

GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换 初始扰动方案初步研究^{*}

马旭林^{1,2} 薛纪善² 陆维松¹
MA Xulin^{1,2} XUE Jishan² LU Weisong¹

1. 南京信息工程大学, 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. *Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China*

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

2007-12-20 收稿, 2008-02-28 改回.

Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4):526—536

Abstract Initial perturbations scheme is one of the important problems in the ensemble prediction. In this paper, an ensemble initial perturbations scheme for GRAPES is developed in terms of the ensemble transform Kalman filter (ETKF) method, and a new GRAPES global ensemble prediction system (GEPS) is constructed. The spherical simplex 14-member ensemble prediction experiments, using the simulated observation network and error characteristics of simulated observations and innovation-based inflation, are carried out over almost two months. The structural characters, perturbation amplitudes, and growth characters of the ETKF initial perturbations are investigated, and the qualities and abilities for the ensemble initial perturbations are analyzed.

The preliminary experimental results indicate that the ETKF-based GRAPES ensemble initial perturbations could identify main normal structures of analysis error variance and reflect on the perturbation amplitudes. The initial perturbations and the spread are reasonable. The initial perturbation variance, which is equaled approximately to the forecast error variance, is found to respond to temporal changes in the observational spatial variations in simulated observational network density. The perturbations generated through the simplex method are also shown to exhibit very high degree of consistency between initial analysis and short-range forecast perturbations. The appropriate growth and spread of ensemble perturbations can be maintained in 96 h lead time. The statistical results for 52 d ensemble forecasts show that the forecast scores of ensemble average for the Northern Hemisphere is higher than that of the control forecast. Potential additional benefits of the ETKF-based initial scheme when using more ensemble members, a real-time observational network and a more appropriate inflation factor will be explored in future.

Key words GRAPES, Ensemble transform Kalman filter (ETKF), Initial perturbation, Ensemble prediction

摘 要 初始扰动方案是集合预报研究的核心问题之一。文中根据最新提出的基于集合卡尔曼变换(ETKF)理论的集合初始扰动方案,利用模拟观测系统及其调整的观测误差与放大因子的方案,研究发展了针对中国 GRAPES 全球预报系统的集合初始扰动方案,建立了 GRAPES 全球集合预报系统。利用 14 个集合成员进行了近两个月的集合预报试验,重点研究了初始扰动的结构特征、扰动振幅以及扰动增长特征,分析了集合扰动初始场的质量与性能。初步试验结果表明,基于 ETKF 初始扰动方案的 GRAPES 全球集合初始扰动能够较好地反映分析误差方差的主要模态结构和扰动振幅,并具有比较合理的集合离散度。分析误差方差能够准确地反应模拟观测资料的空间分布特征。初始扰动方差近似等于预报误差方差,并对全球观

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(40675064、40518001 和 40675062);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”。

作者简介:马旭林,主要从事数值预报资料同化与集合预报理论方法研究。E-mail: xlinma@cams.cma.gov.cn

测系统的空间变化具有准确的响应。集合扰动具有合适的增长率,在 96 h 的预报时效内可以有效地保持适当的集合离散度。52 d 集合预报统计分析显示,北半球集合平均的预报质量评分相对于控制预报具有较明显的优势,副热带高压特征线的个例预报也表明 GRAPES 全球集合预报在短期预报时效内具有很好的预报效果。基于 ETKF 初始扰动方案的 GRAPES 全球集合预报系统显示出良好的发展前景和应用潜力。

关键词 GRAPES,集合卡尔曼变换(ETKF),初始扰动,集合预报

中图法分类号 P456.7

1 引言

数值预报模式由于初值误差与模式误差以及天气形势等的影响,给非线性大气运动的单一确定性预报技巧带来一定的局限。自 Leith(1974)提出集合预报能够改善预报技巧后,集合预报初始扰动的研究得到了快速发展,先后提出了针对分析误差概率分布估计的 Monte Carlo 随机扰动法(Hollingsworth,1980)与时间滞后平均法(Hoffman,et al,1983)等方案。在数值预报误差分析的基础上,美国国家环境预报中心(NCEP)提出了具有动力学约束的增长模繁殖法(BGM)扰动方案以及改进的增长模繁殖法扰动方案(Toth,et al,1993;1997),通过调整分析误差得到对偶的初始扰动;而识别预报误差增长最快模态的奇异向量法(SVs,Buizza,et al,1995;Molteni,et al,1996)在欧洲中尺度天气预报中心(ECWMF)得到深入研究,并在预报业务中取得了成功。观测扰动方案(Houtekamer,et al,1996;Houtekamer,et al,1998)构造的集合初始扰动也能够较好地反映分析不确定性(Buizza,et al,2005)。中国科学家也先后开展了集合预报研究工作,并取得了一些令人鼓舞的成果(范新岗,1999;李泽椿等,2002;杨学胜等,2002;陈静等,2003)。钟科等(2004)利用 MM5 有限区域模式的物理集合构造方法,针对中国东部地区夏季异常洪涝天气气候特征,研究了物理集合的可行性。针对中国对流不稳定的暴雨天气系统,陈静等(2005)提出了一种具有中尺度运动特征的集合初始扰动新方案——异物理模态法,该方法产生的初值扰动场具有合理的中尺度环流结构,能够反映对流敏感区域的对流不稳定的预报不确定性,集合预报结果对控制预报具有明显改善。但是,BGM 与 SVs 方法对准确描写分析的不确定性依然具有一定的局限(Wei,et al,2003),而异物理模态法也仅在中尺度天气系统的研究中取得了较好效果。因此,集合预报初始扰动方

