

GRAPES 非静力数值预报模式的 三维变分资料同化系统的发展^{* 1}

马旭林^{1,2} 庄照荣² 薛纪善² 陆维松¹

MA Xulin^{1,2} ZHUANG Zhaorong² XUE Jishan² LU Weisong¹

1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京, 210044

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2008-01-31 收稿, 2008-04-06 改回.

Ma Xulin, Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, Lu Weisong. 2009. Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(1):50–60

Abstract Based on the GRAPES 3-D variational data assimilation system (p3DVAR), which is defined on isobaric surfaces, a new system (m3DVAR) is reconstructed to match with the nonhydrostatic GRAPES model in order to reduce the errors caused by spatial interpolation and variables transformations, thus improving the quality of initial value for the operational weather prediction model. The analysis variables of the m3DVAR system are completely consistent with the predictands of the GRAPES model in terms of spatial staggering and physical definition. Because of vertical hybrid ordinate and nonhydrostatic conditions, a new scheme for solving dynamical constraint equations is designed for the m3DVAR data assimilation system. To deal with the difficulties in solving the nonlinear balance equation at sigma levels, dynamical balance constraints between mass and wind fields are reformulated, and an effective mathematical scheme is implemented to avoid complicated problems caused by the nonlinear equations under the terrain-following coordinates. Meanwhile, new observation operators are designed for routine observational data, and background error covariance is also calculated. Currently, the m3DVAR system is able to assimilate all the conventional observations data, such as sounding, surface and ship data, etc. The multivariate ideal experiments with single point observation are performed to test validity of the system. The results show that the m3DVAR data assimilation system is able to correctly describe the multivariate analysis and the relationship of physical constraints. The differences of innovation and analysis residual for π also show that the analysis error of the m3DVAR system is less than that of the p3DVAR system. The T_s scores of the 24-hour precipitation prediction in August 2006 indicate that the m3DVAR system has smaller errors of model initial values relative to the p3DVAR system. So, the m3DVAR system can improve the analysis quality and initial values for the GRAPES model.

Key words GRAPES, Nonhydrostatic model, Data assimilation, Numerical prediction

摘 要 为了减少分析变量与模式状态变量之间的插值误差,改善业务预报模式的初值质量,在 GRAPES 等压面三维变分资料同化系统的基础上,研究发展了针对 GRAPES 区域模式的非静力模式变量三维变分资料同化系统 (GRAPES m3DVAR)。该资料同化系统的垂直坐标及其分析变量的水平分布格式、垂直跳点方案与 GRAPES 预报模式保持完全一致。由于垂直坐标的变化和非静力关系, m3DVAR 分析系统中设计了求解动力学约束方程的新方案。通过有效的高精度数学方案,避免了地

^{*} 资助课题:国家自然科学基金(40518001、40675064),中国气象局数值预报模式创新基地课题“全球业务资料同化系统的关键技术”,国家科技支撑计划项目“灾害天气精细数值预报系统及短期气候集合预测研究”(2006BAC02800)。

作者简介:马旭林,主要从事资料同化研究。E-mail: xulinma@nuist.edu.cn

形追随坐标下平衡方程的非线性项造成的复杂计算,有效解决了非静力平衡条件下求解平衡方程中非线性项的切线性方程和伴随方程引起的困难。重新构造各种观测算子,并考虑了质量场和风场之间的平衡约束关系、背景误差协方差结构,实现对探空、地面资料、船舶报等常规观测的同化。理想单点试验和实际资料的多变量资料同化分析结果表明,非静力模式变量三维变分资料同化系统能够正确地描写多变量之间的相互作用以及物理约束关系,分析结果合理,能够有效减少原等压面三维变分资料同化系统的分析与模式变量之间需要相互插值、变换产生的误差,在一定程度上提高了分析场质量,对预报模式的初值具有一定改善。

关键词 GRAPES,非静力模式,资料同化,数值预报

中图法分类号 P40

1 引言

数值天气预报是数学物理中一个典型的初值问题,高质量的数值模式积分初值通常是根据初始时刻的气象观测资料通过资料同化方案形成(Xue, 2004)。因此,资料同化是数值预报系统的重要组成部分。它不仅将各种观测资料综合、转变为数值预报模式的积分初值,也提供了比单类观测资料更完整、更方便使用的大气实况的资料集,从而成为当前天气、气候动力诊断分析的重要基础。资料同化实质上是从模式提供的背景场出发,将观测资料与数值预报模式中大气演变过程以科学的方式融合,通过吸收各种观测资料得到更接近大气真实状态的过程。资料同化系统与模式的关系可以有两种选择:一类是同化方案独立于数值预报模式,此时同化方案原则上也可以应用于其他预报模式;另一类是分析方案专门为特定的预报模式而设计、发展并进行优化。前者的优势是通用性,一些主要为研究而发展的数值预报系统常采用这种方案,如 MM5(Barker, et al, 2004)、WRF(Skamarock, et al, 2005)等。但将分析结果应用于预报模式时必须进行附加的变量变换及坐标变换,由此还可能造成同化方案与模式所包含的物理约束不一致,引入额外的误差来源。因此各气象预报业务中心如 NCEP(Parrish, et al, 1992)、ECMWF(Courtier, et al, 1998)、法国与英国(Lorenc, et al, 2000)等的业务数值预报系统大多采用后一种做法。中国新一代数值预报系统 GRAPES 的三维变分资料同化方案^①的发展是与预报模式同步进行的,在开始阶段,由于数值预报模式本身尚未建立,自然采用了前一种做法,因此至今公布的 GRAPES-3DVAR 的各种版本都是在等压面

上进行的通用要素的分析(下面简称为等压面分析,以 p3DVAR 表示)。随着 GRAPES 数值分析预报系统整体的完成与业务化应用,消除上述误差以进一步提高模式初值的精度,成为必须解决的问题。此外,四维变分同化系统(4DVAR)的发展也需要减少模式与分析之间不必要的中间过程。为此我们将 p3DVAR 系统更新为完全与 GRAPES 数值预报模式一致的新三维变分资料同化系统(简称为模式面分析,简记为 m3DVAR),即在与模式完全一致的垂直坐标系下,通过三维变分同化系统直接得到模式预报变量。

