庄照荣, 薛纪善, 李兴良, 等. 2010. GRAPES 全球模式的模式误差估计 [J]. 大气科学, 34 (3): 591-598. Zhuang Zhaorong, Xue Jishan, Li Xingliang, et al. 2010. Estimation of model error for the global GRAPES model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 591-598.

GRAPES 全球模式的模式误差估计

庄照荣^{1,2} 薛纪善^{1,2} 李兴良¹ 张利红³

1 中国气象科学研究院数值预报研究中心,北京 100081
 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081
 3 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072

摘 要现代数值天气模式考虑的物理过程和边界条件越来越复杂,但是它描述的大气状态和真实的大气流体运动轨迹还有一定的差距,存在模式误差。在以往的研究中,模式误差往往被忽略,在集合卡尔曼滤波同化系统中,如果忽略模式误差会导致滤波发散现象。本文用不同分辨率的模式预报差异估计了 GRAPES 全球模式的模式误差,研究发现模式误差随着分辨率降低而线性增加,而且模式误差随着预报时效的增加呈现线性增长的趋势。 关键词 GRAPES 全球模式 模式误差 模式分辨率 文章编号 1006 - 9895 (2010) 03 - 0591 - 08 中图分类号 P435 文献标识码 A

Estimation of Model Error for the Global GRAPES Model

ZHUANG Zhaorong^{1, 2}, XUE Jishan^{1, 2}, LI Xingliang¹, and ZHANG Lihong³

1 Center for Numerical Prediction and Research, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072

Abstract The model error exists for the reason that a certain difference is present between the weather state described by the model and the true weather state though more and more physical processes and complicated boundary conditions are considered in numerical weather prediction models. Filter divergence was found in the ensemble Kalman filter system when the model errors were neglected in previous studies. In this paper, it is shown that the model errors increase linearly with the decrease of resolution and the increase of the model error is obvious with the increase of model forecasting length through estimating the discriminations among the forecasting fields at different resolutions. **Key words** global GRAPES model, model error, model resolution

1 引言

通常我们用数值天气模式来描述大气运动,但 不能非常准确的预报天气状态,目前数值天气预报 的可预报时效达一周左右。数值预报的不确定性主 要由初始分析场的不准确描述、大气模式的不完美及大气的混沌特性造成。

初始误差(分析误差)主要是由于观测资料的 不确定性(不完美的数据覆盖、代表性误差、测量 误差等)、背景信息的不确定性,以及数据同化过

收稿日期 2009-04-30, 2009-11-04 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2004CB418300, "十一五"国家科技支撑计划项目 2006BAC02B02, 国际科技合作项目 2008DFA22180, 国家自然科学基金资助项目 40805045, 中国气象局新技术推广项目 CMATG2008M26

作者简介 庄照荣,女,1978年出生,助理研究员,主要从事资料同化研究, E-mail: zhuangzr@cams. cma. gov. cn

程(背景误差协方差不恰当的使用、变量平衡关系 的近似等)造成(Houtekamer et al., 1996)。大气 状态变化是连续复杂的非线性过程,而用于预测大 气时间演变的数值天气模式只是流体连续动力机制 的一种有限的、离散的数学描述,这种描述也是不 完全准确的,这就是模式误差。

在以往的集合卡尔曼滤波中,一般假设大气模 式是完美的,不需要估计模式误差,因而用集合同 化方法得到的误差要小于实际的误差 (Hamill and Snyder, 2002)。但是实际的大气模式是不完美的, 存在各种不确定性,如果忽略模式误差,在集合卡 尔曼滤波中将出现滤波发散现象。在过去几年中, 模式为完美(模式没有误差)的假定被舍去,实际 的大气模式和观测资料被用于集合同化的方法中, 由于模式误差而造成的预报不确定性因素也有所考 虑。通过比较集合离散和集合平均预报误差可以用 来测量模式误差,离散不足作为模式相关不确定性 的测量,这是考虑模式误差最简单的方法。也可以 用协方差调节的方法来增加模式误差,协方差调节 方法可以在不改变预报误差协方差的空间结构的情 况下直接扩大预报集合成员和集合平均的偏差 (Whitaker et al., 2004)

