

文章编号: 1000-2022(2002) 05-0603-08

中尺度数值模式 MM5 的四维变分资料同化系统

王栋梁, 沈桐立, 田洪军

(南京气象学院 气象灾害和环境变化重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要: 应用伴随方法求解以数值预报方程作为约束条件的四维变分资料同化方案, 关键问题是如何构造伴随模式。以中尺度数值模式 MM5 为例, 讨论了如何用伴随码技术建立 MM5 伴随模式, 以及伴随模式系统中权重、尺度因子的选取; 最后对 MM5 伴随模式系统进行了梯度检验, 并利用实际资料进行四维变分资料同化试验。试验表明该系统有较强的同化能力, 能够提高 MM5 降水预报的准确性。

关键词: 中尺度模式 MM5; 四维变分资料同化; 伴随模式系统; 伴随码

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A

近年来, 高性能计算机的出现导致了包含更精细次网格物理过程和参数化方案的高分辨率数值模式的发展(如非静力中尺度模式 MM5); 而探测手段的进步使得获得的非常规资料(如卫星云图, 雷达回波等)能够提供较为准确的时空上准连续分布的气象场演变信息。数值预报模式精度的提高和各种非常规资料的出现, 迫切需要发展新一代四维变分资料同化技术, 而早期的同化方法已远远不能满足现在的需要。

应用变分方法, 鉴于数值模式的复杂性和目前的计算条件, 直接求解约束关系的控制方程(欧拉方程)存在巨大困难。近年来采用的伴随方法(Adjoint Method)并不直接求解欧拉方程, 而是根据工程数学中偏微分方程的最优化和最优控制理论^[1], 利用目标函数关于初始场的梯度信息来降低目标函数的值。变分方法在气象上的应用归功于 Sasaki^[2-3], 他使得这种方法在数值预报领域得以推广。LeDimet 等^[4]基于最优控制论, 第一次详尽阐述了伴随方法。随后 Talagrand 等^[5]和 Courtier 等^[6]进一步的研究工作使得伴随方法在资料同化工作中得以广泛应用。为数值预报模式提供最优初始场是伴随方法在气象上的一类主要应用。Thépaut 等^[7]利用多层的原始方程模式, Navon 等^[8]利用绝热的 NMC 谱模式分别进行伴随同化方法的试验研究。Chao 等^[9]在 GLA 的 GCM 模式上发展了伴随模式同化系统, 试验表明它能极大地减少 Spin-Up 问题。Dusanka 等^[10]进行可降水量的资料同化试验, 发现能够提高降水预报能力。

湿物理过程在模拟各种大尺度和中尺度现象时起着非常重要的作用。因为如果仅用一个绝热的或简化物理过程的数值模式来做实际资料的同化, 由于预报模式本身的缺陷会使得模式解与实际观测的差距很大。因此发展和试验包括各种物理参数化方案的四维变分资料同化

收稿日期: 2002-01-11; 改回日期: 2002-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 40075023; 国家自然科学基金项目 40175007; 国家重点基础研究项目 G1998040910

第一作者简介: 王栋梁(1977-), 女, 安徽合肥人, 硕士。

系统成为当前一个重要课题。

本文首先介绍了变分资料同化方法中的伴随方法,然后讨论了如何用伴随码方法构造中尺度数值模式 MM5 的伴随模式系统,以及在设计伴随模式系统过程中的检验和权重、尺度因子等问题,最后应用实际资料对 MM5 伴随模式系统进行梯度检验和四维变分资料同化试验。

1 变分资料同化方法中的伴随方法

伴随方法是在传统的变分方法基础上发展起来的新一代四维资料同化方法,它基于最优控制论原理,同时考虑动力约束和不同时刻的观测资料(包括模式变量和非模式变量)。其原理为:用模式预报值与观测资料的差值构造目标函数,利用预报方程的伴随方程和适当的下降算法,调整模式的控制变量,包括状态变量(模式方程中的变量)和模式参数(如太阳辐射、次网格的湍流等物理过程中的参数),使得目标函数值达到最小,从而得到最优初始场或最优模式参数。