为特定数值预报模式发展的资料同化方案主要体现在其状态变量与预报模式的预报变量,无论物理属性还是空间离散化方法都完全一致。由此,资料同化方案中的状态变量与最优化控制变量之间的变换、状态变量到观测量的变换(即通常所称的观测算子)、背景误差结构的表达以及物理变量之间的平衡约束都必须有相应的变化。对于静力平衡的数值预报模式,主要困难来源于地形追随坐标的引入导致上述变换复杂化;而对于非静力平衡模式,除此之外,模式预报变量与基本观测要素之间的不一致成为必须解决的新问题。即便对于通常的探空观测,其观测算子也不再只是简单的空间内插变换。GRAPES 预报模式是一个非静力平衡模式^②,因此针对该预报模式的三维变分系统的建立比一般静力平衡模式更为复杂。

GRAPES m3DVAR 与 p3DVAR 系统的主要区别在于动力平衡约束关系、背景误差结构以及观测算子等方面,而垂直坐标变换与水平交错网格的调整相对简单。因此,本文主要描写针对 GRAPES 非静力平衡预报模式的 m3DVAR 系统的设计方案与

① 薛纪善,庄世宇,朱国富等. 2001. GRAPES 3D-Var 资料同化系统的科学设计方案. 中国气象科学研究院气象数值预报研究中心。

② 陈德辉,薛纪善,沈学顺等. 2003. 新一代静力/非静力多尺度通用数值预报动力模式理论方案设计及试验.《中国气象数值预报系统创新研究》技术手册。

主要不同部分,并给出初步试验结果。

2 GRAPES 非静力预报模式概况与 m3DVAR 框架

非静力 GRAPES 数值预报模式是经纬度格点模式,垂直方向为地形追随高度坐标(Gal-Chen, et al,1975)。为了方便处理地形,将实际高度 z 转换为追随地形的标准化高度 $\hat{z} = Z_T \frac{z - Z_s}{Z_T - Z_s}$, 这里 Z_s 与 Z_T 分别为地形高度与模式大气顶高度。模式预报变量的离散化方案在水平方向采用 Arakawa-C 跳点方案 (Arakawa, et al, 1977), 垂直方向为 Charney-Phillips 交错方案(Charney, et al,1953), 预报变量是无量纲气压(Exner 函数) $\pi = (p/p_0)^{R/c_p}$ (其中 $p_0 = 1000$ hPa)、位温 θ 、三维风场分量 u, v, w 以及比湿 q 。定义 $\hat{w}$ 表示高度地形追随坐标下的垂直速度,则球面垂直速度变换为

$$\hat{w} = \frac{Z_T}{Z_T - Z_s} \left(w - \frac{Z_T - Z}{Z_T - Z_s} \left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial Z_s}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial Z_s}{\partial \varphi} \right) \right) \quad (1)$$

其中 w 为等压面坐标下的垂直速度, φ 与 λ 分别表示球面坐标的纬度与经度, a 为球面坐标下的地球半径。GRAPES 模式进一步引入一个温、压场水平均匀的静止参考大气,且服从静力平衡关系,模式状态变量均表示为相对这一参考大气的偏差量。

m3DVAR 系统的状态变量与模式预报变量完全相同,并定义在与数值预报模式完全一致的垂直坐标面与水平格点上,具体分布见图1、图2。由于

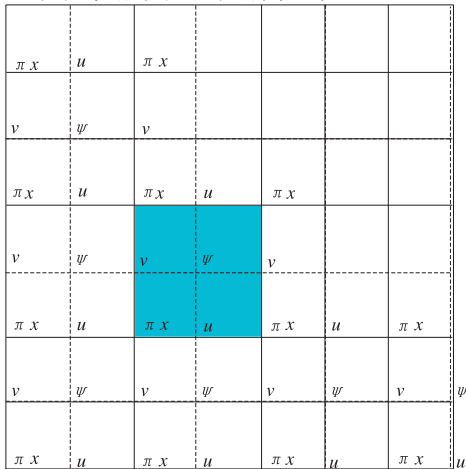


图1 GRAPES m3DVAR Arakawa-C 跳点格式变量水平分布

Fig. 1 Horizontal arrangement of the model variables in the m3DVAR system (Arakawa-C staggering)

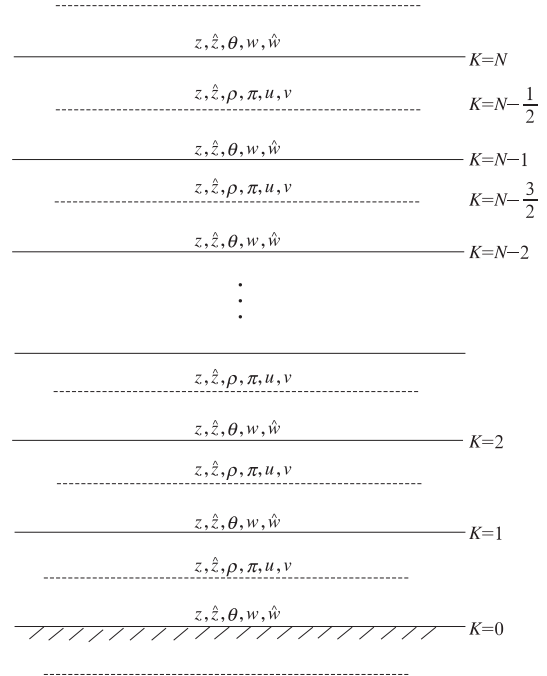


图2 GRAPES m3DVAR 垂直方向变量分布 (Charney-Phillips 垂直跳层方案; 实线为整数层,虚线为半整数层)

Fig. 2 Vertical arrangement of the model variables in the m3DVAR system (Charney-Phillips staggering scheme; Solid and dashed lines denote integral and half-integral levels, respectively)

变分同化中多数情况下状态变量表示为对背景场的偏差,模式变量表达的分析增量与其偏差量的分析增量是等价的,因此在分析方案中,并不像预报模式中那样使用相对参考大气的偏差量,这是由于变分同化对方程进行局地线性化时不能使用偏差量。由于模式变量之间彼此相关,为简化同化分析问题,与 p3DVAR 设计方案相似,通过变量的物理变换和平衡变换,采用彼此相互独立的变量如旋转风、非平衡的气压变量、非平衡的辐散风与比湿作为分析变量(张华等,2004)。将 u, v 用速度势 χ 与流函数 ψ 表示,即物理变换,并引入平衡算子 M, N, P, Q ,将状态变量都分别表示为平衡(以下标 b 表示)及不平衡(以下标 u 表示)两个部分,即

