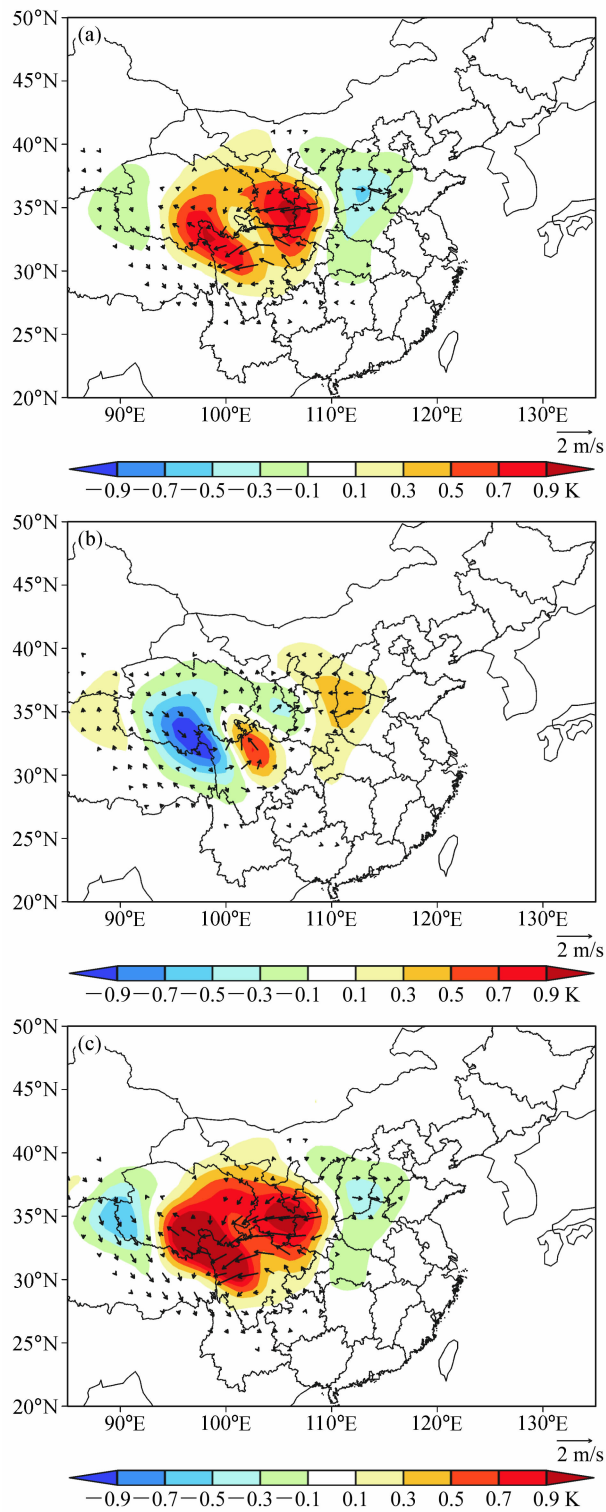


图3 个例A7月4日00时0.45等 σ 面上的温度(阴影)和风矢量:(a) CNOP, (b) FSV, (c) 局部 CNOP
Fig. 3 The temperature (shaded) and wind vector at level $\sigma=0.45$ at 0000 UTC 4 Jul for case A: (a) CNOP, (b) FSV, (c) local CNOP