假设模式参数给定,即认为预报模式是准确的,而初始场 X_0 是未知的,本文所做的就是利用大量时空准连续的观测资料来确定 X_0 。构造如下的目标函数

$$J(X) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \{ (G_i(X_i) - U_i)^T W_i (G_i(X_i) - \hat{U}_i) \}. \quad (1)$$

$X_i = X(X_0, t_i)$ 是 t_i 时刻模式格点上的输出值。 $G_i(X_i)$ 表示用 X_i 来计算测站上的观测值, G_i 为插值或转换算子。 W_i 为权重系数,与观测值 $\hat{U}_i$ 的误差大小有关。目标函数 $J(X)$ 是反映状态变量 X 的模式输出值与观测值拟合程度好坏的函数。我们的目的是寻找一个最优的初始场 X_0 , 使得状态变量 X 在满足模式预报方程的同时,目标函数 $J(X)$ 达到最小。

以上有约束的泛函求极值问题可以转化成无约束最小化问题,用最优控制算法来求解,具体步骤如下^[11]:

- (1) 常规观测资料提供数值预报模式方程的初始场 $X_0^{(0)}$, 令 $k=0$;
- (2) 沿时间轴正向积分,直到预定的同化区间,并存储每一步的模式解;
- (3) 计算目标函数的值,以及目标函数关于初始场的梯度 $\nabla J(X_0^{(k)})$;
- (4) 检查目标函数的梯度值是否满足收敛标准,如果满足,这时的 $X_0^{(k)}$ 即为所求的最优初始场;否则,执行下一步;

(5) 利用单维搜索法确定目标函数下降的最优步长 $\rho^{(k)}$, 选择适当的下降算法(如最速下降法、共轭梯度法、拟牛顿法等),根据梯度信息 $\nabla J(X_0^{(k)})$, 计算得到新的初始场 $X_0^{(k+1)}$, 令 $k=k+1$, 转回执行步骤(2)。

在上述最小化过程中,每一步迭代寻找下降方向和最优步长时都需要目标函数 J 和目标函数关于初始场的梯度 $\nabla J(X_0)$ 的值。 J 的值可通过向前积分预报模式来求,而梯度值则可以通过加上适当的强迫项并向后积分伴随模式求出。因此,处理包含‘开关’变量的四维变分资料同化问题的关键在于伴随方法能否为寻找下降方向提供足够的信息。

2 伴随模式系统的设计和检验

2.1 MM5 伴随模式

离散的 MM5 模式可以表示成如下形式的泛函

$$X(t_r) = Q_r(X_r) Z. \quad (2)$$

这里, Z 代表模式的输入场(包括初始条件与边界条件), 算子 Q_r 表示一系列矩阵的乘积

$$Q_r = Q_1(X_{r1}) Q_2(X_{r2}) \dots Q_m(X_{rn})。 \quad (3)$$

这里矩阵 $Q_{ri}(i=1, 2, \dots, n)$ 可以代表一个简单的 DO 循环语句、一个子程序或几个子程序的集合。那么, 相应的切向线性模式的程序码表示为如下泛函

$$X(t_r) = P_r(X_r) Z'。 \quad (4)$$

这里的 $P_r = \partial Q / \partial X$, 它通过对预报模式的程序码逐行线性化, 再按一定的顺序组合而得。相似地, P_r 表示如下矩阵相乘

$$P_r = P_{r1}(X_{r1}) P_{r2}(X_{r2}) \dots P_{rn}(X_{rn})。 \quad (5)$$

$P_{ri}(i=1, 2, \dots, n)$ 为相应向前码 Q_{ri} 的切向线性程序码。由切线码可以推出如下的伴随码

$$Z^* = P_r^*(X_r) X^*(t_r)。 \quad (6)$$

根据泛函理论, 伴随算子 P_r^* 就是切线算子 P_r 的转置, 即

$$P_r^* = P_{rn}^T(X_{rn}) P_{rn-1}^T(X_{rn-1}) \dots P_{r1}^T(X_{r1})。 \quad (7)$$

因此, MM5 伴随模式可直接由预报模式推出, 这样就可以不必去推导复杂的预报方程的共轭方程, 同时, 对于许多物理过程的处理也变得简单, 从而避免了伴随模式与预报模式的不协调性。