案仍然需要深入研究。

集合初始扰动方案的基本目的是产生互不相关的扰动初值,使得集合扰动协方差能够更加准确地表示初始时刻的分析误差协方差。因此,初始扰动表示的误差结构与扰动振幅是集合预报初始扰动研究的两个核心问题。误差结构反映了分析误差在其相空间分布的模态,而扰动振幅则体现了分析误差的大小应当与相应的预报误差相当,同时也直接影响预报集合离散度。BGM 方案采用一个常量调节因子,其初始扰动不能反映观测密度与精度的空间变化对分析扰动的影响,也难以反映对不同大小的预报误差方差的调整作用。Hamill 等(2000)进一步指出 BGM 改进方案中采用区域调节因子(rescaling)可能引入较大的虚假集合离散度噪音。观测扰动方案虽然可以吸收观测信息,但是其预报集合成员随着模式积分时间的延长容易造成集合离散度过小。根据集合卡尔曼变换(ETKF)理论(Bishop,et al,2001)发展而来 ETKF 初始扰动方案(Wang,et al,2003),利用集合子空间约束的变换矩阵将预报扰动变换为与卡尔曼滤波误差协方差更新方程一致的分析扰动,有效地弥补了 BGM 方案的缺陷,而且 ETKF 方案计算量非常小。Bishop 等(2003)在对理想系统的研究中指出,由于满足误差更新方程与误差传播方程,ETKF 初始扰动方案对最优资料同化方案的预报与分析误差协方差能够进行更为准确的描述,从而对预报与分析误差协方差的估计明显优于 BGM 集合方案。Wang 等(2003)对 BGM 与 ETKF 集合方案的比较结果表明 ETKF 方法对预报与分析误差方差的估计比前者明显更加准确。

中国集合初始扰动方案的研究还不是很成熟,而现在 GRAPES 全球数值预报系统的发展已经比较完备,其集合预报相关科学问题的研究也就亟待开展。本文在 ETKF 初始扰动方案研究的基础上,初步建立了 GRAPES 全球集合预报系统,并对初始扰动结构与扰动增长特征以及预报效果等进行了

分析。

2 集合卡尔曼变换初始扰动方法

集合卡尔曼变换(ETKF)最初是根据卡尔曼滤波理论发展的一种适应性观测研究方法,它可将预报与分析误差协方差矩阵用集合扰动近似表示出来,从而可以构造集合初始扰动。ETKF 初始扰动方案在方法上属于 BGM 概念的一种扩展,并克服了该方案中分析误差方差固定不变及其扰动难以保持正交性的不足。由于模式误差、观测误差不可能准确给定,从而得到的分析误差协方差也不可能完全精确,从这个意义上来看,ETKF 是一个次优(sub-optimal)的卡尔曼滤波方案(Daley, 1991)。相对于其他基于集合的卡尔曼滤波,ETKF 的预报误差协方差只是为了近似估计分析误差协方差,并不更新集合平均状态。

在集合预报中,定义 $\mathbf{X}^f$ 与 $\mathbf{X}^a$ 分别为相对于控制预报的预报扰动与分析扰动,即 $\mathbf{X}^f = (x_1^f - x_0^f, x_2^f - x_0^f \cdots x_K^f - x_0^f)$ 与 $\mathbf{X}^a = (x_1^a - x_0^a, x_2^a - x_0^a \cdots x_K^a - x_0^a)$, 其中 x_i^f 与 x_i^a ($i=1, 2 \cdots K$) 分别表示 K 个集合成员的预报与分析扰动的状态向量,下标 0 表示控制预报,则基于集合的分析和预报协方差矩阵由卡尔曼滤波公式可以表示为

$$\mathbf{P}^f = \mathbf{Z}^f \cdot (\mathbf{Z}^f)^T \quad (1)$$

$$\mathbf{P}^a = \mathbf{Z}^a \cdot (\mathbf{Z}^a)^T \quad (2)$$

这里 $\mathbf{P}^f$ 与 $\mathbf{P}^a$ 分别表示集合的预报与分析误差协方差矩阵,上标 T 表示矩阵转置,其中 $\mathbf{Z}^f = \mathbf{X}^f / \sqrt{K-1}$, $\mathbf{Z}^a = \mathbf{X}^a / \sqrt{K-1}$, K 为集合成员数。对于给定的一组集合预报扰动 $\mathbf{Z}^f$,通过卡尔曼滤波误差协方差更新方程

$$\mathbf{P}^a = \mathbf{P}^f - \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}^f \quad (3)$$

可以求解出分析扰动 $\mathbf{Z}^a$ 。方程(3)中的 $\mathbf{R}$ 为观测误差协方差矩阵, $\mathbf{H}$ 表示将预报格点值转化到观测站点的线性化的观测算子。ETKF 将预报扰动变换为分析扰动则可以表示为

$$\mathbf{Z}^a = \mathbf{Z}^f \cdot \mathbf{T} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{T}$ 为将预报扰动变换为分析扰动的集合子空间的变换矩阵。将式(1)与(2)代入到方程(3),可以求解出变换矩阵 $\mathbf{T}$ 为

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}(\mathbf{I} + \mathbf{C})^{-1/2} \quad (5)$$

其中矩阵 $\mathbf{C}$ 的列向量为 $(\mathbf{Z}^f)^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}^f$ 的特征向量,相应的特征值是对角矩阵 $\mathbf{I}$ 的非零元素。由于

$(\mathbf{Z}^f)^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}^f$ 是实对称矩阵,特征值为实数,且特征向量相互正交。ETKF 初始扰动方案产生的分析扰动在标准化观测空间具有正交性是它的一个重要属性。在方程(3)中,由于存在观测算子 $\mathbf{H}$ 与观测误差 $\mathbf{R}$ 的共同作用,误差方差的减少随观测密度与精度的空间分布而变化。因此,在最优资料同化方案中,对于给定的一组集合预报,如果预报扰动 $\mathbf{X}^f$ 的协方差矩阵等于真实预报误差协方差矩阵 $\mathbf{P}^f$,则变换的分析扰动 $\mathbf{X}^a$ 的协方差矩阵将严格等于真实的分析误差协方差矩阵。

虽然预报集合扰动之间关于集合平均(或控制预报)具有中心化特征,即 $\sum_{i=1}^K z_i^f = 0.0$,但并不能确

保分析扰动也具有中心化属性($\sum_{i=1}^K z_i^a \neq 0.0$)。为了既能保持分析误差协方差不变,同时又能确保分析扰动中心化,本文采用球面单形中心化方案(Wang, et al, 2004),方程(4)则变为

$$\mathbf{Z}^a = \mathbf{Z}^f \mathbf{T} \cdot \mathbf{C}^T \quad (6)$$

其中 $\mathbf{C}^T$ 为式(5)中矩阵 $\mathbf{C}$ 的转置矩阵。该中心化方案的优点在于当集合成员数相对偏少时,使得中心化后的集合扰动能够更好地保持初始扰动的原有属性。