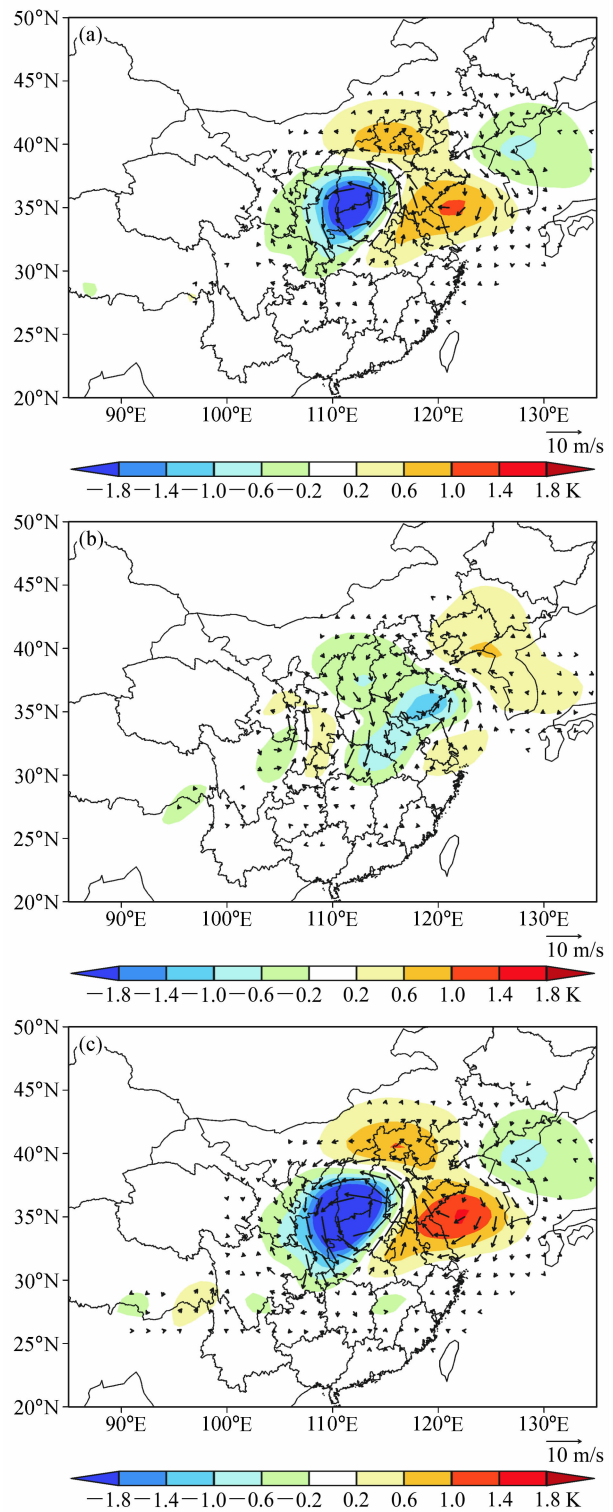


图4 个例A7月5日00时0.45等 σ 面上的温度(阴影)和风矢量:(a) CNOP, (b) FSV, (c) 局部 CNOP
Fig. 4 The temperature (shaded) and wind vector at level $\sigma=0.45$ at 0000 UTC 5 Jul for case A: (a) CNOP, (b) FSV, (c) local CNOP

表 1 个例 A 温度 (T)、纬向风 (U) 和经向风 (V) 在 0.45 等 σ 面上的最大、最小值

Table 1 The maximum and minimum values of temperature (T), zonal wind (U) and meridional wind (V) at level $\sigma=0.45$ for case A.

时间	扰动类型	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\min}$
2003 年 7 月	CNOP	0.8	-0.6	0.4	-1.4	0.5	-0.3
4 日 00 时	FSV	0.6	-1.0	0.6	-0.6	0.9	-0.3
2003 年 7 月	CNOP	0.6	-1.5	4.0	-4.0	7.0	-6.0
5 日 00 时	FSV	0.6	-1.2	3.5	-2.5	6.0	-5.0

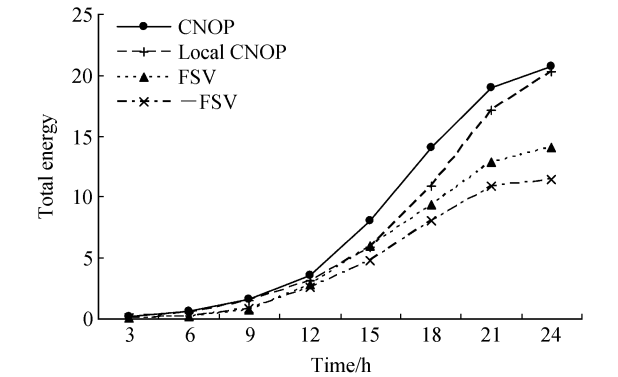


图 5 个例 A 在优化时段内关心区域总能量 TE 随时间的演变曲线. 其中 TE 已经除以了初始时刻的总能量 (下同)。

Fig. 5 The development of total energy (TE) in the verification area during the optimal period for case A. The y-axis values are the results of TE divided by the counterpart of initial time (the same below)