$$\phi = \phi_b \quad (2)$$

$$\chi = \chi_b + \chi_u = M(\phi) + \chi_u \quad (3)$$

$$\pi = \pi_b + \pi_u = N(\phi) + \pi_u \quad (4)$$

$$\theta = \theta_b + \theta_u = Q(\phi) + \theta_u \quad (5)$$

$$w = w_b + w_u = P(\psi) + w_u \quad (6)$$

$$q = q_b \quad (7)$$

其中式(2)–(7)中符号与前文定义一致。如果用 X 表示模式面分析系统中的状态变量 $(\psi, \chi, \pi, \theta, w, q)$, 而用 X_c 表示上述独立的分析变量 $(\psi, \chi_u, \pi_u, \theta_u, w_u, q)$, 则式(2)–(7)可以简记为

$$X = P(X_c)$$

关于平衡关系的具体形式,将在下一节详细讨论。对于新的变量 $\psi, \chi_u, \pi_u, \theta_u, w_u, q$, 假定其背景场误差互不相关,用它们作为变分资料同化的最优化控制变量,使问题得到简化。如用 B_u 表示背景误差相关矩阵,则 B_u 是一个分块对角矩阵,进一步将 B_u 分解为

$$B_u = UU^T \quad (8)$$

上标 T 表示矩阵转置,再以 U 作为预条件矩阵,将控制变量做进一步变换,三维变分同化成为以下目标函数的极小化问题:

$$J = \omega^T \omega + (\hat{H}\omega + d)^T R^{-1} (\hat{H}\omega + d) \quad (9)$$

这里 $\omega = U(X_c - X_{cb})$, 而 $\hat{H}(\omega) = H(P(U^{-1}\omega + X_{cb}))$ 是用 ω 表示的观测算子。方程(9)的推导与 p3DVAR 相似,其相关的最优化问题的求解方法也与 p3DVAR 基本一致,区别是变量的物理内涵与数值不同。下面将着重讨论由于变量物理性质的变化所需解决的新问题。湿度 q 为独立变量,除坐标变换外,仍采用 p3DVAR 系统的处理方案,下文不再讨论。

3 动力学约束的实现

动力平衡关系引入同化方案一方面有利于维持同化系统所产生的各个分析变量之间的协调,同时也优化了相关的最优化问题,因此已成为目前普遍采用的一种有效方法。但各个同化系统对平衡关系的定义多有不同,大体分为利用统计结果和 MM5 (Barker, et al, 2004)、WRF (Skamarock, et al, 2005) 等资料同化系统利用确定的动力学平衡条件两类,或者将它们结合在一起,如由动力学平衡方程确定变量间平衡关系的函数类型,再由统计结果确定其具体数量关系等。目前 GRAPES p3DVAR 采用第一种做法(庄荣照等, 2006), m3DVAR 系统也继续沿用这一做法。尽管 GRAPES 是非静力模式,但当前我们不考虑初始时刻的非静力平衡问题,因此模式变量 π 与 θ 中只有一个是独立的。目前分析方案

中选用前者作为同化系统的状态变量,而把 θ 作为 π 的导出量。将平衡关系定义为风、压场之间服从非线性平衡方程,由流函数通过平衡关系导出平衡的气压场。考虑风、压场之间的平衡关系在目前模式状态变量与垂直坐标下的表达,即需用地形追随高度坐标面上的模式变量 π 将平衡方程表达出来,为此要解决 z 坐标与等压面坐标的转换、 π 与位势高度 ϕ 的转换。如果将平衡方程直接转换为地形追随坐标内的表达式,涉及地形项,计算变得十分复杂,不易求解。为简化计算,又满足分析结果的精度要求,我们考虑了一个新的平衡方程求解方案:引入一组高垂直分辨率的辅助等压面,将地形追随高度坐标的模式面上的控制变量 ψ 通过高精度数学方案转换到与模式垂直分辨率相当的一组水平等压面上,并在这组等压面上求解平衡方程;然后将求得的结果再转换到分析空间的模式面上,这样简化了在模式地形追随垂直坐标内求解平衡方程的复杂性。以上思路具体表述如下:在静力平衡条件下可以采用气压作为垂直方向的自变量,而位势高度作为反映气压分布的预报量,此时非线性平衡方程为

$$\Phi_b = N(\psi) = \nabla^{-2} (\nabla \cdot (f \nabla \psi) - 2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}) \quad (10)$$

其中符号 N 为平衡算子, Φ_b 是位势高度的平衡部分。任何模式面网格点上的气压随高度的变化 $\pi(z)$ 定义了气压 p 与位势高度之间的依赖关系,再根据计算精度的要求,适当选取一组辅助等压面坐标值,能够建立 z 坐标与 p 坐标的对应关系,并可以实现变量之间的转化。以下标 p 表示等压面坐标内的变量,不带下标的表示倾斜的模式面上的变量,则平衡方程中变量转换关系可以表示为

$$\phi_p = P_\psi \psi \quad (11)$$

$$\psi = S_\psi \phi_p \quad (12)$$

$$\pi = S_\pi \phi_p \quad (13)$$

$$\phi_p = P_\pi \pi \quad (14)$$

其中 P_ψ 与 S_ψ 是针对流函数的由模式面到等压面与相反方向的变换算子(空间插值算子,这里为三次样条插值算子), P_π 与 S_π 是针对模式面上的无量纲气压 π 到等压面上的位势高度 ϕ_p 与相反方向的变换算子(包括空间插值算子和物理变换算子)。首先通

过方程(11)将预报模式高度坐标内的流函数转换到预先定义的一组等压面上,并在该等压面上求解方程(10),得到等压面上平衡的位势高度 ϕ_p 。然后通过垂直插值与模式面上的高度和无量纲气压的物理转换,得到模式面上的无量纲气压 π ,即方程(13)。在三次样条插值的过程中,变量由模式面向等压面变换时,模式面为数据节点,等压面为待插值点,此时高度是自变量,气压为因变量;相反方向变换时,等压面为数据节点,而模式面为待插值点,此时气压是自变量,而高度为因变量。气压与高度变换关系互为相反,但保持一一对应不变。

方程(13)中的 S_π 算子主要是利用空间插值算子把等压面的位势高度转换为模式面上的位势高度,然后利用模式面上位势高度和无量纲气压的关系,得到无量纲气压。沿用 p3DVAR 同化方案中使用的增量分析方法,主要包括如下几个部分:

(1) 利用三次样条插值算子把等压面的位势高度分析增量转换为模式面上的位势高度增量

$$\delta\phi = S_p \delta\phi_p \quad (15)$$

这里 S_p 是由等压面到模式面转化的三次样条插值算子,符号 δ 表示增量。

(2) 利用位势高度增量与气压增量的关系式,导出气压增量

$$\delta p = \frac{p_f}{R_d(T_v)_f} \delta\phi \quad (16)$$

其中 T_v 与 R_d 分别为虚温和干空气气体常数。为与平衡部分变量下标区别,式(16)中的变量用下标 f 表示为基本量,即初猜场或背景场(下同)。

(3) 利用气压和无量纲气压的关系式

$$\pi = (p/p_0)^{\frac{R_d}{c_p}} \quad (17)$$

考虑湿大气中虚温的作用,由气压增量得到无量纲气压 π 的平衡部分的增量为

$$\delta\pi_a = -\frac{\pi_f}{c_p} \frac{\delta\phi_a}{(T_v)_f} = -\frac{\delta\phi_a}{c_p(\theta_v)_f} \quad (18)$$

这里,下标 a 表示分析增量, T_v 和 θ_v 分别为虚温与虚位温, c_p 为干空气定压等容比热,其他为气象常用符号。综合以上表达式,气压的平衡部分为

$$\pi_b = S_\pi NP_\phi \psi \quad (19)$$

定义模式状态变量为 $\mathbf{x}_m = (\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{\Pi}, \mathbf{q})^T$, 分析变量为 $\mathbf{x} = (\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\chi}_u, \boldsymbol{\Pi}_u, \mathbf{q})^T$, 其中 $\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{\Pi}, \mathbf{q}$ 与 $\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\chi}_u, \boldsymbol{\Pi}_u, \mathbf{q}$ 均为向量,下标 m 与上标 T 分别表示模式变量与

矩阵转置,则方程(2)~(4)与(7)中的模式变量和分析变量之间可以通过转换算子 $\mathbf{K}_m$ 建立如下变换关系

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{K}_m \mathbf{x} \quad (20)$$

方程(20)的变换即为平衡变换, $\mathbf{K}_m$ 称为平衡算子。如果忽略速度势与流函数的联系,并将模式变量中的风场 u, v 转化为分析变量的流函数 ψ 与势函数 χ , 则模式面上的平衡变换矩阵 $\mathbf{K}_m$ 可表示为

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} -\partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 & 0 \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & 0 & 0 \\ S_\pi MP_\psi & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (21)$$

而对于位温 θ 有

$$\theta_f = P(\psi) = -\frac{g}{c_p} \frac{\partial \pi_f}{\partial z} \quad (22)$$

将 $\hat{w}$ 定义为单纯与地形相关的部分,即

$$\hat{w} = \frac{Z_T(Z_T - Z)}{(Z_T - Z_s)^2} \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \frac{\partial Z_s}{\partial \lambda} - \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} \frac{\partial Z_s}{\partial \varphi} \right) \quad (23)$$

目前,非静力预报模式一般依然是从静力平衡的初始状态开始向前积分,并将垂直速度 w 取为 0。因此实际实施时,由于以上的 π 与 θ 并不是完全独立的,在非静力模式变量资料同化系统中只保留变量 π , 位温 θ 由 π 导出,而 $\hat{w}$ 也根据方程(1)由 u, v 求得。

4 观测算子

观测算子给出了分析变量与观测要素之间的物理约束关系(Lorenc, 1986; Pailleux, 1990)。由于模式变量 $\mathbf{x}_m$ 定义在模式面上,而观测量通常定义在等压面上,而且某些观测要素和模式变量不一致。因此, m3DVAR 系统中各种观测算子和等压面同化系统中的观测算子不同,需重新考虑设计。将观测算子写为一般通用形式

$$H = H_p H_s \quad (24)$$

这里, H 为观测算子,其中 H_s 是空间内插算子,即由模式(控制)变量到观测站点的转换,包括水平与垂直方向的空间变换; H_p 为物理变换算子,即由模式(控制)变量到观测要素之间的变换(物理变换)。方程(24)中观测算子 H 包含一系列将模式状态变量变换为观测空间的观测相当量的算子。

4.1 空间变换算子 H_s

空间变换算子包括水平变换与垂直方向的空间

变换。从模式变量到观测变量的水平方向的变换采用双线性插值运算;垂直方向的变换采用较线性插值精度更高的三次样条插值方案,以确保计算精度。由于观测变量通常定义在等压面上,对于风场和湿度场,可以用观测资料的气压值作为垂直变换的插值点,模式的气压变量作为样条节点进行插值;另外也可以选择直接在观测变量中将观测要素转换为高度坐标的量,然后再进行插值计算。上述两种选择都可以进行试验,对比分析结果的影响。对于质量场,如前文所述,将气压视作为观测物理量,将高度作为垂直方向的观测定位坐标。因此在垂直变换中,观测变量中的位势高度为插值点,气压为插值函数,即根据高度值将气压从模式空间变换到观测空间。

4.2 物理变换算子 H_p

在 GRAPES 非静力模式面的变分同化分析系统中,模式的质量场为无量纲气压 π ,而常规观测中观测物理量则是气压或温度,二者并不一致。因此,需要通过观测算子(包括切线性与伴随过程)中的物理变换将不一致的观测量转换为可以直接进行计算的相同物理量。当观测要素为气压时,观测算子中的物理变换就将无量纲气压转换为气压,即

$$\pi = (p/p_0)^{R/c_p} \quad (25)$$

而切线性观测算子中的物理变换则为

$$\delta\pi = \pi_t \frac{R_d}{c_p} \frac{\delta p}{p_t} \quad (26)$$

如果观测要素为温度,则观测算子中的物理变换需要将无量纲气压 π 转换为温度

$$\frac{\partial\pi}{\partial z} = -\frac{g}{c_p\theta} \quad (27)$$

$$T = \pi \cdot \theta \quad (28)$$

其切线性观测算子中的物理变换为

$$\delta\theta = \frac{c_p(\theta_v)_t^2}{g} \cdot \left(\frac{\partial\delta\pi}{\partial z} \right) \quad (29)$$

$$\delta T = \theta_t \delta\pi + \pi_t \delta\theta \quad (30)$$

通过以上的物理变换,模式空间的状态变量就转换为与观测物理量相一致的变量,从而可以求解新息向量以及目标泛函的极小化计算。

通过观测算子的变换,GRAPES 非静力模式变分分析系统同化观测资料的能力与等压面分析系统一致,可以有效地直接同化常规资料以及卫星辐射率资料(表 1)。另外,为了更加有效地改善模式初始场中台风强度与位置的分析质量,当前版本中加