通常预报模式状态空间的自由度远大于集合扰动成员数,而且没有考虑模式误差,因此方程(2)中由预报误差方差求得的基于集合的分析误差方差小于实际的分析误差。为了避免该问题,采用放大因子方法(inflation factor, Wang, et al, 2003)以有效确保观测空间全球 12 h 预报的集合方差与全球控制预报误差方差保持一致,亦即

$$\mathbf{Z}_i^a = \mathbf{Z}_i^f \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{C}_i^T \cdot \Pi_i \quad (7)$$

这里 Π_i 为 t_i ($i=1, 2 \cdots$, 表示不同循环时刻)时刻的标量放大因子,定义为

$$\Pi_i = \Pi_{i-1} \sqrt{\alpha_i} = \sqrt{\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_i} \quad (8)$$

其中参数 $\alpha_i = (\bar{\mathbf{d}}_i^T \bar{\mathbf{d}}_i - N) / \sum_{k=1}^{K-1} \lambda_i$, $\bar{\mathbf{d}}_i$ 为 t_i 时刻观测值与观测空间的模式预报值之差,即新息向量(innovation), K 为集合成员数,而 λ_i 为式(5)中矩阵 $\mathbf{T}$ 的对角元素, N 是有效观测资料个数。值得注意的是,式(8)中引入的参数 α_i 是在预报误差与观测误差无关的假定条件下,对全球观测系统在统计意义上建立的求解关系。当 12 h 集合扰动方差与控制

预报误差方差不相等时,需要通过参数 α_i 对集合扰动方差进行强迫调整,以使得集合扰动方差与控制预报误差方差在全球观测空间中保持一致。

ETKF 初始扰动方法利用观测资料的信息,依据误差协方差更新方程对集合扰动模态进行旋转并调整扰动大小,建立了分析扰动和观测资料的空间分布及其质量之间的关系,对于偏大的集合方差适当减小,而相对较小的集合方差调整幅度则较小。因此,ETKF 集合初始扰动方案有效地避免了 BGM 集合中分析误差方差由于缺乏对观测信息的响应而固定不变的估计以及难以保证观测空间的分析误差方差正交的缺陷。

3 集合预报试验设置

3.1 模拟观测资料

为简化问题,在集合预报系统循环过程中,观测系统的空间分布假定保持不变,并采用简化的模拟

观测系统研究 ETKF 初始扰动方案的效果及观测对预报误差减少的响应。假定该模拟观测系统仅包含 850、500 与 200 hPa 3 个层次的风场 u 、 v 与温度 T 3 个变量,将 00:00 与 12:00 UTC 两个时次、水平分辨率为 0.5625° 的业务 T213 分析场水平内插到全球 5186 个观测站点(图 1)作为模拟探空观测资料。虽然这种设置与实际观测资料不一致,但是并不影响对 ETKF 初始扰动方案数值试验结果的研究。由于业务 T213 分析场已包含其初猜场的动力学约束与部分实际观测资料的信息,因此 ETKF 方案中观测误差值小于业务三维变分资料同化中设定的观测误差,且假定观测误差互不相关,使得观测误差协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 为对角矩阵。

3.2 初始扰动的构造

试验采用 GRAPES 全球数值预报模式与三维变分资料同化系统,预报模式与资料同化系统的水平空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向分别为 31 层地形

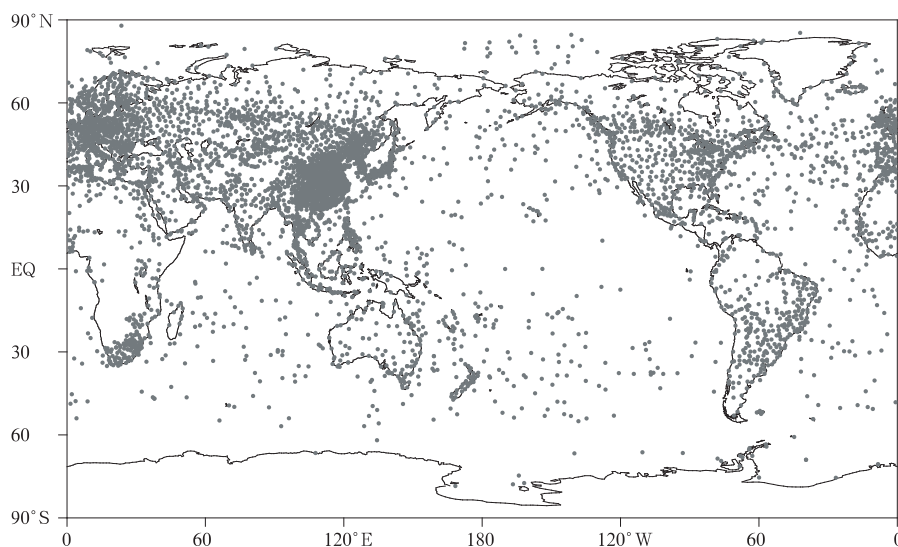


图 1 模拟观测站点分布(黑点表示观测站位置)

Fig. 1 The network of observation stations (black dots) used in simulation

追随坐标的模式面与 17 层等压面。以业务 T213 模式的 12 h 预报为背景场,同化探空、地面、船舶报与航空报等资料后的分析场作为全球预报模式的初值,制作 96 h 常规预报作为集合预报的控制预报。通过对三维变分资料同化系统的控制变量加入随机扰动,构造一组经过动力、物理约束的集合预报启动时刻的初始扰动。利用该初始扰动经式(5)计算出变换矩阵,并通过式(8)求出放大因子,然后由式(7)

得到经过 ETKF 更新的下一时刻的集合分析扰动。将分析扰动与控制预报分别相加,以此作为各集合成员预报启动时刻的模式初值,制作 96 h 集合预报,随后由前一时刻集合成员的 12 h 预报形成新的 ETKF 集合分析扰动并与控制预报构成初始扰动,进行 ETKF 集合预报循环,时间间隔为 12 h,集合预报时效为 96 h。集合预报试验采用包括控制预报与 13 个集合扰动共 14 个集合成员,试验时间为

2006年7月2日—8月30日,每日分别在00:00与12:00 UTC两个时刻启动预报。预报循环在最初的一段时间内,由于三维变分资料同化系统构造的集合预报最初启动时刻的扰动与ETKF产生的初始扰动不完全协调,使得参数 α 值表现不稳定,通常会持续3—4 d的自动适应调整时间。适应过程结束后,参数值通常在1上下振荡,集合初始扰动也趋于合理稳定。为了消除最初一段时间初始扰动适应过程的影响,文中仅针对从7月10日开始的52 d的集合预报结果进行分析。