FSV 的反相模态 ($-FSV$) 的非线性演变, 发现在该 σ 面上比 FSV 的演变要弱。

为了从整体上考查几种扰动的非线性演变对于所关心区域预报的影响, 我们考察了优化时段内所关心区域总能量 TE (和目标函数的定义相一致) 随时间的演变 (结果见图 5)。容易看出, CNOP 与局部 CNOP 在优化时段内的总能量发展都要大于 FSV 与 $-FSV$ 。

4.2 个例 B 结果

4.2.1 CNOP 的结构

采用 SPG2 算法和能量模我们计算了个例 B 的 CNOP 和 FSV。对个例 B 没有发现局部 CNOP。与个例 A 类似, 个例 B 的 CNOP 和 FSV 同样具有局地性 (图 6), 同时温度场 (图略) 表现出斜压结构特征。CNOP 与 FSV 的相似系数为 0.29。表明 CNOP 和 FSV 是空间模态很不相同的两种扰动。与个例 A 相比, 最大的不同是 CNOP 和 FSV 位于

表 2 个例 B 的温度 (T)、纬向风 (U) 与经向风 (V) 在 0.45 等 σ 面上的最大、最小值

Table 2 The maximum and minimum values of temperature (T), zonal wind (U) and meridional wind (V) at level $\sigma=0.45$ for case B

时间	扰动类型	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\min}$
1996 年 8 月 5	CNOP	0.7	-1.1	1.0	-0.8	0.7	-0.8
日 00 时	FSV	0.5	-0.8	1.1	-0.7	0.6	-0.7
1996 年 8 月 6	CNOP	0.6	-1.2	3.0	-4.0	2.0	-5.0
日 00 时	FSV	0.8	-1.2	3.5	-2.0	2.0	-5.0

表 3 同表 2, 但为 0.25 等 σ 面上
Table 3 The same as Table 2, but at level $\sigma=0.25$

时间	扰动类型	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$V_{\max}$	$V_{\min}$
1996 年 8 月 5	CNOP	0.4	-0.8	0.8	-0.6	0.4	-0.3
日 00 时	FSV	0.4	-0.7	0.6	-0.5	0.3	-0.3
1996 年 8 月 6	CNOP	1.0	-1.6	6.4	-4.4	3.7	-4.6
日 00 时	FSV	0.3	-1.7	5.1	-3.5	3.4	-3.8

验证区域的附近。这是因为个例 B 的气旋稳定。而个例 A 验证区域的上游是西风气流。

4.2.2 CNOP 的演变

图 7 给出了 CNOP 和 FSV 在优化结束时刻即 1996 年 8 月 6 日 00 时 0.45 等 σ 面上温度场和风场的非线性发展, 两者的结构相差不大。从极值角度看, 此 σ 面上, CNOP 的温度、经向风、纬向风分量的最大 (最小) 值与 FSV 的对应项的非线性发展也基本相当 (见表 2)。但是在其他 σ 面上, 不仅温度场和风场的结构很不一样 (图 8), 最大 (最小) 值也有较大差别 (表 3), CNOP 类型对应的量值明显大于 FSV 类型对应的值。

另一方面, 优化终止时刻 CNOP 和 FSV ($-FSV$) 非线性发展的相似系数为 0.60 (-0.36)。由此可见, 从空间模态上看, CNOP 和 FSV 的演变比较相似而 CNOP 和 $-FSV$ 的演变非常不同。相似系数仅表示两个向量模态的相似程度, 而不能给出两个向量模的相对大小信息。几种扰动模态非线性发展的能量表明 (图 9), 对于 CNOP, 优化终止时刻的 TE 是初始时刻的 13.0 倍, 而 FSV ($-FSV$) 的非线性发展只是初始时刻的 8.56 (8.63)。显然 CNOP 优化终止时刻的 TE 比 FSV 大 1/2。优化时段内 CNOP 的增长始终比 FSV 要大。以上结果说明, 两者总能量的演变非常不同。