另外,考虑到模式的不确定性而造成的模式误 差,通过模式扰动的方法也可以估计模式误差。例 如,通过比较不同分辨率的模式预报误差,估计网 格尺度造成的模式误差;通过选择不同的物理方 案,考虑不同物理方案之间的模式误差差别;此 外,也可以对不同动力框架的模式加以组合,从而 考虑不同模式之间的差别造成的模式误差等等。 Hamill and Whitaker (2005) 分别采用 T63 和 T31 模式分辨率之间的差别、同一模式 24 小时预报之 间的差别,以及T31模式状态变量相对于模式气候 状态的异常这三种方式来估计模式误差,研究表明 用 T63 和 T31 模式分辨率之间的差别来估计模式 误差最有效,获得的模式误差的特征尺度和设定的 模式误差特征尺度相似。Etherton and Bishop (2004) 在混合同化方法中加入分辨率和参数化过 程造成的模式误差后,发现分析结果更好。

在实际的大气模式中,我们不知道模式误差的 特征,所以通常假设模式误差具有在变分同化中背 景误差同样的特征,假设模式误差水平垂直独立可 分离,水平各向同性(Daley,1992b)。由于模式误 差对非均匀和依赖于时间的观测网不敏感,模式误 差比背景误差用此假定更恰当。因而也可以利用预 报场和观测场之间的差别估计模式误差,对模式误 差进行参数化估计(新息向量方法)(Dee, 1995; 庄照荣等, 2006)。在以往的卡尔曼滤波分析中, Daley (1992b) 在无线电探空观测网上利用预报和 观测的新息向量协方差的方法估计预报误差协方 差,然后利用观测和分析的残差协方差技术估计分 析误差协方差,最后利用可预报性试验(分析与分 析扰动的积分差别来测量)估计可预报性误差协方 差,从而可以得到模式误差。Mitchell and Houtekamer (2000, 2002) 采用了新息向量估计模式误差的 方法,并应用于集合卡尔曼滤波同化预报系统中。 Houtekamer et al. (2005) 对每一个集合成员加入了 用新息向量方法估计的模式误差噪音,试验发现基 于集合的同化方法与业务的三维变分分析是可比的。

以上模式误差估计方法中,一般假定模式误差 统计结构是已知的,而且模式误差是时间不相关 的。Daley (1992a)曾经考虑了模式误差的时间相 关,但是研究发现考虑误差的时间相关后,同化质 量反而有可能被破坏。

本文主要介绍模式误差的定义和研究的必要性,然后利用模式分辨率的差别来估计 GRAPES 全球模式的模式误差。

2 模式误差的定义

若 xⁿ 为第 n 个时刻的真实大气状态, 第 n 个时刻的真实大气状态方程描述为:

$$\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{t}} = M_{n-1,n}^{\mathrm{t}} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{t}}, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{t}} = M_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{t}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{\mathrm{m}}, \qquad (2)$$

其中, $M_{n-1,n}^{f}$ 和 $M_{n-1,n}^{f}$ 分别为真实的大气模式和预 报模式, $\boldsymbol{\epsilon}_{n}^{m}$ 为模式误差,若 Q_{n} 为模式误差协方差, 有 $Q_{n} = \langle \boldsymbol{\epsilon}_{n}^{m}, \boldsymbol{\epsilon}_{n}^{mT} \rangle$,其中,上标 T 表示矩阵转置。 第n个时刻大气状态的预报场为 \boldsymbol{x}_{n}^{f} :

$$\boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{f}} = M_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{a}}. \tag{3}$$

假设 $\mathbf{x}_{n-1}^{a} - \mathbf{x}_{n-1}^{t}$ 的差别很小,则误差增长存在切线 性近似,即

 $M_{n-1,n}^{\rm f} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\rm a} - M_{n-1,n}^{\rm f} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\rm t} \approx \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\rm f} (\boldsymbol{x}_{n-1}^{\rm a} - \boldsymbol{x}_{n-1}^{\rm t}),$ (4)

其中, $M_{n-1,n}^{f}$ 为 $M_{n-1,n}^{f}$ 的切线性算子,若预报误差为 ε^{f} ,则有:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_n^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{x}_n^{\mathrm{f}} - \boldsymbol{x}_n^{\mathrm{t}} =$$

$$M_{n-1,n}^{t} \boldsymbol{x}_{n-1}^{a} - (M_{n-1,n}^{t} \boldsymbol{x}_{n-1}^{t} + \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}) \approx$$

$$M_{n-1,n}^{f} (\boldsymbol{x}_{n-1}^{a} - \boldsymbol{x}_{n-1}^{t}) - \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m} =$$

$$M_{n-1,n}^{f} \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}.$$
(5)
$$P_{n-1,n}^{f} \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}.$$