入了 Bogus 资料的同化处理模块,可直接同化 Bogus 产生的切向风、温度与湿度等资料。卫星辐射率的观测算子仍然采用 RTTOV 辐射传输模式,同样需将相关物理量定义在模式坐标进行计算。对于观测资料的观测误差,显然模式面同化系统与原等压面同化系统可以保持一致。非静力模式面资料同化系统的质量控制沿用原等压面同化系统中的方案,通常当观测值与其初估值之差(即新息向量)的绝对值大于观测误差一定倍数时则认为该观测为无效资料进行剔除。

表 1 GRAPES m3DVAR 同化的观测资料
Table 1 Observations assimilated by
the GRAPES m3DVAR system

观测类型	观测要素
探空报(TEMP)	u, v, T, H, RH
地面报(SYNOP)	u, v, T, H, RH
船舶报(SHIPS)	u, v, T, H, RH
航空报(AIREP)	u, v, T
云迹风(SATOB)	u, v
卫星资料(TOVS)	辐射率

5 背景误差协方差

背景误差协方差是目标泛函调整背景场作用的权重函数。在变分资料同化系统中,背景误差协方差通常是针对具体模式的预报误差统计值,并在具体应用中进行优化调整后计算得到(Ingleby, 2001; Wu, et al, 2002)。如果背景误差协方差准确,则分析结果就是大气真实状态的最大似然估计。显然,准确给出背景误差协方差结构在三维变分资料同化系统中具有非常重要的作用(Daley, 1991)。由于非静力模式面资料同化系统与等压面分析系统中的分析变量不完全一致,因此必须重新构造背景误差场结构以适应新分析系统的需要。模式面背景误差协方差结构可以有两种构造方式:第 1 种方式为先估计均匀、各向同性的等压面物理量的误差结构,然后通过坐标变换,将等压面物理量的背景误差转换为相应模式面上物理量的误差结构;第 2 种方式为采用 NMC 方法(Parrish, et al, 1992)直接统计模式面相应变量的误差结构,其最大的好处在于能够提供整个模式区域的多元相关,并且统计易于实现。这两种方法得到的误差结构在统计意义上基本一致,但从理论意义上看,在模式面上直接统计的背景误

差协方差结构能够更准确地描述预报误差的分布特征。目前 GRAPES-m3DVAR 系统是采用第一种统计方法得到背景误差,即首先估计等压面上的背景误差,再通过垂直坐标变换求解模式面相应物理量的背景误差。假定背景误差协方差矩阵可以分离为水平与垂直两个部分,对于水平部分,求出水平相关尺度,应用递归滤波实现背景误差的传播;垂直方向根据变换的模式面误差通过 EOF 分解求出垂直模的均方差与标准化的特征向量,然后共同构成背景误差协方差矩阵。基于第 2 种方法统计的误差结构将在进一步的工作中进行研究。另外,具有随天气形势变化特征基于集合预报扰动构造背景误差的方案 (Fisher, 2003),在 WRF (Skamarock, et al, 2005) 等数值预报试验中均取得了良好的效果,近几年得到了较多重视,这也是将要开展研究的工作内容之一。

6 试验结果分析

为检验非静力模式变量三维变分资料同化系统的正确性与分析效果,设计了单点理想试验与实际资料试验方案,并将实际资料分析结果与等压面分析系统相对比。试验采用区域三维变分资料同化系统与区域预报模式,分析与预报范围为 (5° — 65° N, 55° — 145° E),水平格点分辨率为 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$,垂直层次为 31 层。

6.1 单点观测理想试验

三维变分资料同化方案中,单变量分析可以准确反映观测对背景误差结构特征的响应以及背景误差与观测误差相对大小对分析结果的影响程度,而多变量分析可以考察变量间的物理约束关系及其分析增量在分布形态与结构上的特征。文中通过单个观测资料的单要素理想试验检验非静力模式变量三维变分资料同化系统的正确性,并考察背景误差协方差的性质。从等压面三维变分资料同化的理论公式 (Courtier, et al, 1998) 可知,对于单点理想试验,分析增量应该沿等压面按高斯形态分布传播,而且满足风压场约束关系,即风场分析增量和气压分析增量近似满足平衡关系。而对于 m3DVAR 系统,当取消地形时,模式坐标与等压面坐标平行。因此,单点观测分析增量的分布形态应与等压面相同。本文单点理想试验中,将单个观测资料放置在不地形

的第 15 模式层 (高度为 5383.13 m)、水平位置为 (30° N, 100° E),分别考察气压 p 、风场 u, v 的 3 个单点单要素资料同化分析增量沿模式面传播分布的性状与风压场之间的匹配关系。当观测为气压 p ,分析变量为无量纲气压 π 时 (图 3a₁—3a₃),分析增量 $\delta\pi$ 的分布是以观测点为圆心、向外逐步减小的正圆形分布,其中心量值也与解析解一致;通过平衡关系,纬向风增量 δu 量值呈纬向近对称、但风向相反分布的结构,而经向风增量 δv 符合经向风方向相反的对称结构,与理论分布状态完全一致;图 3b₁—3b₃、3c₁—3c₃ 分别给出了观测变量为纬向风 u 、经向风 v 而分析变量为 π 时的分析结果。如图所示,当观测变量为纬向风分量 u 与经向风分量 v 时,分析增量 $\delta\pi, \delta u$ 与 δv 的分布形态与量值也完全符合理论模型。多变量单点理想试验结果表明非静力模式变量三维变分资料同化系统 (m3DVAR) 的分析结果能够正确、合理的反映多变量之间相互作用关系。

6.2 多变量实际观测资料的同化分析

为分析 m3DVAR 与 p3DVAR 同化方案得到的模式初值的差异,二者分别同化 2006 年 8 月 14 日 00 时的探空资料,对两个分析场得到的模式初值进行比较。模式面分析的背景场为 GRAPES 模式 12 小时预报场,将该时刻的 GRAPES 模式预报场转化为等压面变量作为等压面分析的背景场,并确保二者质量控制后进入分析的有效探空资料完全一致。将等压面分析得到的分析场通过 GRAPES 模式的标准初始化系统 (黄丽萍等, 2005) 进行垂直坐标、水平跳点格式以及变量变换等产生模式初值,而模式面分析的分析场直接作为模式初值。图 4 给出了两种分析系统的分析场分别得到的模式初值中第 15 模式层的无量纲气压 π (图 4a, $\times 10^{-4}$) 与风场 u, v (图 4b、4c, 单位: m/s) 的偏差值。从图 4a 可以看出,在 105° E 以西、 35° N 以北的区域无量纲气压 π 的偏差量值较大,尤其在大地形的高原区域更为明显,而其他地形较低以及海上区域的偏差则相对较小,风场 u, v 在大地形处的偏差更为明显 (图 4a、4b)。由于 GRAPES-m3DVAR 系统的背景场能够直接从预报模式得到,分析场与数值模式变量的垂直、水平分布完全一致,可直接作为模式初值;而