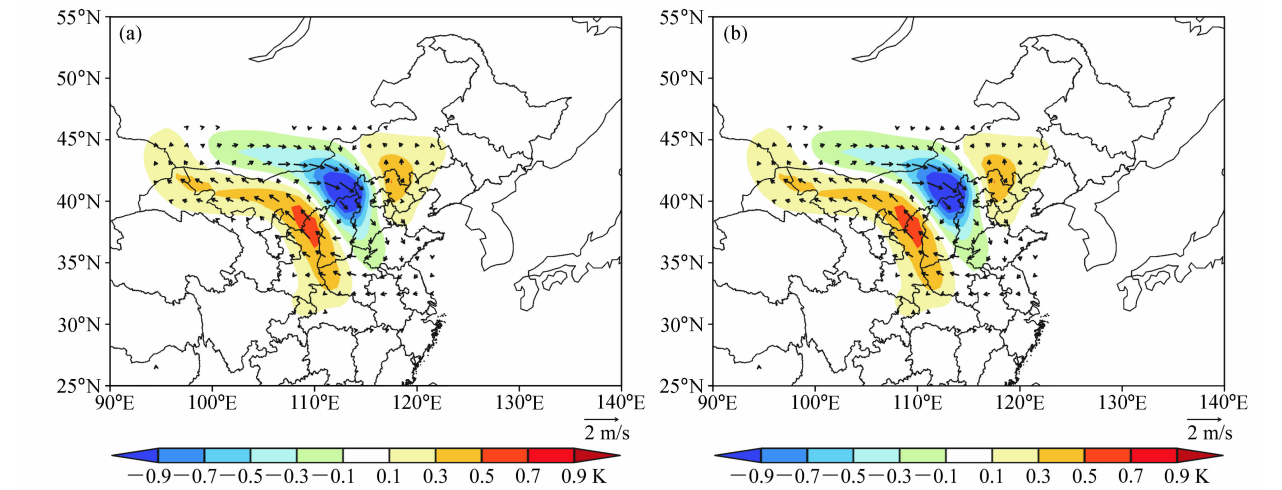


图 6 个例 B 8 月 5 日 00 时 0.45 等 σ 面上的温度 (阴影) 和风矢量: (a) CNOP, (b) FSV
Fig. 6 The temperature (shaded) and wind vector at level $\sigma=0.45$ at 0000 UTC 5 Aug for case B: (a) CNOP, (b) FSV