4 集合初始扰动分析

初始扰动的质量直接影响集合预报的预报效果。初始扰动能否准确地反映出分析误差方差分布的主要特征模态与合适的大小,是衡量初始扰动方案效果的标准之一。好的初始扰动方案能够捕获到可能快速增长的分析误差,而且每个初始扰动在模式数值积分过程中应该保持合适的集合离散度,以确保预报集合最大可能地包含实际大气状态的可能分布。

4.1 观测对集合离散度的影响

ETKF初始扰动方案的主要特征是在集合成员足够多时,集合方差能够准确反映出分析误差方差与预报误差方差对观测密度变化的响应。为了衡量观测对集合方差的影响,采用Palmer等(1998)提出的适合于天气预报与资料同化研究的集合方差总能

量进行分析。对于一个扰动,定义总能量为 $\frac{1}{2}[u'^2(i,j,k) + v'^2(i,j,k)] + \frac{c_p}{T_r}T'^2(i,j,k)$ 其中 u' 、 v' 与 T' 分别为水平风场与温度的扰动, c_p 为干空气定压比热, T_r 是参考温度, i 、 j 、 k 分别是格点的水平与垂直维数(Wei, et al, 2003; Wang, et al, 2003)。首先计算出每个扰动成员在各垂直层的总能量,然后求出集合成员与垂直方向的平均总能量。图2给出了垂直平均的ETKF集合分析扰动总能量离散度的全球分布。由图2可以看出,北半球分析总能量离散度的扰动振幅相对较大,南半球在东西方向上则近似于平直的带状分布。南北纬30°之间的热带地区总能量离散度最小,表明该区域的预报误差在12 h的预报时间内仅有很小的增长。分析总能量离散度与观测资料的分布区域(图1)有较好的吻合,表明ETKF集合初始扰动方案能够根据观测资料密度信息通过调节因子适当地调整集合方差,使得初始扰动方差能够准确反映分析误差方差的特性。如本文引言所述,BGM集合的调节因子是从气候资料中经验统计得到,只能反映分析误差方差的长时间平均状态,不受观测资料的影响,因此其分析扰动难以准确体现分析误差方差的属性。而ETKF集合能够吸收观测资料空间变化信息,调整观测对集合分析误差方差的影响,从而改善集合初始扰动的质量。

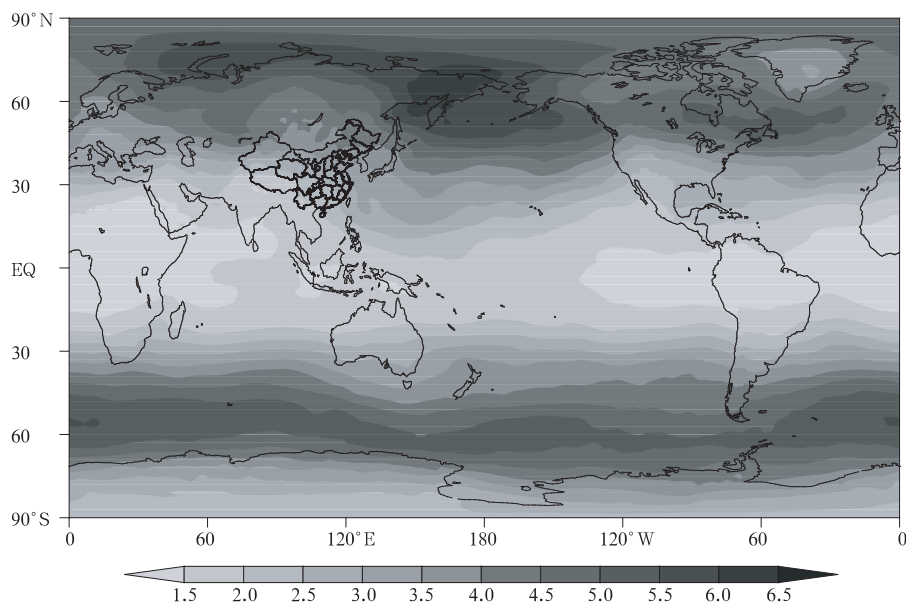


图2 垂直平均的集合分析扰动能量离散度(单位:J/kg)的全球分布

Fig. 2 Global distribution of the vertically averaged energy spread (unit: J/kg) of ensemble analysis perturbations

图 3 是分析(实线)与 12 h 预报(虚线)扰动总能量离散度以及调节因子随纬度(图 3a)和高度(图 3b)的变化。图 3a 中斜压性相对较弱的热带地区能量离散度较小,而南北半球中高纬度的离散度则相对较大,并且在南北纬 60° 预报与分析扰动离散度的偏差比中低纬度明显增大,与图 2 中水平分布特征一致。为了分析集合总能量离散度的垂直分布状况,计算了每个垂直层上所有格点的总能量平均值。图 3b 给出了分析(实线)与预报(虚线)集合扰动的总能量离散度以及分析与 12 h 预报扰动的比值即调节因子(点线)的垂直分布。显然,在 500—200

hPa 的高度上,分析与预报扰动的总能量离散度相对较大,这与 Wei 等(2006)的试验结果类似,而 850 hPa 以下,从低层向高层逐渐减小,二者之间的差异也变得较大。图 3b 中平均的调节因子(点线)除低层 850 hPa 以下略偏小外,其他层次上基本相当。这可能与 GRAPES 预报模式近地面层的相关配置有关,有待于进一步分析研究。ETKF 初始扰动方案利用与资料变分同化中信息向量(innovation)相结合的放大因子方法,对每一个时次的分析扰动进行合理调整,使得集合初始扰动之间得以始终保持有合适的离散度。