若 P_n^f 为预报误差协方差,从上式可得: $P_n^f = \langle \boldsymbol{\varepsilon}_n^f, \boldsymbol{\varepsilon}_n^{(T)} \rangle \approx$

$$\langle (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f}\boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}), (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f}\boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m})^{\mathrm{T}} \rangle = \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f} \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}^{-T} \rangle \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f} - \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f} \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m} \rangle - \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}^{-T} \rangle \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{f}^{T} + \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{m}^{T} \rangle.$$
(6)

假设分析误差和模式误差不相关,即 $\langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n}^{nT} \rangle = 0$,则有:

$$\boldsymbol{P}_{n}^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{P}_{n-1}^{\mathrm{a}} \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{n}, \qquad (7)$$

其中, P_{n-1}^{a} 为 n-1 时刻的分析误差协方差, 有 $P_{n-1}^{a} = \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}^{a}^{-1} \rangle$ 。若定义可预报误差为初始状态的误差(分析误差)和在非线性模式下初始误差的增长, 即: $P_{n}^{p} = M_{n-1,n}^{f} P_{n-1}^{a} M_{n-1,n}^{f}$,则预报误差协方 差可写为:

$$\boldsymbol{P}_{n}^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{P}_{n}^{\mathrm{p}} + \boldsymbol{Q}_{n}. \tag{8}$$

由上式可知若大气模式不是完美的,预报误差协方 差由可预报误差协方差和模式误差协方差组成。

模式误差是由于预报模式和真实大气模式的差 别造成,它依赖于真实大气状态。真实的大气模式 是复杂的非线性过程,在数值求解大气状态方程 时,通常得不到它的解析解,需要对非线性方程组 进行离散化。而且预报模式中的对流参数化、边界 层参数化、辐射过程、云微物理过程、陆面过程、 有限分辨率以及不完美的边界条件(地面粗糙度、 土壤湿度、雪盖、植被性质和海平面温度的不正确 估计和描述)等等都可以造成模式误差。

模式误差可以归类为系统误差(模式偏差)和 随机误差。如果模式在同样条件下运行多次,系统 误差会重复产生。系统误差一般和预报模式的结构 有关,而且系统的模式误差可能依赖一定条件而产 生,例如依赖对流过程的发生,这样用有限样本很 难估计。随机误差不能再现,它们由于数值不精 确,一些尺度的有限截断等在积分时间步内产生。 随机模式误差和初始误差一样,它能在模式预报中 变为误差增长最快的部分,而且增长的误差与大气 不稳定有关(Hamill et al., 2000)。

3 模式误差研究的必要性

在集合卡尔曼滤波系统中,真实的背景误差协 方差为:

$$\langle (\bar{\boldsymbol{x}}_{n}^{\mathrm{b}} - \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{t}}) (\bar{\boldsymbol{x}}_{n}^{\mathrm{b}} - \boldsymbol{x}_{n}^{\mathrm{t}})^{\mathrm{T}} \rangle = \langle (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{a}} - \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1,n}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1,n}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1,n}^{\mathrm{t}} \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1,n}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1,n}^{\mathrm{t}} - \boldsymbol{m}_{n-1$$

其中, \vec{x}_n^b 为第 n 个时刻集合平均的背景场, \vec{x}_{n-1}^a 为 第 n-1 时刻集合平均的分析场。而我们使用一组 集合样本间的离差来估计背景误差协方差, 有

$$\langle (\boldsymbol{x}_{i,n}^{\mathrm{b}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n}^{\mathrm{b}}) (\boldsymbol{x}_{i,n}^{\mathrm{b}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n}^{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}} \rangle = \langle (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{i,n-1}^{\mathrm{a}} - \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{a}}), (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{i,n-1}^{\mathrm{a}} - \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}} \rangle \approx \\ \langle \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} (\boldsymbol{x}_{i,n-1}^{\mathrm{a}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{a}}) (\boldsymbol{x}_{i,n-1}^{\mathrm{a}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \rangle = \\ \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} (\boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{a}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{a}}) (\boldsymbol{x}_{n-1}^{\mathrm{a}} - \bar{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f}} \rangle$$
(10)