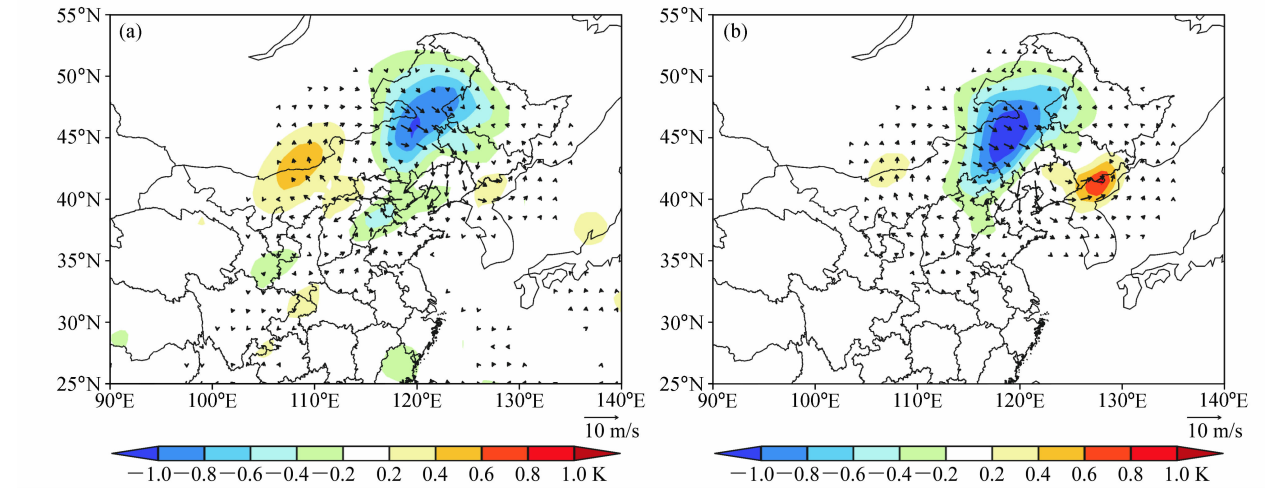


图 7 个例 B 8 月 6 日 00 时 0.45 等 σ 面上的温度 (阴影) 和风矢量: (a) CNOP, (b) FSV
Fig. 7 The temperature (shaded) and wind vector at level $\sigma=0.45$ at 0000 UTC 6 Aug for case B: (a) CNOP, (b) FSV

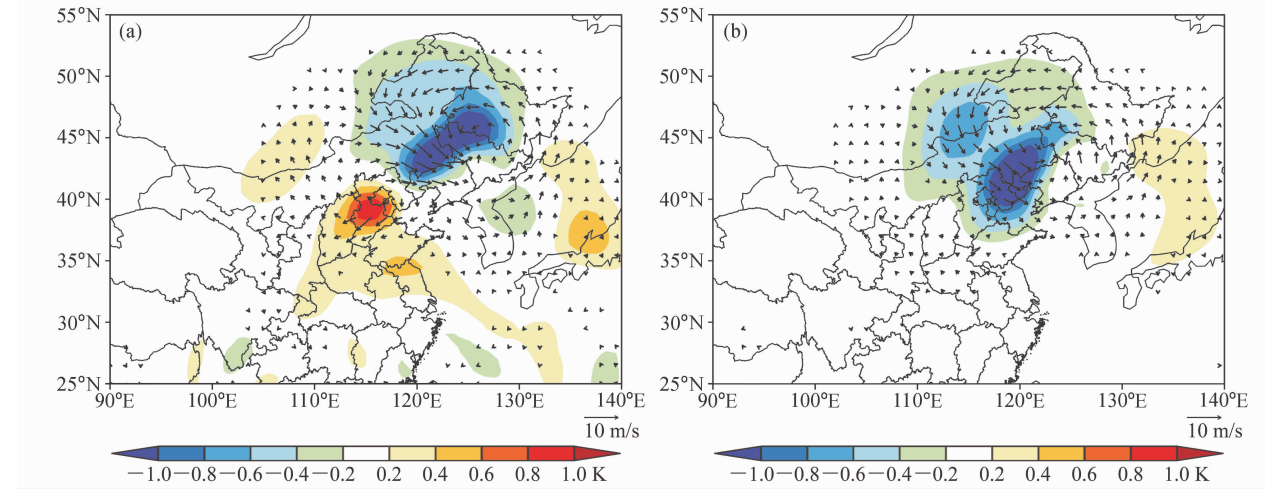


图 8 同图 7, 但为 0.25 等 σ 面上
Fig. 8 The same as Fig. 7, but at level $\sigma=0.25$

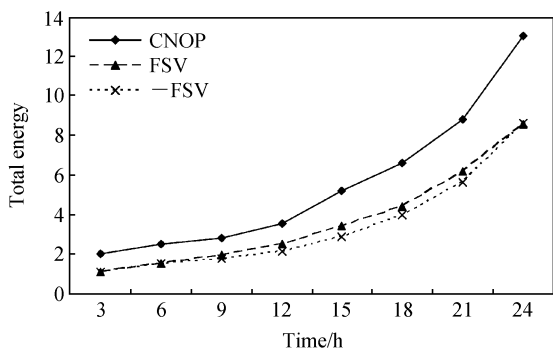


图9 个例B优化时段内关心区域总能量TE随时间的演变曲线
Fig. 9 The development of total energy in the verification area during the optimal period for case B