对于一个不含“开关”变量的非线性模式, 在基态处对其线性化无须任何近似, 除非由于纯计算原因需要某些改动。如 $y = x^{1/2}, x \geq 0$, 则在切向线性模式中要写成 $y \approx x / (2x^{1/2}) + \epsilon, x \geq 0$, 其中 ϵ 为机器精度范围内等于 0 的小量。而对于一个包含“开关”变量(与状态变量有关)的 MM5 模式, 本文在构造它的伴随模式时, 采用的方法是假设初始场上的小扰动不会改变“开关”发生的时间和位置, 从而在线性化时保持“开关”变量与非线性模式中一样。

2.2 利用伴随模式的梯度计算

如前所述, (1) 式定义的目标函数 J 关于初始场的梯度可以通过预报模式的伴随模式来求。目标函数的梯度可以表示成

$$\nabla J(X(t_0)) = \sum_{i=0}^n X_i^*(t_0)。 \quad (8)$$

其中的共轭量 $X_i^*(t_0)(i=0, 1, \dots, n)$ 通过向后积分伴随模式所得

$$X_i^*(t_0) = P_i^T W(t_i(G(X(t_i)) - \hat{U}(t_i)))。 \quad (9)$$

但方程(8)、(9)是在假设切向线性模式是非线性扰动的一阶近似的基础上获得的^[5]。由于目标函数的梯度在“开关”点不连续, 所以为了使上述两式对于包含“开关”变量的模式仍然成立, 需要一个更为广义的导数概念。1981年, Cacuci 针对一类离散的非线性系统提出所谓的“伴随敏感性”理论, 指出只要描述物理问题的非线性算子(如模式方程、侧边界条件、目标函数)的 G-微分存在, 则可以在严格意义上推导其伴随过程。当模式包含由湿物理过程引进的“开关”变量时, 其 G-微分存在^[12], 所以伴随方法仍然适用。

2.3 伴随模式系统的检验

一个伴随模式系统通常包括一个数值预报模式、一个伴随模式、一个计算最优步长、调整初始场的控制模式以及一些接口模块。

因为建立伴随模式的工作相当复杂, 如果其中某一环节出错, 就会导致整个系统的崩溃, 所以在编制伴随模式的过程中要进行检验。

构造伴随模式首先必须建立切向线性模式(TLM)。根据泰勒展开, 如果切向线性模式正确, 应有下列等式成立

$$\psi(\alpha) = \frac{Q_r(Z + \alpha Z)_i - Q_r(Z)_i}{\alpha P_r(Z)} = 1 + O(\alpha). \quad (10)$$

这里, Q_r 可以是整个程序码或一个子程序甚至一个 DO 循环语句, P_r 也相应如此。 Z 代表预报模式的输入量, αZ 为初始扰动量。 i 代表向量的第 i 个变量。

在切向线性模式正确的前提下, 对于伴随模式, 可用下面的式子来检验它的正确性

$$(P_r Z)^T (P_r Z) = Z^T (P_r^T (P_r Z)). \quad (11)$$

这里 Z 为切向线性模式的输入量, $P_r Z$ 为输出量。将 $P_r Z$ 当成输入量代入伴随模式, 得到输出量 $P_r^T (P_r Z)$ 。检查(11)式左、右两端是否相等, 如果近似相等, 则伴随模式正确。

建立伴随模式主要是为了计算目标函数关于初始场的梯度, 因此, 对于整个伴随模式系统, 还应进行梯度检验。根据泰勒展开, 可以用下式对其进行检验

$$\psi(\alpha) = \frac{J(Z + \alpha \nabla J) - J(Z)}{\alpha \nabla J, \nabla J} = 1 + O(\alpha). \quad (12)$$

3 MM5 伴随模式同化系统

3.1 MM5 伴随模式

本文的 MM5 模式较为简单, 包括非静力模式、Anthes-Kuo 积云参数化方案、总体行星边界层方案、隐式的水汽处理方案、水平垂直扩散、地面摩擦和松弛边界条件等物理过程。为了达到严格意义上的可逆, MM5 伴随模式与 MM5 向前模式有一致的物理方案。