其中,**x**^b_{i,n-1}为背景和分析的集合成员,**P**^a_{n-1}为 用有限集合样本估计的分析误差协方差。比较公式 (9)和(10),可以看出用一组集合估计预报误差协 方差时,由于忽略了模式误差,预报场的发散度将 不够。集合卡尔曼滤波的成功与否在于集合成员的 离散是否可以代表集合平均和真实状态的差值。如 果不考虑模式误差,集合成员的发散度不够,可造 成滤波发散。所以在集合卡尔曼滤波同化预报研究 中,模式误差的研究是必要的。

4 利用模式分辨率的差别估计模式误差

当预报模式采用不同的分辨率时,模式所能描述中小尺度的信息不同,高分辨率模式描述的中小 尺度信息更细致和准确,高分辨率模式预报所造成 的模式误差更小。本文主要采用不同分辨率的模式 预报差异来估计模式误差。

由公式 (3), 假设模式分辨率为 i 的第 n 个时 刻大气状态的预报场为 $x_n^{f,i}$, 则有

$$\mathbf{x}_{n}^{\mathrm{f},i} = M_{n-1,n}^{\mathrm{f},i} \mathbf{x}_{n-1}^{\mathrm{a},i},$$
 (11)

模式分辨率为j的第n个时刻大气状态的预报场为 $\mathbf{x}_{n}^{f,j}$,则有

$$\mathbf{x}_{n}^{\mathrm{f},j} = M_{n-1,n}^{\mathrm{f},j} \mathbf{x}_{n-1}^{\mathrm{a},j}.$$
 (12)

在第n-1个时刻,采用相同的初始场,有 $x_{n-1}^{a,i} = x_{n-1}^{a,j} = x_{n-1}^{a}$,假设不同分辨率之间的预报场差别为 $\varepsilon_{i,j}^{i}$,用公式(11)减去公式(12),有

$$\begin{split} \boldsymbol{\varepsilon}_{i,j}^{\text{r}} &= \boldsymbol{x}_{n}^{\text{f},i} - \boldsymbol{x}_{n}^{\text{f},j} = \\ M_{n-1,n}^{\text{f},i} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{a}} - M_{n-1,n}^{\text{f},j} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{a}} = \\ \begin{bmatrix} M_{n-1,n}^{\text{f},j} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{t}} + \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\text{f},i} (\boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{a}} - \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{t}}) + o(\Delta \boldsymbol{x}_{n-1}^{j-2}) \end{bmatrix} - \\ \begin{bmatrix} M_{n-1,n}^{\text{f},j} \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{t}} + \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\text{f},j} (\boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{a}} - \boldsymbol{x}_{n-1}^{\text{t}}) + o(\Delta \boldsymbol{x}_{n-1}^{j-2}) \end{bmatrix} = \end{split}$$

 h_{13}

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{j}^{m} - \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{m} + (\boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f},i} - \boldsymbol{M}_{n-1,n}^{\mathrm{f},j}) \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{a}} + o(\Delta \boldsymbol{x}_{n-1}^{2}),$$
(13)

其中, $o(\Delta x_{n-1}^2)$ 为不同分辨率的预报模式切线性 近似误差的差别,当预报模式满足切线性近似,它 相对于公式(13)的前面几项为小量。在采用相同 的初始场,并且假设初始场接近于真实大气状态 时, $(M_{n-1,n}^{f,i}-M_{n-1,n}^{f,j})$ ε^a 相对于不同分辨率下模式 误差的差别较小,假设 $\varepsilon^c = (M_{n-1,n}^{f,i}-M_{n-1,n}^{f,j})\varepsilon^a$ 。略 去小量 $\varepsilon^c = o(\Delta x_{n-1}^2)$,则有

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j}^{\mathrm{r}} \approx \boldsymbol{\varepsilon}_{j}^{\mathrm{m}} - \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{\mathrm{m}}. \tag{14}$$

经过试验发现,在相同初始场的条件下,不同 分辨率的模式误差差别随着模式分辨率的增加呈现 近似线性的变化,假设模式误差随分辨率的变化可 以用以下线性方程拟合,即

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j}^{r} \approx \boldsymbol{\varepsilon}_{j}^{m} - \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{m} = \alpha(j-i) + \beta,$$
 (15)
其中, $\alpha 与 \beta$ 为拟合系数。当 $i=0$ 时,从上式得到:
 $\boldsymbol{\varepsilon}_{j}^{m} - \boldsymbol{\varepsilon}_{0}^{m} = \alpha j + \beta,$ (16)