5 敏感性试验

个例A、B都表明CNOP和FSV的初始空间结构不同,非线性演变在优化终止时刻差别也很大。从总能量的演变上看,CNOP类型的能量在整个过程都要大于FSV类型的能量。由此可见,CNOP类型的初始扰动的非线性发展大于FSV(—FSV)类型的初始扰动的发展。很自然,我们应该思考下述问题:如果CNOP和FSV是可能的初始分析误差模态,对CNOP和FSV减少相同的振幅,然后在初始场中减去这两种类型的误差,预报结果会有什么样的改变呢?这是本节的研究内容。

5.1 个例A结果

我们把CNOP和FSV的振幅分别减小为各自的0.75、0.50和0.25,叠加到基态上,然后以其作为初值积分非线性模式,试验分别记为C0.75A、C0.50A、C0.25A、F0.75A、F0.50A、F0.25A。而直接以CNOP和FSV叠加到基态上进行的试验记为C1.00A、F1.00A。这些试验的TE随时间的演变如图10所示,清楚表明预报结果对CNOP类型的初始误差更敏感。当振幅由1.0减小为各自的0.5时,减小CNOP类型的误差更能减小我们所关心区域的预报误差。而当振幅进一步较小时,CNOP和FSV类型误差收益相当,这意味着分析误差振幅很小时,线性近似是可取的。

5.2 个例B结果

具体试验方法与个例A相同。CNOP和FSV的振幅分别减小为各自的0.75、0.50和0.25,叠加到基态上,然后以其作为初值积分非线性模式,试验分别记为C0.75B、C0.50B、C0.25B、

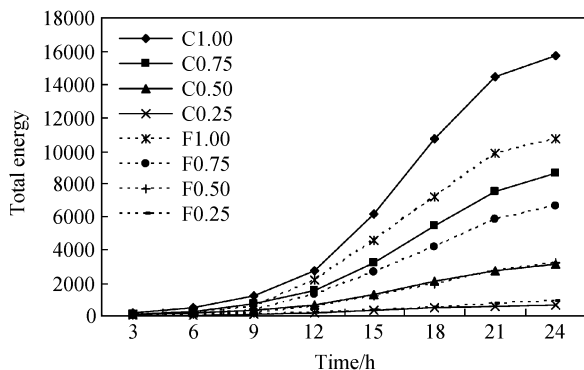


图10 个例A敏感性试验C1.00A, C0.75A, C0.50A, C0.25A, F1.00A, F0.75A, F0.50A, F0.25A的总能量增长曲线。实线代表CNOP类型的扰动;短虚线代表FSV类型的扰动
Fig. 10 The development of total energy for sensitivity trials C1.00A, C0.75A, C0.50A, C0.25A, F1.00A, F0.75A, F0.50A, F0.25A for case A. Solid lines stand for CNOP, short dashed lines for FSV

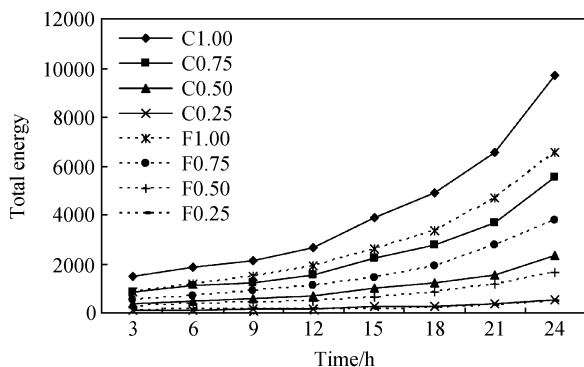


图11 个例B敏感性试验C1.00B, C0.75B, C0.50B, C0.25B, F1.00B, F0.75B, F0.50B, F0.25B的总能量增长曲线。实线代表CNOP类型的扰动;短虚线代表FSV类型的扰动
Fig. 11 The development of total energy for sensitivity trials C1.00B, C0.75B, C0.50B, C0.25B, F1.00B, F0.75B, F0.50B, F0.25B for case B. Solid lines stand for CNOP, short dashed lines for FSV