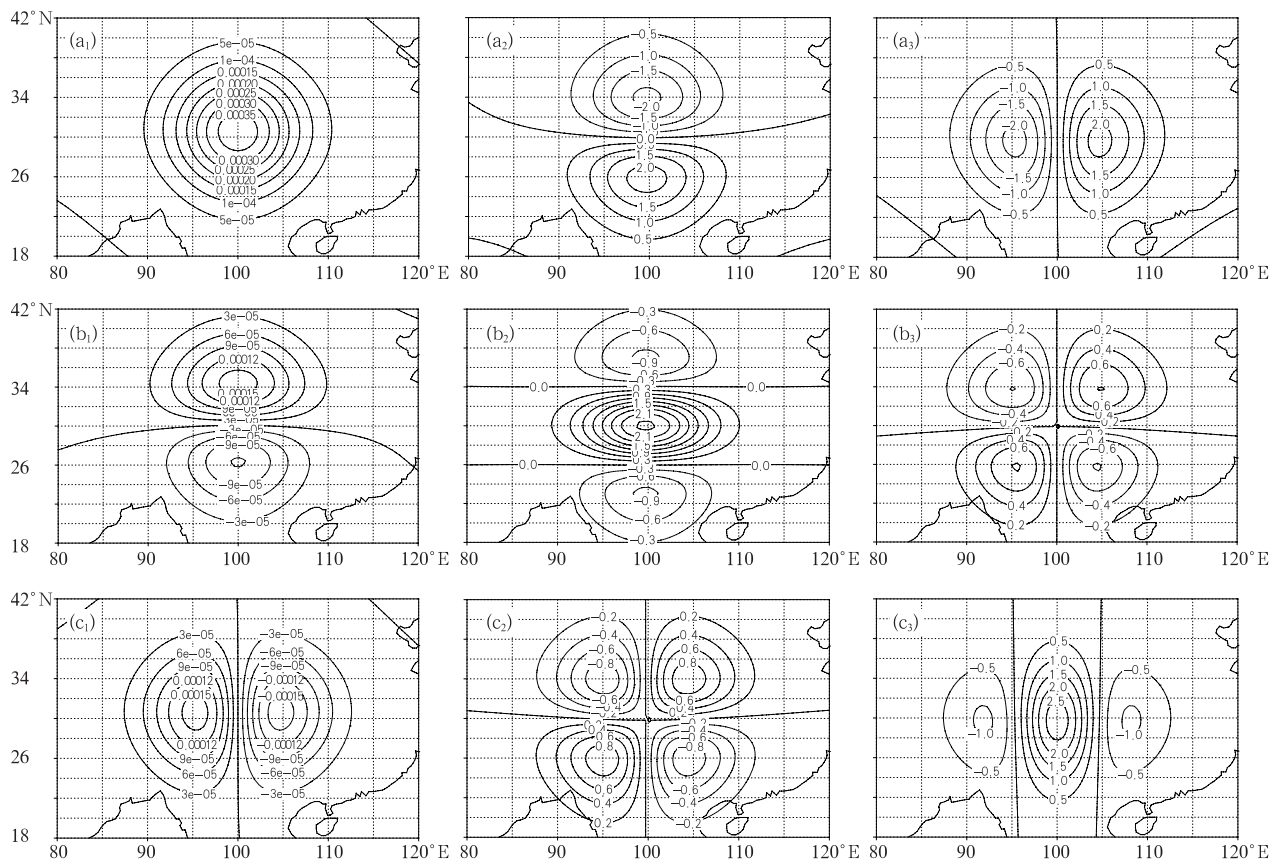


图3 m3DVAR 单点(30°N, 100°E)资料同化分析增量

($a_1 - a_3, b_1 - b_3$ 与 $c_1 - c_3$ 的观测变量分别为气压 p 、纬向风 u 与经向风 v ; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 与 a_3, b_3, c_3 的分析变量分别是无量纲气压 π 、纬向风 u 与经向风 v)

Fig. 3 Analysis increments of data at single point (30°N, 100°E) assimilated by the m3DVAR system

(Observational variables for $a_1 - a_3, b_1 - b_3$ and $c_1 - c_3$ are p, u and v , and for $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ and a_3, b_3, c_3 are π, u and v , respectively)

p3DVAR 系统需要将模式变量从模式坐标转化为等压面坐标得到背景场,再将等压面的分析场转化为模式坐标才能生成预报模式初值。此外,等压面分析还必须对不一致的预报变量与分析变量进行变量变换。显然,垂直插值以及变量变换会直接引起模式初值误差,同时也导致模式初值中风压场等物理量之间的不平衡程度增强,这将致使预报模式变量之间的协调时间延长,影响预报效果。平原地区插值误差相对较小,二者的模式初值基本一致,差别可以认为由内插引起,其差异量值大致与等压面分析插值到模式面后的初值误差相当,而模式面分析所计算的风、压场平衡比等压面更好。

为更直接考察两种分析方案的差异,对单个观测点上的新息向量(innovation)与分析余差做进一

步分析。在资料同化中,新息向量是观测与背景场的差,而分析余差为分析增量与观测值的偏差。在图 4a 偏差值较大的高原区域选取一个探空站进一步分析偏差产生的原因。图 5 给出了无量纲气压 π 在站号为 56046 的探空站的新息向量与分析余差的垂直分布,图中水平虚线为模式面层,点实线表示 m3DVAR,三角虚线表示 p3DVAR 系统。该观测站位于(33.75°N, 99.65°E)、海拔高度为 3969 m 的高原。由图 5a, m3DVAR 与 p3DVAR 系统在该探空资料的标准等压面层无量纲气压 π 的新息向量基本相当,而在 425、325 与 120 hPa 等特性层上,二者则差异明显, p3DVAR 的新息向量呈现出合理的阶梯状垂直廓线(图 5a)。由于观测资料的特性层与 p3DVAR 系统的分析等压面不一致,且垂直层数