3.2 权重和尺度因子

不同的观测资料有不同的物理属性、不同的表现形式, 因此需要在目标函数中加入权重系数, 使得目标函数值成为一个无量纲量。权重系数的取值既可以通过统计得到, 也可以直接由观测资料本身获得。本文的 MM5 伴随模式系统采用如下的公式计算权重^[13]

$$W_F = \frac{1}{\max_{i,j,k} |F_{i,j,k}^{\text{obs}}(t_0) - F_{i,j,k}^{\text{ds}}(t_n)|^{2\sigma}} \quad (13)$$

F 代表同化的物理量, 如风速 u 和 v 、温度 T 、比湿 q 和气压 p 等。 t_0 、 t_n 代表相邻两次观测时刻。

在建立伴随模式系统过程中, 还需要注意尺度因子的选取。关于这方面, Navon 等^[14]和 Courtier 等^[15]作了较全面的探讨。气象上不同物理量的量纲有很大的差异, 而且即使对于同一变量, 所在的垂直层次不同, 它们的量级范围也存在很大的变化。在计算目标函数梯度和下降方向时, 为了使系统具有一个判别“大小”的标准, 所有的变量都要有统一的属性。因此在对初始场迭代更新的过程中, 尺度因子的选取对于无约束最优化问题的求解非常重要。尺度化过程的一般形式为

$$X^s = SX; \quad (\nabla J)^s = S \nabla J.$$

X 为状态变量, ∇J 为目标函数梯度值, 下标“s”表示尺度化后的量。

尺度因子的选取没有一个统一的规则。参照 Navon 等^[13]的做法, 本文的 MM5 伴随模式系统用如下的公式计算尺度因子

$$S_F = \frac{1}{2} \max_{i,j,k} |F_{i,j,k}^{\text{obs}}(t_0) - F_{i,j,k}^{\text{ds}}(t_n)|. \quad (14)$$

同样, F 代表同化的物理量; t_0 、 t_n 代表相邻两次观测时刻。

4 四维同化试验

选取 1998 年 6 月 21 日 00 时(世界时)作为模式初始时刻, 将 06 时风、温度、比湿和气压

的分析场作为“观测”资料, 模式格距取 45 km, 水平格点 61×61 , 垂直方向 σ 为平均 10 层, 同化窗口为 6 h (00—06 时)。

先对 MM5 伴随模式系统进行梯度检验。将 1998 年 6 月 21 日 00 时的 T106 分析场作为初估场代入 MM5 预报模式 (即伴随系统中的向前模式), 积分 6 h, 得到目标函数 $J(X_0)$ 。然后反向积分伴随模式至初始时刻, 获得目标函数关于初始场的梯度值 $\nabla J(X_0)$ 。接下来, 在初始场上叠加扰动场 $\alpha \nabla J(X_0)$, 再代入预报模式, 积分 6 h 后就会得到 $J(X_0 + \alpha \nabla J(X_0))$ 。如果伴随模式系统正确, (12) 式应该成立。

图 1 显示的是 $\Psi(\alpha)$ 随 $\lg \alpha$ 的变化情况。从图上可以看到, α 取值较大时, 相对初始场的扰动场 $\alpha \nabla J(X_0)$ 也较大, $\Psi(\alpha)$ 的值离 1 较远; 随着 α 逐渐变小, 相应的 $\Psi(\alpha)$ 值就越来越接近于 1。这说明所建立的 MM5 伴随模式系统在计算目标函数梯度方面是切实有效的。

从图 1 还可以看到, 当 α 小到一定程度后, $\Psi(\alpha)$ 的值就会出现起伏, 这主要是因为受到计算机截断误差的影响。由于受计算机的精度限制, 当 α 取值超过一定范围时, 计算结果就会出现误差。另外, 还需要指出的是: 因为构造伴随模式是由切向线性模式入手的, 而从预报模式推导切向线性模式时, 本身就是一种近似, 略去了高阶小量, 所以反向积分得到的梯度值也是一种近似。