 $ε^{0}$ 为模式分辨率很高($i \rightarrow 0$),模式的空间变化趋向于连续变化时的模式误差。假设此时的模式预报 很精确,基本不存在模式误差,即 $ε^{0} \rightarrow 0$,因而,当 模式分辨率为j时的模式误差为

ε_j^m = αj + β. (17)
 以上说明,比较不同分辨率下的模式预报之间
 的差别,通过拟合公式 (17),可以估计不同分辨率
 下的模式误差。

4.1 试验设计

文中主要针对 GRAPES 全球模式,做了两组 试验来估计模式误差。

试验一: 在 2006 年 8 月 7 日、8 日、9 日的 18 时(协调世界时,下同)分别使用同样的初始场 (T213 模式的预报场),对分辨率分别为 0.5°× 0.5°、1.0°×1.0°、1.5°×1.5°、2.0°×2.0°、2.5°× 2.5°的模式进行了 6 小时预报,对不同分辨率下 6 小时预报的差别进行分析比较。

试验二: 从 2006 年 8 月 7 日 18 时开始, 选用 模式分辨率为 2.0°×2.0°、2.5°×2.5°, 对同样的 初始场进行 48 小时的预报试验, 研究模式误差随 预报时效的变化。

4.2 模式误差分析

在不同分辨率设置下,文中对3个时次的初始 场利用 GRAPES 全球模式进行6小时预报试验。 图1为在2006年8月7日18时 GRAPES 模式6 小时预报场求出的不同分辨率位势高度误差的差别,其中 h_{mk} (m=1, 2, 3, 4, 5; k=2, 3, 4, 5)表示分辨率为 d_m 和 d_k 时模式预报误差的差值(d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 分别为0.5°、1.0°、1.5°、2.0°、2.5°)。

从图1可以看出,相同差别分辨率的位势高度 预报误差差值基本相等,在 1000 hPa 到 30 hPa 之 间, 分辨率差别为 0.5° 的 h_{12} (分辨率分别为 0.5° 和 1.0°), h₂₃(分辨率分别为1.0°和1.5°), h₃₄(分辨率 分别为 1.5°与 2.0°), h₄₅(分辨率分别为 2.0°与2.5°) 的位势高度预报误差差值随高度的变化基本相同, 都在 2~4 gpm 之间变化 (如图 1 实线所示): 分辨 率差别为 1.0°的 h_{13} 、 h_{24} 和 h_{35} 的预报误差差值也基 本相同 (如图1虚线所示),在4~6 gpm 之间变 化;分辨率差别在 1.5°的 h_{14} 和 h_{25} 的预报误差差值 在 6~8 gpm 之间变化 (图 1 点划线所示);分辨率 差别为 2.0°的 h₁₅的预报误差差值在 7~11 gpm 之 间变化 (如图1长虚线所示)。相同差别分辨率的 预报误差差值在模式中低层随高度变化不大,在 100 hPa 以上随高度而逐渐增大。另外,当预报模 式的分辨率相差越大时,模式预报之间的差别越 大,说明低分辨率模式的预报误差比较大。

从 2006 年 8 月 8 日 18 时和 9 日 18 时 不同分 辨率下 GRAPES 6 小时的预报场差别也可以得到 同样的结果 (见图 2a、b),说明在同样初始场下, 同一预报时效的预报误差基本相同。

10

 $\begin{array}{c} 100 \\ 150 \end{array}$

200 250

300

对于每一层的模式误差随分辨率的变化有一定





Fig. 1 The differences of 6-h forecast errors of geopotential height at 1800 UTC 7 Aug 2006 with GRAPES model between different resolutions

的规律, 文中采用线性方程 (17) 来拟合模式误差 的变化。图3 给出 2006 年 8 月 7 日 18 时在不同标

3期

No. 3

准气压层上,GRAPES的6小时预报位势高度的 模式误差随分辨率的变化及线性拟合情况。



图 2 2006 年 8 月 GRAPES 模式不同分辨率下 6 小时预报的位势高度误差差别: (a) 8 日 18 时; (b) 9 日 18 时 Fig. 2 Same as Fig. 1, but for (a) 1800 UTC 8 Aug 2006 and (b) 1800 UTC 9 Aug 2006