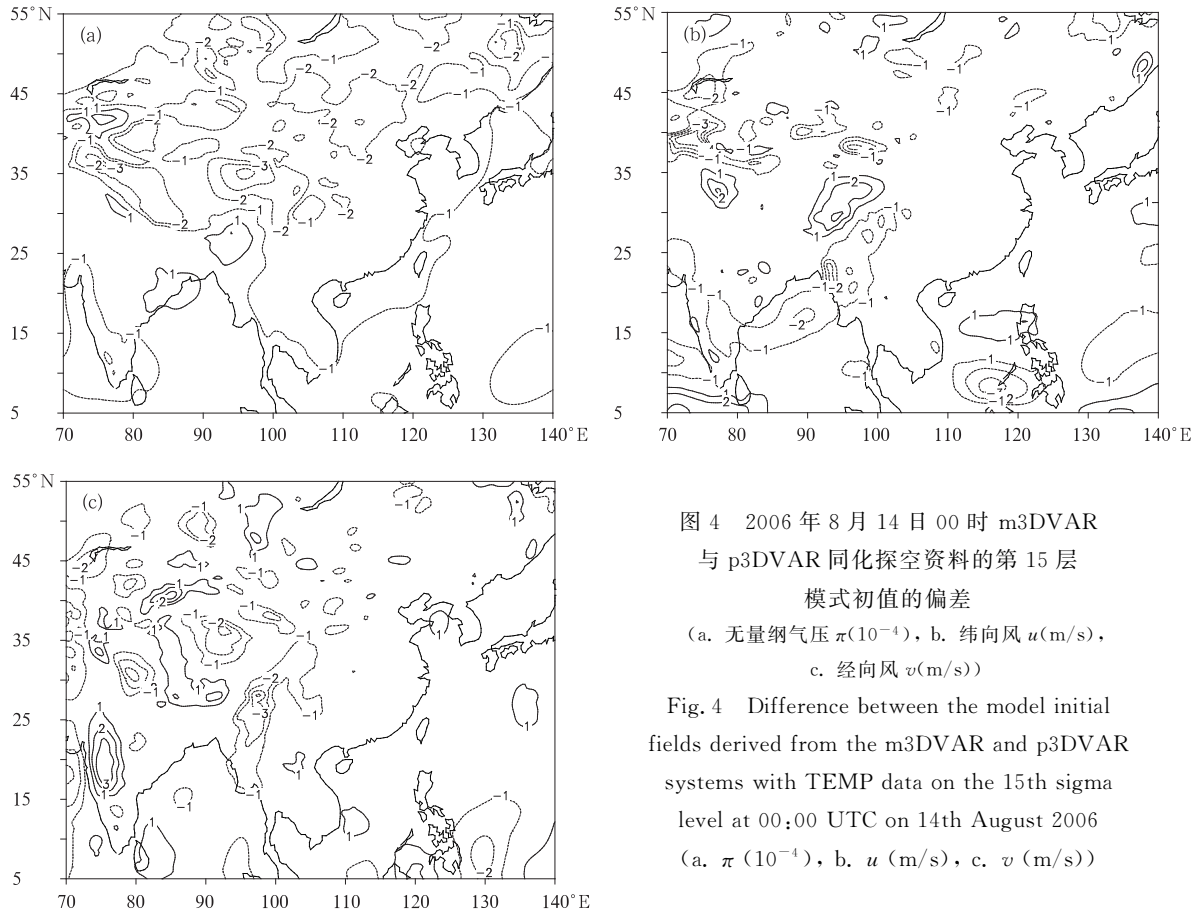


图4 2006年8月14日00时 m3DVAR
与 p3DVAR 同化探空资料的第15层
模式初值的偏差

(a. 无量纲气压 $\pi(10^{-4})$, b. 纬向风 $u(\text{m/s})$,
c. 经向风 $v(\text{m/s})$)

Fig. 4 Difference between the model initial
fields derived from the m3DVAR and p3DVAR
systems with TEMP data on the 15th sigma
level at 00:00 UTC on 14th August 2006
(a. $\pi(10^{-4})$, b. $u(\text{m/s})$, c. $v(\text{m/s})$)

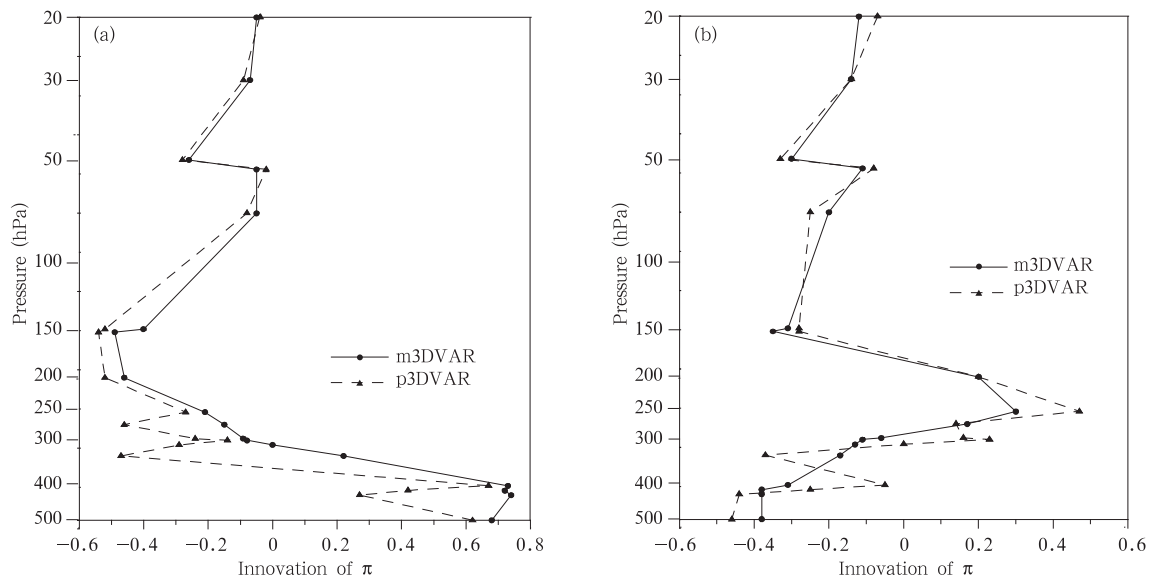


图5 56046 观测站上无量纲气压 π 的新息向量(a)与分析余差(b)的垂直分布
(水平虚线为模式垂直层, 圆点实线为 m3DVAR, 三角虚线为 p3DVAR)

Fig. 5 Vertical profiles of (a) innovation and (b) analysis residual for π at 56046 station
(Horizontal dashed line depicts model-level; solid line with dots denotes the m3DVAR system and
dashed line with triangles denotes the p3DVAR system)