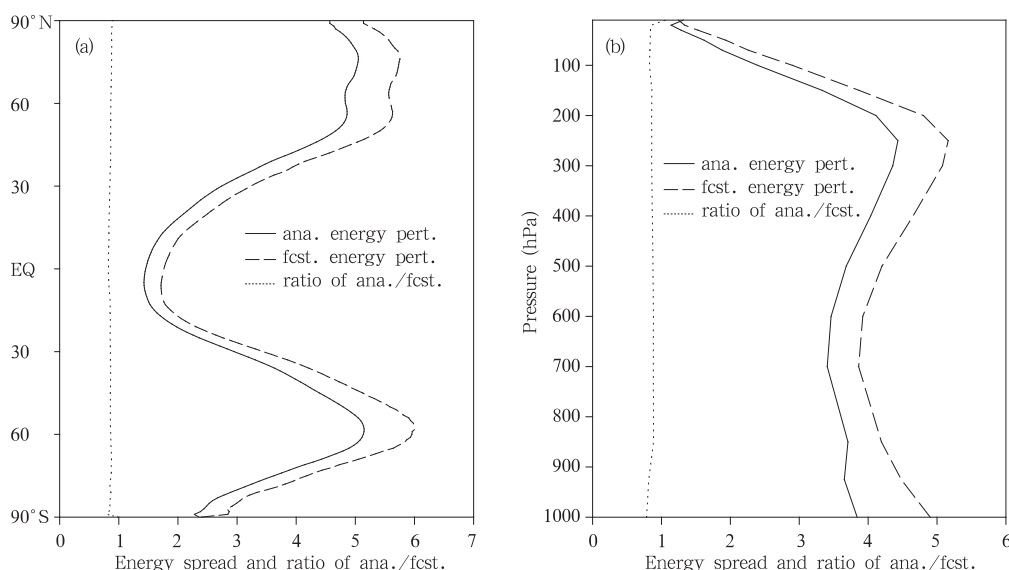


图 3 52 d 平均的集合扰动总能量离散度(单位:J/kg)的分布

(实线:分析场;虚线:12 h 预报场)和分析与 12 h 预报扰动的比值(点线)(a. 经向分布,b. 垂直分布)

Fig. 3 Distributions of the energy spread (unit: J/kg) of ensemble perturbations (solid line: analysis; dashed line: 12-h forecast) and the ratio of analysis/12-hforecast perturbations (dotted line)

All the values are averaged over 52 d. (a. meridional distribution; b. vertical distribution)

4.2 集合扰动的方差分布

图 4 给出了 GRAPES 集合在整个试验期间时间平均的 14 个集合成员的分析(图 4a)与 12 h 预报(图 4b)扰动的特征值在相应特征方向的分布。对于预报与分析误差协方差矩阵,每个特征向量对应的特征值分别表示时间平均的集合方差。由于 14 个初始集合成员关于控制预报中心化,显然只有 13 个相互正交、线性无关的特征向量。如图可知,分析扰动的 13 个特征值基本相当,而 12 h 预报扰动的第一个特征值即最大值为 30936,而最小值是 14292。显然,分析扰动较 12 h 预报扰动的特征值

分布更加平缓。由方程(6)与(5)可知,预报扰动先由矩阵 C 实施旋转,再通过对角矩阵 $(I+I)^{-1/2}$ 调整,最后再经 C^T 旋转得到变换后的分析扰动,而方程(5)中的变换矩阵是通过具有滤波功能的最优资料同化方案的误差更新方程(3)求解得到。因此,在标准化观测空间,分析误差协方差矩阵比预报误差协方差矩阵的特征值沿特征向量的分布平缓。表明 ETKF 集合能够将误差方差平均分配到集合子空间的全部特征方向,从而在集合子空间所有正交特征方向上解释更多的集合预报误差方差,这也是 ETKF 方案明显优于其他初始方案的一个重要特征。

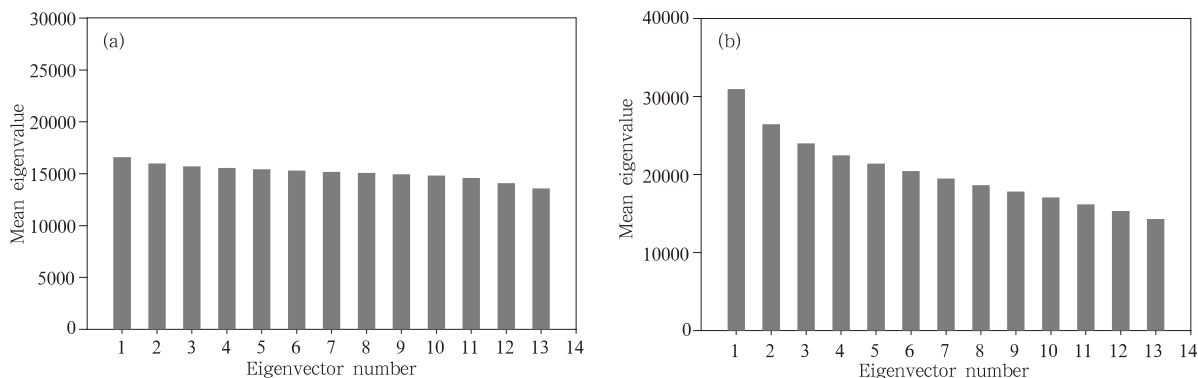


图4 标准化观测空间内,时间平均的误差协方差矩阵的特征值沿不同特征方向的分布
(a. 分析, b. 12 h 预报)

Fig. 4 The time-averaged eigenvalue distributions along different eigen-directions of covariance matrices in the normalized observational space (a. Analysis; b. 12-h forecast)

4.3 集合扰动增长特征

对于线性动力传播的预报误差,集合成员初始扰动的线性组合可以表示出预报误差协方差主特征向量的初始结构。而对于实际非线性动力预报系统而言,集合预报也能够比较准确地识别出由快速增长的分析误差引起的较大预报误差。合适的扰动增长不仅能够反映初始方案捕获扰动分析误差主要模态的能力,也能够影响集合离散度的大小。因此,集合扰动增长是反映集合初始扰动属性的一个重要因素。Palmer 等(1998)研究指出集合空间的总能量模态奇异向量的增长可以合理的近似反映预报误差方差增长的特征。参照 Bishop 等(1999)与 Wang 等(2003)的方法,计算了 GRAPES 集合子空间增长最快的总能量最大增长率与集合扰动成员平均的总能量增长率。增长最快速的总能量模态的时间平均为总能量最大增长率,而集合子空间所有增长模态的时间平均值作为平均的总能量增长率。