图 3 2006 年 8 月 7 日 18 时 GRAPES 6 小时预报的位势高度误差随分辨率的变化与拟合: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa; (c) 200 hPa; (d) 50 hPa

Fig. 3 Variations of GRAPES model 6-h forecast errors of geopotential height at 1800 UTC 7 Aug 2006 with the resolution and the fitting: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa; (c) 200 hPa; (d) 50 hPa 从图 3 可以看出,在 1000 hPa 位势高度的模 式误差随分辨率呈线形变化,分辨率越粗,模式误 差越大,模式误差随分辨率的增长率为 4.37;当用 线性方程外推,模式分辨率很高,接近于零时(模 式近似微分方程),还存在着一定的误差,为 1.35 gpm。在用不同分辨率的模式预报估计模式误差 时,文中忽略了(13)式的初始场误差和模式切线 性近似的误差,但是当预报模式分辨率差别太小, (13)式中不同分辨率的模式误差差别就较小,初 始场的误差就不能略去。而且当预报模式分辨率很 高时,模式预报包含更多小尺度的信息,模式不能 使用切线性近似的假设。因而,当预报模式分辨率



图 4 2006 年 8 月 7 日 18 时 500 hPa 6 小时预报的模式误差随分辨率的分布及拟合: (a) 位势高度; (b) 温度; (c) 风场 u; (d) 风场 v; (e) 相对湿度; (f) 比湿

Fig. 4 Variations of GRAPES model 6-h forecast errors at 500 hPa at 1800 UTC 7 Aug 2006 with the resolution and the fitting: (a) Geopotential height; (b) temperature; (c) *u*-component wind; (d) *v*-component wind; (e) relative humidity; (f) specific humidity 较高时,模式误差随分辨率的变化可能不满足线性 变化。在 850 hPa、200 hPa 和 50 hPa 位势高度的 模式误差随分辨率的降低也呈线形增加的趋势。

3期

No. 3

图 4 给出 2006 年 8 月 7 日 18 时 500 hPa 不同 变量的模式误差随分辨率的变化。从图 4 可以看 出,在 500 hPa 位势高度、温度、风场 u、风场 v、 相对湿度和比湿的模式误差随分辨率的降低也呈线 性增长的趋势。其中位势高度和温度的模式误差分 布和线性方程拟合的非常好;相对湿度和比湿的模 式误差分布和线性方程拟合的相对较差。

模式误差不仅随着分辨率的降低而增加,也随 着预报时效的增加而增大。从图 5 可以看出,当分 辨率差别为 0.5°时(分辨率为 2.5°和 2.0°差别), 不同时效的位势高度的模式误差在近地面层的误差



图 5 不同时效的位势高度误差随高度的变化 Fig. 5 Distributions of geopotential height errors with height for different forecast lengths

较大(这可能由于近地层部分模式面和等压面间的 间距较大,并采用外插计算造成,以及边界层过程 等描述不准确造成),并且随着高度的增加逐渐减 小,在600 hPa减小到最小,随后又有增加的趋势, 在300~200 hPa高空急流附近出现极大值;在最 高层,模式误差也比较大。从图5还可以看出,随 着预报时效的增加,模式误差逐渐增大。

在 1000 hPa、850 hPa 和 500 hPa 上的分辨率 差值为 0.5°(分辨率为 2.5°和 2.0°的差值)的模式 误差差值随预报时效的增加而增大(如图 6 所示), 模式误差差值随预报时效的变化基本也呈现近似线 性增长的趋势。在 1000 hPa 到 500 hPa 之间,模式 误差差值随高度的增加在逐渐减小,在 1000 hPa, 24小时预报的模式误差为6.49 gpm,48小时预报



图 6 位势高度模式误差差值随预报时效的变化 Fig. 6 Distributions of geopotential height errors with the forecast length



图 7 2006 年 8 月 7 日 18 时 500 hPa 位势高度(等值线)及 6 小时预报的位势高度的模式误差(阴影)分布(单位:gpm) Fig. 7 500-hPa geopotential height (isolines, units:gpm) at 1800 UTC 7 Aug 2006 and its model error for 6-h forecast (shadow)

的模式误差为 9.91 gpm, 而在 500 hPa, 24 小时预 报的模式误差差值为 3.30 gpm, 48 小时预报的模 式误差差值为 6.04 gpm。