在下面的第一个试验中, 仅对比湿 q 进行同化。目标函数定义为

$$J(X_0) = (q_{6h} - q_{6h}^{obs})^2. \tag{15}$$

很显然, 这是一种简化的情况, 因为观测值个数远少于控制变量的个数, 所以最小化过程很容易收敛。图 2、图 3 分别给出了标准化的目标函数 J_K/J_0 和目标函数梯度的范数 $\nabla J_K / \nabla J_0$ 关于迭代步数的变化情况。

从图上可以看到: 迭代 10 步后, 目标函数就下降了 1 阶半, 达到最小值; 而目标函数梯度在迭代 30 步后下降了将近 2 阶半。这说明 MM5 伴随模式计算的目标函数梯度足以为最小化过程提供下降方向。

第二个试验中同化的物理量不仅包括比湿, 还有风、温度和气压。目标函数定义为

$$J(X_0) = \sum_{t_r}^2 \{ W_u (u(t_r) - u_{obs}(t_r))^2 + W_v (v(t_r) - v_{obs}(t_r))^2 + W_T (T(t_r) - T_{obs}(t_r))^2 + W_q (q(t_r) - q_{obs}(t_r))^2 + W_p (p(t_r) - p_{obs}(t_r))^2 \}. \tag{16}$$

注意我们面临的是这样一种情况: 没有观测误差统计, 一个只包括简单物理过程的伴随模式, 相当粗的水平 (45 km) 和垂直 (10 层) 分辨率。图 4 给出的是 1998 年 6 月 22 日 00 时 (世界时) 观测的 24 h 降水量分布。图 5 是 MM5 预报的该时刻的 24 h 降水量分布。图 6 是用迭代 30 步后得到的最优初始场预报的 24 h 降水量。

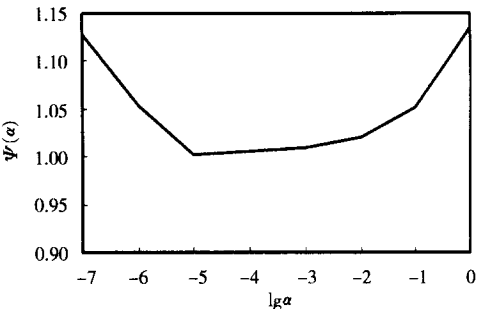


图 1 $\Psi(\alpha)$ 随 $\lg \alpha$ 的变化情况
Fig. 1 Variation of $\Psi(\alpha)$ with respect to $\lg \alpha$

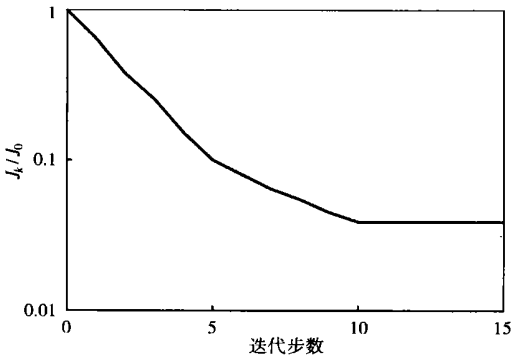


图 2 标准化的目标函数 J_K/J_0 关于迭代步数的变化

Fig. 2 Variation of the normalized objective function J_K/J_0 with the number of iterations

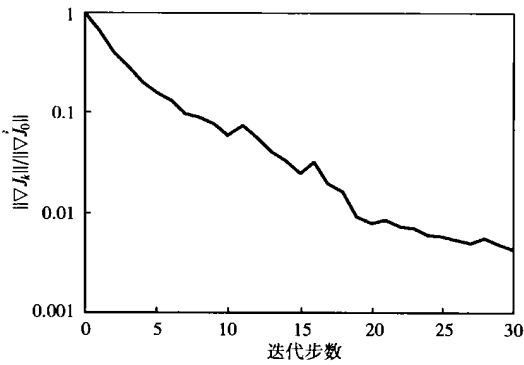


图 3 标准化的目标函数梯度的范数 $\nabla J_K / \nabla J_0$ 关于迭代步数的变化

Fig. 3 Variation of the normalized objective function norm of gradient $\nabla J_K / \nabla J_0$ with the number of iterations