由整个试验期间平均的集合扰动总能量最大增长率与集合平均增长率随预报时效的变化(图5)可以看出,全球平均的集合扰动总能量最大增长率(实线)在整个预报时效内均具有明显的增长趋势,只是24 h之前的增长幅度相对偏小,其后则明显增大(图5a)。这说明 GRAPES 全球预报模式的 ETKF 初始扰动方案具备捕获快速增长的分析误差特征模态的能力,能够反映预报误差的增长特征,并确保具有合适的集合离散度。从不同区域来看,24 h之前北半球(长虚线)与南半球(点虚线)的增长速率基本一致,但24 h后北半球的最大增长率逐渐低于全球

平均值,而南半球则比全球平均相对偏大。对于全球集合预报,已有的试验结果(Wang, et al, 2003)显示,集合扰动增长率对初始扰动振幅具有较强的敏感性,扰动增长率随初始扰动大小的增加而减小。由于南半球的观测稀少(图1),导致其初始扰动总体上偏小,这可能是南北半球最大增长率不一致的重要原因之一。图5b给出了14个集合成员平均的总能量增长率,它从总体上反映了集合扰动的增长特性。显然,集合平均的总能量增长率的整体趋势与最大增长率基本一致,使得集合离散度在预报时效内得到适当地维持。因此,ETKF 初始扰动不仅准确地捕获到快速增长的分析误差模态,使得集合子空间中初始扰动适当增长,也使集合离散度能够维持在适当的范围内。值得注意的是,上述总能量增长率是在预报误差为线性增长的假定条件下计算的,而通常认为2 d以内的预报误差为线性增长,因此,图5中48 h后只是总能量增长率的近似反映。

4.4 集合扰动与预报误差相关分析

传统的集合预报检验统计不但受集合生成方案的影响,也会受到预报模式与分析方案质量的制约。扰动与误差相关分析(PECA, Wei, et al, 2003)通过集合扰动解释预报误差方差的能力来衡量初始扰动的性能,直接比较集合扰动与预报误差,减少了由分析质量引起的初始误差的影响,是评价集合预报初始扰动性能的更加合理的方法。平均来讲,集合扰动与预报误差的相关值越大,就说明该集合扰动更能够描述大气真实状态。将控制预报与分析的差作为预报误差,对集合扰动与预报误差求相关,得到相

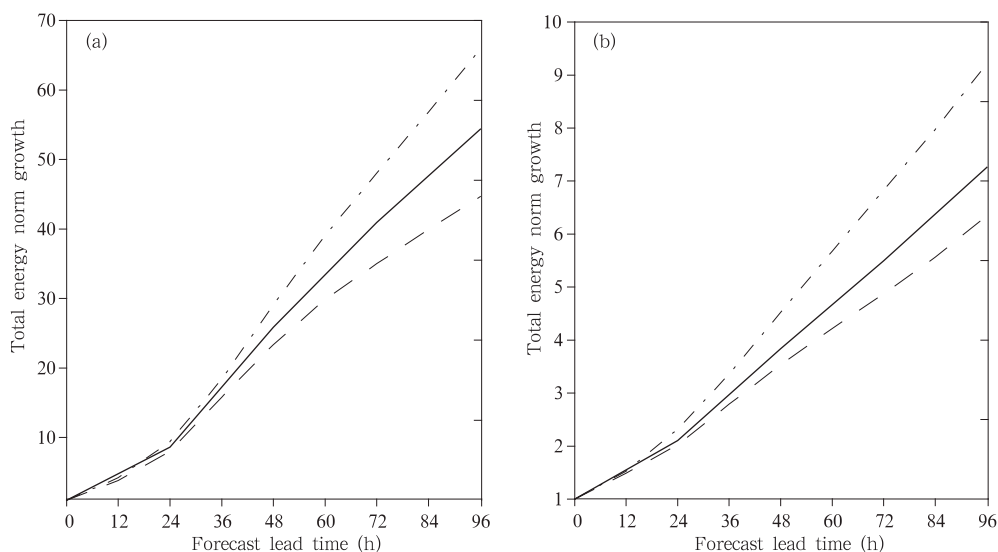


图5 集合子空间的总能量随预报时间的增长

(a. 总能量最大增长, b. 集合成员平均的总能量增长; 实线表示全球区域, 长虚线表示北半球, 点虚线为南半球)

Fig. 5 The total energy norm growth in the ensemble subspace as a function of lead time

(a. the fastest growth; b. the average total energy norm growth over 14 perturbations; Solid lines denote the global, and dashed and dash-dot lines denote the Northern and Southern Hemisphere, respectively)

关系数的集合平均即为 PECA 值。

由 14 个集合成员不同预报时效的扰动与相应时次的预报误差, 计算了不同区域集合平均的 PECA 值(图 6), 其中预报误差为控制预报与分析的差。由图 6 可知, 48 h 预报时间内北半球(短虚线)的 PECA 明显大于全球(实线)与南半球(长虚线), 尤其是 24 h 以前更加明显, 南半球的 PECA 明显偏低。这表明对于北半球来说, ETKF 初始扰动方案

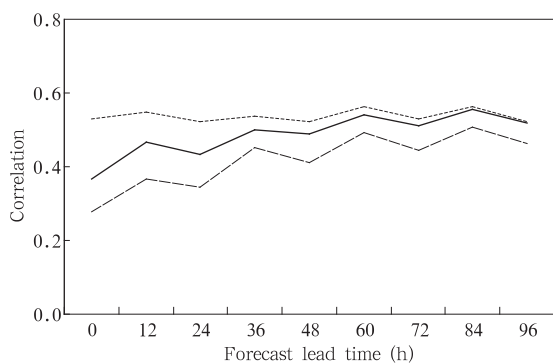


图6 52 d 平均的 14 个 ETKF 集合扰动 PECA 值随预报时间的变化

(实线表示全球, 短虚线为北半球, 长虚线为南半球)

Fig. 6 The averaged PECA values for ETKF ensembles from 14 perturbations as a function of lead time over 52 d

(Solid lines denote the global, and dashed and dash-dot lines denote the Northern and Southern Hemisphere, respectively)

产生的 GRAPES 集合成员比南半球有着更好的质量。这是由于南半球观测资料分布稀疏, 且观测质量相对较差, 从而影响了初始扰动的性能。在 96 h 的预报时效内, 北半球的 PECA 变化相对较小, 而南半球则存在明显起伏状态, 但总体上是逐渐增加的趋势。显然, 由于受到南半球的影响, 全球区域的 PECA 预报起始时相对较低, 但随预报时间的延伸逐渐增加。上述分析表明, ETKF 初始扰动方案构造的 GRAPES 全球集合扰动成员在 96 h 预报时效内基本上能够较好地描述大气真实状态的分布。