F0.75B、F0.50B、F0.25B。而直接以CNOP和FSV叠加到基态上进行的试验记为C1.00B、F1.00B。图11给出了这些试验的TE随时间的演变。同样可见,当振幅减小为各自的0.5倍时,减小CNOP类型的误差更能减小我们所关心区域的预报误差。而当振幅更小时,CNOP和FSV类型误差收益基本相当。结合个例A的结果,可知分析误差振幅很小时,线性近似是可取的。

个例A、B都表明预报结果对CNOP类型的初始误差的敏感性要大于对FSV类型的初始误差的

敏感性,由此可见减少初值中 CNOP 类型误差的振幅比减少 FSV 类型的收益要大。

6 结论与讨论

本文利用 MM5 模式及其伴随模式,以两个降水天气过程为例,采用干能量范数作为发展的度量,分别计算了第一线性奇异向量 (FSV) 与条件非线性最优扰动 (CNOP),结果表明,FSV 与 CNOP 的空间结构都具有显著的随高度向西倾斜的斜压性特征,而位相上存在偏移,相似系数的计算也表明 CNOP 的空间结构与 FSV 的并不相同。这种空间模态的差异决定了它们随时间发展演变的差别。计算表明,CNOP 的非线性发展比 FSV 的和负的 FSV 的发展都要大得多。敏感性试验表明,预报结果对 CNOP 类型的初始误差的敏感性要大于对 FSV 类型的初始误差的敏感性,由此可见,减少初值中 CNOP 类型误差的振幅比减少 FSV 类型的收益要大。因此,建议把 CNOP 方法应用于适应性观测来识别大气的敏感区。

本文的工作是将 CNOP 方法应用于适应性观测的初步研究。首先,这里只对两个个例进行研究,毫无疑问,进一步大量的个例研究是需要的。其次,虽然使用的 MM5 模式中包含有水汽方程,但是这里使用了干能量范数度量扰动的发展,在目标函数的构造过程中,也没有包括垂直速度项,这显然是不够的,在后续工作中还要考虑湿过程的作用,包括在目标函数的构造中考虑垂直速度的作用,这都需要深入的讨论。还有,本文在得到 SV 与 CNOP 以后,也没有进一步讨论如何由 SV 与 CNOP 的空间结构来确定敏感区。如何进一步由 CNOP 的空间结构来确定敏感性区域,还需要进一步深入的研究。当然,在敏感性区域确定之后,还需要通过回报试验来检验在该区域增加观测是否能够有效提高预报技巧。另外,在使用 CNOP 方法时,约束条件 β 的选取也是需要进一步深入探讨的问题。一般而言, β 的大小应该是分析场误差方差的一个估计。但在实际实施中,其选取不可避免地具有一定的经验性,这一点与资料同化、集合预报中诸如目标函数的权重系数的选取,初始误差协方差矩阵的选取类似,需要做大量的数值试验,然后给出较为合理的取值。

为了把 CNOP 方法有效地应用于适应性观测,

还必须开展非线性优化方法算法的研究。特别,优化中梯度的计算是至关重要的。与文献[30]一样,在本文中采用了 MM5 模式的伴随模式计算梯度。是否存在其他方法可以不用伴随模式计算梯度,从而避免编写伴随模式程序,减少计算量及缩短计算时间,是非常值得探讨的问题。另外,如何利用并行算法计算 CNOP,进而确定敏感性区域,也是应该研究的方向。该文的工作虽然是初步的,但是结果提供的信息是令人鼓舞的,使我们更有理由相信探讨 CNOP 方法应用于适应性观测是一个重要的方向。我们期望该文能够引起有关专家的兴趣,推动有关目标观测领域的研究,为提高影响天气的预报技巧提供有效的方法与思路。

参考文献 (References)