与实际观测的降水量分布(图 4)相比,同化后的降水预报更接近实况。同化前,华北地区预报的降水中心最大值只有十几 mm,且位置偏北;同化后,无论是对降水量还是位置的预报都有明显提高,中心最大值达到 60 多 mm。华东地区的降水预报在同化前有较明显的夸大,中心值超过 150 mm,且位置偏东;同化后可以发现这种夸大现象相应有所改善。从图上还发现两广和湘南交界附近的降水中心同化前没有预报出来,而同化后预报的位置较好,但中心值偏大。对于川西附近的降水预报,同化前降水区域偏小,同化后偏大,且中心值都偏大。通过以上分析,认为初步应用常规资料,对风、温度、气压和比湿进行同化的 MM5 伴随模式系统能有效地改进初始场质量,降水预报能力有一定程度的提高。

5 结论和讨论

本文介绍了变分资料同化方法中的伴随技术以及构造伴随模式的基本方法——伴随码方法;并将伴随码方法应用于包括湿物理过程的非静力中尺度模式 MM5,开发了相应的伴随模式;在设计伴随模式时,对一些细节问题(如权重、尺度因子)作了探讨和研究;然后用实际资料对伴随模式系统的正确性进行了检验和四维资料同化试验。通过分析和试验,得到如下的结论:

(1) 伴随码技术为我们编制伴随模式提供了一种较简洁而有效的方法,推导的伴随模式实现了真正意义上的可逆,保证了伴随模式与预报模式的协调性。

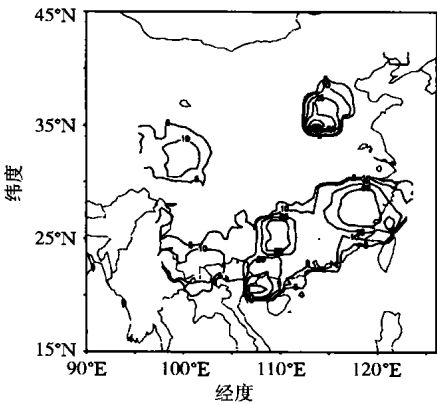


图 4 1998 年 6 月 22 日 00 时观测的 24 h 降水量分布(单位: mm)

Fig. 4 The distribution of 24-hr rainfall observed at 00U T, 22 June 1998 (units:mm)

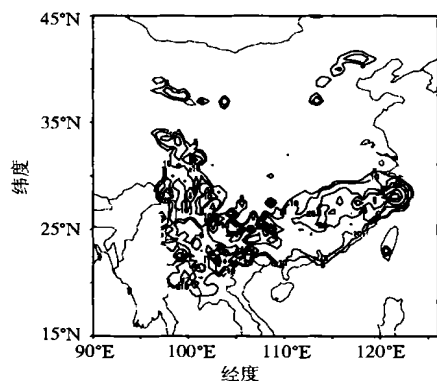


图 5 同化前预报的 1998 年 6 月 22 日 00 时
24 h 降水量分布(单位:mm)

Fig. 5 The distribution of 24-hr rainfall
predicted before assimilation
at 00UT, 22 June 1998 (units:mm)

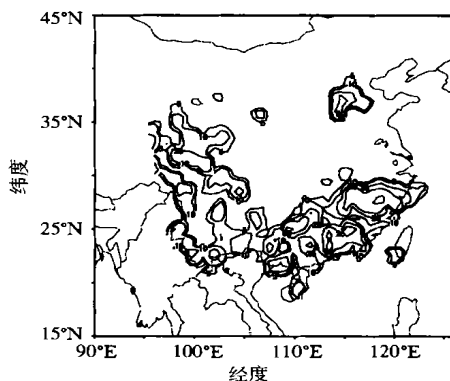


图 6 同化后预报的 1998 年 6 月 22 日 00 时
24 h 降水量分布(单位:mm)

Fig. 6 The distribution of 24-hr rainfall
predicted after assimilation
at 00UT, 22 June 1998(units:mm)