5 集合预报质量检验分析

5.1 副热带高压预报个例分析

为进一步检验集合的预报效果, 采用与前文相同的试验设置, 利用模拟观测资料针对 2006 年 7 月 22 日 00:00 UTC 副热带高压的 96 h 集合预报进行分析。图 7 是 14 个集合成员 500 hPa 的 5880 gpm 等值线 72 h 预报, 时间间隔为 12 h。由图 7 可以看出, 各个预报时次的集合平均相对于真实大气, 总体上都优于单一控制预报, 尤其是西伸北抬副热带高压脊位置的预报。尽管简单的集合平均与真实状态仍然存在一定的差异, 但的确是有些集合成员比较准确地预报出了脊线的位置及其移动趋势。36 h 以后的预报中集合平均优于单一控制预报质量表现的更为显著。因此, ETKF 集合预报基本上能够有

效地描写出预报对于真实大气可能状态的概率分布。预报初始场(00:00 UTC)具有较为合理的集合离散度,集合平均与真实场比较接近。另外,初始场的集合平均与控制预报的等值线基本一致,表明了球面单形中心化方案的有效性。随着预报时间的延伸,集合成员之间的差异逐渐增大,尤其是天气系统

不稳定区域,但并没有无序发散,集合成员的预报误差增长也控制在合理范围内。而 96 h 预报(图略)的集合离散程度明显过大,可以认为超越了集合预报合理的离散度,使得预报基本失去意义。显然,这与集合成员的初始扰动质量有关,而预报模式性能以及模式初值也是主要原因之一。

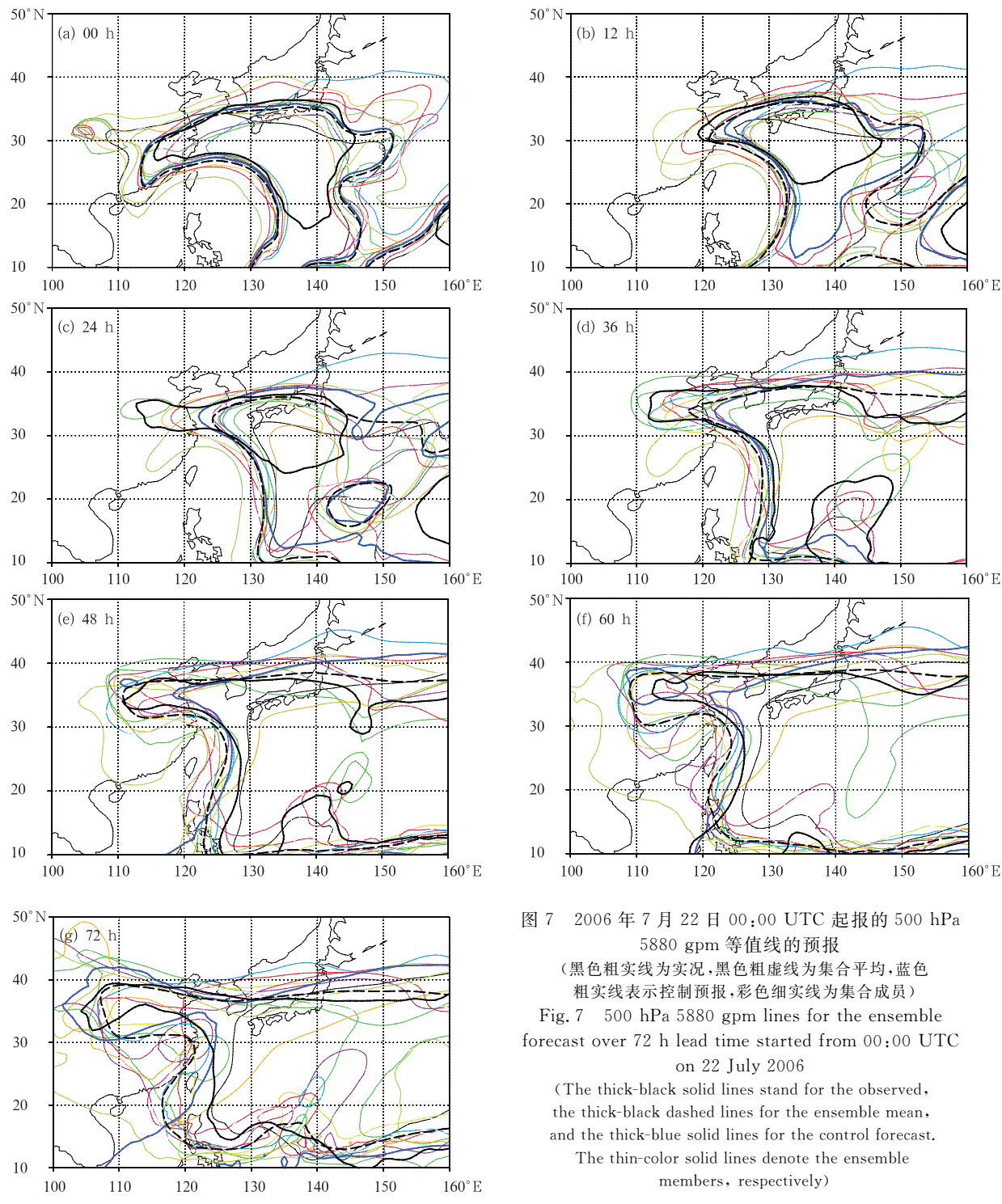


图 7 2006 年 7 月 22 日 00:00 UTC 起报的 500 hPa 5880 gpm 等值线的预报
(黑色粗实线为实况,黑色粗虚线为集合平均,蓝色粗实线表示控制预报,彩色细实线为集合成员)
Fig. 7 500 hPa 5880 gpm lines for the ensemble forecast over 72 h lead time started from 00:00 UTC on 22 July 2006

(The thick-black solid lines stand for the observed, the thick-black dashed lines for the ensemble mean, and the thick-blue solid lines for the control forecast. The thin-color solid lines denote the ensemble members, respectively)