从分辨率为 2.5°和 0.5°的 6 小时预报场的差 别可以看出(图 7 所示),由于分辨率不同导致的 模式误差差别在天气系统变化剧烈的低压槽线和高 压脊线附近较大,在赤道区域模式误差较小。

综上所述,利用不同分辨率的模式预报之间的 差别可以估计模式误差。试验表明,对不同时间的 同一预报时效而言,模式误差基本相同,它随高度 的变化在 1000 hPa 到 100 hPa 之间比较小,在 100 hPa 以上而逐渐增大;模式误差随着分辨率降 低而线性增加,不同高度上的模式误差随分辨率变 化的增长率不同。模式误差随着预报时效的增加有 明显的变化,在 1000 hPa 至 100 hPa 之间,模式误 差随预报时效的增加基本也呈现线性增长的趋势, 但是,在100 hPa 以上模式误差随预报时效的增加 变化幅度较小。

5 结论和讨论

本文主要介绍了模式误差造成的原因,以及在 集合卡尔曼滤波中研究模式误差的必要性。然后, 利用模式不同分辨率的预报差别对模式误差进行了 估计,研究表明不同时间同一预报时效的模式误差 基本相同;模式误差随着分辨率降低而线性增加, 不同高度上的模式误差随分辨率变化的增长率不 同;模式误差随着预报时效的增加也明显增大。

考虑模式误差可以改善集合的滤波发散问题, 文中在初始场接近于真实大气状态条件下,假设模 式误差随时间不变和预报模式满足切线性近似,通 过不同分辨率的模式预报对模式误差进行了估计。 实际上,相同的初始场随着模式分辨率的不同存在 着插值误差,随着模式的预报,这种差别也有可能 会增长,只是文中在初始场误差较小的情况下忽略 了这种变化。当预报模式的分辨率较高时,预报模 式包含更多小尺度的信息,模式具有较强的非线 性,因而模式切线性近似的误差也不能略去。因 而,在较高模式分辨率条件下,模式误差随分辨率 的变化可能不满足线性关系。用不同分辨率模式预 报的差别估计模式误差也有一定的局限性,例如, 在某些中小尺度的天气系统中,模式误差可能由不 恰当的物理过程造成。由于大气模式是复杂的非线 性过程,预报模式的误差可能由很多原因造成,因 而误差很难准确估计,需要进行更深入的研究。

参考文献 (References)

- Daley R. 1992a. The effect of serially correlated observation and model error on atmospheric data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 120: 164-177.
- Daley R. 1992b. Estimating model-error covariances for application to atmospheric data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 120: 1735-1746.
- Dee D P. 1995. On-line estimation of error covariance parameters for atmospheric data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 123 (4): 1128 - 1145.
- Etherton B J, Bishop C H. 2004. Resilience of hybrid ensemble/ 3DVAR analysis schemes to model error and ensemble covariance error [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1065-1080.
- Hamill T M, Mullen S L, Snyder C, et al. 2000. Ensemble forecasting in the short to medium range: Report from a workshop [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81 (11): 2653-2663.
- Hamill T M, Snyder C. 2002. Using improved background error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 1552-1572.
- Hamill T M, Whitaker J S. 2005. Accounting for the error due to unresolved scales in ensemble data assimilation: A comparison of different approaches [J]. Mon. Wea. Rev., 133: 3132 – 3147.
- Houtekamer P L, Lefaivre L, Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. Mon. Wea. Rev., 124 (6): 1225-1242.
- Houtekamer P L, Mitchell H L, Pellerin G, et al. 2005. Atmospheric data assimilation with an ensemble Kalman filter: Results with real observations [J]. Mon. Wea. Rev., 133 (3): 604-620.
- Mitchell H L, Houtekamer P L. 2000. An adaptive ensemble Kalman filter [J]. Mon. Wea. Rev., 128 (2): 416-433.
- Mitchell H L, Houtekamer P L. 2002. Ensemble size, balance, and model-error representation in an ensemble Kalman fileter [J]. Mon. Wea. Rev., 130 (11): 2791–2808.
- Whitaker J S, Compo G P, Wei X, et al. 2004. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1190-1200.
- 庄照荣,薛纪善,庄世宇,等. 2006. 资料同化中背景场位势高度误 差统计分析的研究 [J]. 大气科学, 30 (3): 533-544. Zhuang Z R, Xue J S, Zhuang S Y, et al. 2006. A study of the statistical analysis of the geopotential height background errors in the data assimilation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 533-544.