(2) 应用伴随码技术编制伴随模式是一个复杂而又繁琐的工作, 因此, 对建立伴随模式系统的每一个步骤, 都要执行严格的检验, 以保证伴随模式系统的正确。

(3) 在建立伴随模式系统的过程中, 必须注意权重和尺度因子等问题的处理; 但是, 怎样才能更好的确定这些因子, 还有待于进一步的研究。

(4) 在线性化时保持“开关”变量与非线性模式中一样, 采用这样的方法处理湿物理过程, 所构造的伴随模式能够为最小化过程提供所需的下降方向; 将风、温度、气压和比湿结合起来进行同化, 对降水预报的能力有明显改善。

必须注意到: 伴随模式是通过切向线性模式“转置”得到, 而切向线性模式又是从预报模式线性扰动近似得来, 在此过程中丢弃了非线性扰动项。这样做是否会对最小化和预报产生影响, 如果有影响, 程度如何呢? 另外, 如何更好的将伴随码技术应用于非连续性算子, 例如湿物理过程中的“开关”问题, 迄今为止, 还没有一个统一而又有效的解决方法。这些问题仍有待于进一步试验研究。

参考文献:

- [1] 蔡宣三. 最优化与最优控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [2] Sasaki Y. A fundamental study of the numerical prediction based on the variational principle[J]. J Meteor Soc Japan, 1955, 33(3): 262-275.
- [3] Sasaki Y. An objective analysis based on the variational method[J]. J Meteor Soc Japan, 1958, 36(1): 77-88.
- [4] LeDimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects[J]. Tellus, 1986, 38(A2): 97-110.
- [5] Talagrand O, Courtier P. Variational assimilation of meteorological observation with the adjoint vorticity equation : Theory[J]. Q J R Meteorol Soc, 1987, 113(4): 1 311-1 328.
- [6] Courtier P, Talagrand O. Variational assimilation of meteorological observation with the adjoint vorticity equation : Numeric results[J]. Q J R Meteorol Soc, 1987, 113(4): 1 329-1 347.
- [7] Thepaut J N, Courtier P. Four dimensional variational assimilation using the adjoint of a multilevel equation model[J]. Q J R Meteorol Soc, 1991, 119(5): 1 225-1 254.

[8] Navon I M, Zou X, Derber J, et al. Variational data assimilation with an adiabatic version of the NMC spectral model [J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(7): 1 433-1 446.

[9] Winston C Chao, Chang Lang Ping. Development of a four-dimension variational analysis system using the adjoint method at GLA, Part : Dynamics[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(8): 1 661-1 673.

[10] Dusanka Zupanski, Fedor Mesinger. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data[J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(4): 1 112-1 127.

[11] 陈宝林. 最优化理论与基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.

[12] Zou X. Tangent linear and adjoint of "on-off" processes and their feasibility for use in four dimensional data assimilation[J]. Tellus, 1997, 49(A1): 3-31.

[13] Navon I M, Zou X, Derber J, et al. Variational data assimilation with an adiabatic version of the NMC spectral model [J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(7): 1 433-1 446.

[14] Navon I M, Villiers R D. Combined penalty multiplier optimization methods to enforce integral invariant conservation [J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(4): 1 228-1 243.

[15] Courtier P, Talagrand O. Variational assimilation of meteorological observations with the direct and adjoint shallow-water equations[J]. Tellus, 1990, 42(A5): 531-549.

The Four-Dimensional Variational Data Assimilation System of Mesoscale Numerical Model MM5

WANG Dong-liang, SHEN Tong-li, TIAN Hong-jun

(Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: The key problem of four-dimensional variational data assimilation method, which solves the constraining numerical predict equations through accompanied model, is how to establish an accompanied model. Taking the mesoscale numerical MM5 model for example, it is discussed how to set up MM5 accompanied model by making use of accompanied code technique and how to choose weighting and scaling factors in the accompanied model system. Furthermore, the conventional observations are done in the MM5 model system, and a four-dimensional variational data assimilation test is made based on observed data. The results show that this system has powerful assimilation capacity and is able to improve the accuracy of MM5 model rainfall forecast.

Key words: mesoscale numerical model MM5; four-dimensional variational data assimilation; accompanied model system; accompanied code