综合图 7 可知,对于 ETKF 初始扰动方案的 GRAPES 全球集合预报,预报误差的合理增长说明初始扰动能够捕获到快速增长的分析误差模态,14 个扰动成员基本上反映了预报对于真实大气的不确定性状态的描述。

5.2 全球 500 hPa 高度场异常相关统计检验

图 8 是试验期间 52 d 平均的北半球 500 hPa 高度场异常相关系数,显然,在 96 h 预报时效内,从 500 hPa 高度异常相关系数的检验来看,集合平均的质量优于单一控制预报,而且随预报时间的延长显示出逐渐增加的趋势。尽管这种预报技巧的改善在数值上并不太明显(集合数相对偏少是影响集合预报质量的主要原因之一),但已经初步表现出了集合预报具有的优势。这不仅显示出 GRAPES 全球集合预报一定的实际预报效果,也进一步表明 ETKF 初始扰动能够较好地描述初始时刻的分析误差结构特征,使得预报扰动保持合理增长。

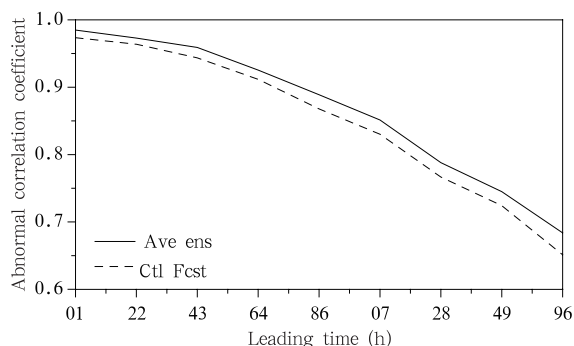


图 8 52 d 平均的北半球 500 hPa 高度场异常相关系数

(实线表示集合平均预报,虚线表示控制预报)

Fig. 8 Averaged anomaly correlation coefficient of 500 hPa height over the 52 d for the Northern Hemisphere

(The solid line denotes averaged ensemble forecast, the dashed line denotes the control forecast)

6 结论与讨论

本文基于集合卡尔曼变换(ETKF)初始扰动方法,采用模拟观测系统的方式,并引入相对简单、有效的中心化方案,发展了 GRAPES 全球集合预报系统的初始扰动方案。试验结果分析表明,GRAPES 集合初始扰动在北半球可以反映出分析误差方差的主要特征模态分布,扰动大小合理,并能够在 96 h 的预报时效内保持良好的离散度。南半球由于观测

较少,扰动效果略差;扰动增长基本与预报误差的增长特征一致,集合方差可以正确地解释更多的预报误差方差;集合预报成员能够合理的表示出实际大气可能的发展状态。14 个集合成员的预报试验结果显示基于 ETKF 初始扰动方案的 GRAPES 全球集合预报系统具有良好的发展潜力与应用价值。

集合成员数对初始扰动有着直接的影响,而本文仅利用相对较少的集合扰动成员进行了实验研究。由于集合成员数的限制,在集合子空间内的变换矩阵很难完全准确地反映分析误差的特征分布模态,从而限制了 ETKF 初始扰动方案的性能。显然,更多的集合成员应该能够充分体现 ETKF 集合初始扰动方案的优势。

References

- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon Wea Rev*, 129:420-436
- Bishop C H, Reynolds C A, Tippett M K. 2003. Optimization of the fixed global observing network in a simple model. *J Atmos Sci*, 60:1471-1489
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 56:1748-1765
- Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al. 2005. A comparison of the ECMWF, MSC and NCEP global ensemble prediction systems. *Mon Wea Rev*, 133:1076-1097
- Buizza R, Palmer T N. 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J Atmos Sci*, 52:1434-1456
- Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of south China heavy rain and the ensemble simulations. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 61(4): 432-446
- Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction. *Chinese J Atmos Sci(in Chinese)*, 29: 717-726
- Daley R. 1991. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 457pp
- Fan Xingang. 1999. A global study on ensemble prediction method. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 57(1):74-83
- Hamill T M, Snyder C, Morss R E. 2000. A comparison of probabilistic forecasts from bred, singular vector, and perturbed observation ensembles. *Mon Wea Rev*, 128:1835-1851
- Hoffman R N, Kalnay E. 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 35A:100-118
- Hollingsworth A. 1980. An experiment in Monte Carlo forecasting procedure. ECMWF Workshop on stochastic dynamic forecasting, ECMWF

- Houtekamer P L, Lefaivre L, Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon Wea Rev*, 124: 1225-1242
- Houtekamer P L, Mitchell H L. 1998. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon Wea Rev*, 126:796-811
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon Wea Rev*, 102: 409-418
- Li Zechun, Chen Dehui. 2002. The development and application of the operational ensemble prediction system at national meteorological center. *Quart J Appl Meteor(in Chinese)*, 13(1):1-15
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122:73-119
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 55:633-653
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer Meteor Soc*, 74:2317-2330
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon Wea Rev*, 125:3297-3319
- Wang X, Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes. *J Atmos Sci*, 60:1140-1158
- Wang X, Bishop C H, Julier S J. 2004. Which is better, an ensemble of positive/negative pairs or a centered spherical simplex ensemble? *Mon Wea Rev*, 132:1590-1605
- Wei M, Toth Z. 2003. A new measure of ensemble performance: perturbations versus error correlation analysis (PECA). *Mon Wea Rev*, 131:1549-1565
- Wei M, Toth Z, Wobus R. 2006. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. *Tellus*, 58A:28-44
- Yang Xuesheng, Chen Dehui, Leng Tingbo. 2002. The comparison experiments of SV and LAF initial perturbation techniques used at the NMC ensemble prediction system. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 13(1):62-66
- Zhong Ke, Wang Hanjie. 2004. The physical ensemble technique of the regional climate simulation. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 62(6):776-781

附中文参考文献

- 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验. *气象学报*, 61(4):432-446
- 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究. *大气科学*, 29:717-726
- 范新岗. 1999. 集合预报方法的全局研究. *气象学报*, 57(1):74-83
- 李泽椿, 陈德辉. 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. *应用气象学报*, 13(1):1-15
- 杨学胜, 陈德辉, 冷亭波, 等. 2002. 时间滞后与奇异向量初值生成方法的比较试验. *应用气象学报*, 13(1):62-66
- 钟科, 王汉杰. 2004. 区域气候模拟研究中的物理集合技术. *气象学报*, 62(6):776-781