- [1] Snyder C. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 953~961
- [2] Palmer T N, Gelaro R, Barkmeuer J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 633~653
- [3] Joly A, Keith A B, Pierre B, et al. Overview of the field phase of the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX) project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 131~163
- [4] Langland R H, Coauthors. The North Pacific Experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 1363~1384
- [5] Bishop C H, Toth Z. Using ensembles to identify observations likely to improve forecasts. Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 1996, 72~74
- [6] Langland R H, Rohaly G D. Adjoint-based targeting of observations for FASTEX cyclones. *Proc. Seventh Conf. on Mesoscale Processes*, Reading, United Kingdom, Amer. Meteor. Soc., 1996, 369~371
- [7] Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. Sensitivity of forecast errors to initial conditions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 121~150
- [8] Aberson S D. Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1613~1628
- [9] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 1748~1765
- [10] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretic-

- cal aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 420~436
- [11] Thomas M H, Snyder C. Using improved background-error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 1552~1572
- [12] Bergot T, Hello G, Alain J, et al. Adaptive observations: A feasibility study. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 743~765
- [13] Cardinali C, Buizza R. Forecast skill of targeted observations: A singular-vector-based diagnostic. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1927~1940
- [14] Hyun M K, Michael C M, Rebecca E M. Evolution of analysis error and adjoint-based sensitivities: Implications for adaptive observations. *J. Atmos. Sci.*, 2004, **61**: 795~812
- [15] Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, **134**: 2354~2372
- [16] 董佩明, 张昕. 目标观测设计与伴随敏感性分析. *气象科技*, 2004, **32** (1): 1~5
Dong Peiming, Zhang Xin. Targeted observations and adjoint sensitivity analysis. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2004, **32** (1): 1~5
- [17] 董佩明, 钟科, 赵思雄. 区域初始分析误差对梅雨锋中尺度低压数值预报的影响. *气候与环境研究*, 2006, **11**: 565~581
Dong Peiming, Zhong Ke, Zhao Sixiong. Impact of regional uncertainties of the initial state upon numerical forecast of mesoscale low on Meiyu front. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**: 565~581
- [18] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, **10**: 493~501
- [19] Mu M, Zhang Z Y. Conditional nonlinear optimal perturbations of a two-dimensional quasigeostrophic model. *J. Atmos. Sci.*, 2006, **63**: 1587~1604
- [20] Duan W S, Mu M, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbations as the optimal precursors for El Niño-Southern Oscillation events. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D23105, doi: 10.1029/2004JD004756
- [21] Mu M, Xu H, Duan W S. A kind of initial errors related to “spring predictability barrier” for El Niño events in Zebiak-Cane model. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L03709, doi: 10.1029/2006GL027412
- [22] Mu M, Sun L, Henk D A. The sensitivity and stability of the ocean’s thermocline circulation to finite amplitude freshwater perturbations. *J. Phys. Oceanogr.*, 2004, **34**: 2305~2315
- [23] Sun L, Mu M, Sun D J, et al. Passive mechanism of decadal variation of thermohaline circulation. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: C07025, doi: 10.1029/2005JC002897
- [24] 段晚锁, 穆穆. 用非线性最优化方法研究 El Niño 可预报性的进展与前瞻. *大气科学*, 2006, **30**: 759~766
Duan Wansuo, Mu Mu. Advance and prospect of the studies of El Niño predictability by nonlinear optimization method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 759~766
- [25] Buizza R, Palmer T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 1434~1456
- [26] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1493~1513
- [27] Zou X, Vandenbergh F, Pondeva M, et al. Introduction to adjoint techniques and the MM5 adjoint modeling system. NCAR Technical Note, NCAR/TN2435 + STR, 1997, 117pp
- [28] Birgin E G, Martinez J E, Marcos R. Algorithm 813: SPG—software for convex-constrained optimization. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2001, **27**: 340~349
- [29] Golub G, Van L C. *Matrix Computations*. 3rd ed. London: The Johns Hopkins University Press, 1996
- [30] Wu C C, Chen J H, Lin P H, et al. Targeted observations of tropical cyclone movement based on the adjoint-driven sensitivity steering vector. *J. Atmos. Sci.*, 2007, **64**: 2611~2626