相对模式层少,由背景场得到的特性层观测相当量误差较大,同时由于该背景场的垂直插值与物理量变换,导致 p3DVAR 系统的分析在观测资料特性层上出现不合理的新息向量值,也直接影响分析结果的合理性。而 m3DVAR 系统不需要插值与物理量变换,减少了误差源,其新息向量的垂直分布也更加合理(图 5a)。分析余差能够反应分析向观测的靠近程度。由于 p3DVAR 系统不合理的新息向量,导致了其分析余差存在较大误差,而 m3DVAR 系统的分析余差总体上小于 p3DVAR 系统,尤其是在观测特性层附近(图 5b)。这进一步说明模式面分析系统的分析结果不仅合理,分析质量也得到改善。

分别以两个同化方案的分析结果做初始场进行短期预报,检验不同分析结果的预报质量。试验中用 2006 年 8 月的观测资料做 30 d 连续同化预报,24 h 降水预报的月平均 Ts 评分(图 6)表明 m3DVAR 系统的分析场为初值的 24 h 降水预报除小雨量级的 Ts 评分二者一致外,其他不同降水量级的评分都略高于 p3DVAR 系统,这进一步显示了非静力模式变量三维变分资料同化方案提供的模式初值质量优于原等压面分析系统。

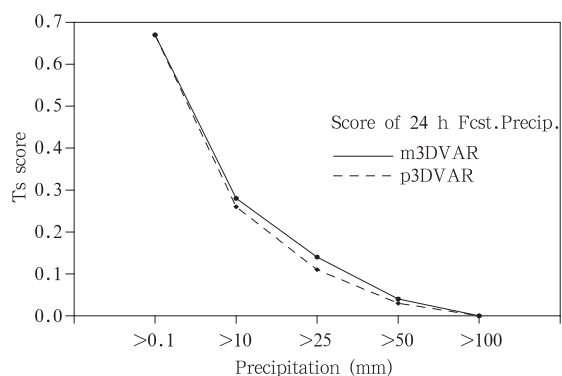


图 6 2006 年 8 月 24 h 降水预报的 Ts 月平均评分
(实线表示 m3DVAR, 虚线表示 p3DVAR)

Fig. 6 Averaged Ts scores of 24-h prediction
precipitation in August 2006
(Solid line denotes the m3DVAR system and
dashed line denotes the p3DVAR system)

7 结论与讨论

本文针对中国发展的 GRAPES 非静力数值预报模式,在等压面三维变分资料同化系统基础上发展了新的模式变量三维变分资料同化系统 GRAPES-m3DVAR。有效避免了背景场与分析场

在模式标准化过程中引起的插值误差,在一定程度上改善了模式初值质量,也为进一步发展建立 GRAPES 模式的四维变分资料同化系统提供了基础与平台。

由于等压面分析系统与非静力模式变量分析系统的分析变量不同,在非静力模式面三维变分资料同化系统中,重新设计了分析系统框架,通过对动力约束关系中平衡方程采取新的数学方案,避免了地形追随坐标下方程中非线性项引起的复杂计算,而且有效解决了求解平衡方程中非线性项的切线性方程和伴随方程造成的困难。观测算子的重新设计既确保了其合理性,对于常规观测资料的观测要素又能够直接与模式变量等价,减少了误差来源,在理论上也更加明确。单点观测理想试验和实际观测资料的同化分析结果表明,平衡关系的处理以及观测算子的构造是合理与正确的。

另外,新分析系统水平方向的变量离散方案与垂直方向变量交错格式采用与 GRAPES 非静力模式方案完全一致的 Arakawa-C 网格和 Charney-Phillips 垂直跳点格式,避免了不同网格之间变换带来的插值误差。当然,非静力模式变量三维变分资料同化系统还需要通过更多的批量试验,进一步调试、优化同化分析效果,以投入业务数值预报运行。

致谢:在系统发展过程中,中国气象科学研究院数值预报研究中心的老师给予了积极帮助,特别是朱宗申老师的精心指导,在此一并表示感谢。

References

- Arakawa A, Lamb V R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods Comp Phys*, 17:174-265
- Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. 2004. A three-dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: Implementation and initial results. *Mon Wea Rev*, 132:897-914
- Charney J G, Phillips N A. 1953. Numerical integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows. *J Meteor*, 10:71-99
- Courtier P, Andersson E, Heckley W, et al. 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: Formulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124: 1783-1807
- Daley R. 1991. *Atmospheric Data Analysis*. New York: Cambridge University Press. 456pp
- Fisher M. 2003. Background error covariance modeling//Seminar on

- Recent Development in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean. ECMWF, 45-63
- Gal-Chen T, Somerville R C J. 1975. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes Equations. *J Comput Phys*, 17:209-228
- Huang Liping, Wu Xiangjun, Jin Zhiyan. 2005. Design and implementation of the standard initialization schemes of GRAPES model. *J Applied Meteor Science (in Chinese)*, 16(3):374-384
- Ingleby N B. 2001. The statistical structure of forecast errors and its representation in the Met. Office global 3-D variational data assimilation scheme. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127:209-232
- Lorenc A C, Ballard S P, Bell R S, et al. 2000. The Met Office Global 3-Dimensional Variational Data Assimilation Scheme. *Quart J Roy Meteor Soc*, 26:2991-3012
- Lorenc A C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart J Roy Meteor Soc*, 112:1177-1194
- Pailleux J. 1990. A global variational assimilation scheme and its application for using TOVS radiances. *Proceedings of WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography*. Clermont-Ferrand, France, 325-328
- Parrish D F, Derber J C. 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon Wea Rev*, 120:1747-1763
- Skamarock W C, Klemp J B, Duhia J, et al. 2005. A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Note, NCAR/TN-468+STR, 88pp
- Wu W-S, Purser R J, Parrish D F. 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon Wea Rev*, 130:2905-2916
- Xue Jishan. 2004. Progress of researches on numerical weather prediction in China: 1999-2002. *Adv Atmos Sci*, 21(3):467-474
- Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. 2004. Ideal experiments of GRAPES three-dimensional variational data assimilation system. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 62(1):30-41
- Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, Zhu Zongshen, et al. 2006. Application of nonlinear balance scheme in three-dimensional variational data assimilation. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 64(2):137-148

附中文参考文献

- 黄丽萍, 伍湘君, 金之雁. 2005. GRAPES 模式标准初始化方案设计与实现. *应用气象学报*, 16(3):374-384
- 张华, 薛纪善, 庄世宇等. 2004. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 62(1):30-41
- 庄照荣, 薛纪善, 朱宗申等. 2006. 非线性平衡方案在三维变分同化系统中的应用. *气象学报*, 64(2):137-148