

张涵斌, 陈静, 汪骄阳, 等. 2020. ETKF初值扰动方法中真实观测及扰动调节因子研究 [J]. 大气科学, 44(1): 197–210. ZHANG Hanbin, CHEN Jing, WANG Jiaoyang, et al. 2020. Study of the Application of Real Observation Data and a Rescaling Factor in Ensemble Transform Kalman Filter Initial Perturbation Method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 197–210. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1908.18262

ETKF初值扰动方法中真实观测及扰动调节因子研究

张涵斌¹ 陈静² 汪骄阳³ 董颜⁴

1 北京城市气象研究院, 北京 100089

2 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

3 中国人民解放军96164部队58分队, 浙江省金华321021

4 北京市气象服务中心, 北京 100089

摘要 目前国家气象中心业务GRAPES区域集合预报系统中集合变换卡尔曼滤波(ETKF)方法采用的是模拟观测信息, 为进一步完善ETKF方法, 拟对ETKF初值扰动通过引入真实探空观测资料, 使扰动场能够代表真实观测的不确定信息, 改善区域集合预报技巧。真实观测资料的引入会使得每日的观测数目和分布发生变化, 这对ETKF方法而言可能会引起扰动振幅的不稳定, 因此在引入真实观测资料的基础上设计了新的扰动振幅调节因子, 通过格点空间中离散度和均方根误差关系来对初值扰动振幅进行自适应调整。从初值扰动结构、概率预报技巧以及降水预报效果等方面对比分析了基于模拟观测、真实观测以及真实观测结合新型调节因子的ETKF方案的差异, 结果表明: 真实探空资料能够有效应用于GRAPES区域集合预报系统中, 真实观测资料与模拟观测资料相比较为稀疏, 可以获得更大量级的初值扰动振幅; 真实观测资料有助于提高区域集合的离散度, 但对集合预报准确度以及概率预报结果的提高有限, 对于降水预报效果提高也有限; 新型的扰动振幅调节因子可以有效获得稳定的初值扰动振幅, 并保持ETKF扰动结构, 真实观测资料与扰动振幅自适应调节因子相结合, 可以有效提高区域集合的概率预报结果, 并有效提高降水预报效果。

关键词 区域集合预报 ETKF (Ensemble transform Kalman filter) 真实观测 扰动调节因子

文章编号 1006-9895(2020)01-0197-14

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1908.18262

Study of the Application of Real Observation Data and a Rescaling Factor in Ensemble Transform Kalman Filter Initial Perturbation Method

ZHANG Hanbin¹, CHEN Jing², WANG Jiaoyang³, and DONG Yan⁴

1 *Institute of Urban Meteorology, Beijing 100089*

2 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *The 58th Unit of the 96164 Force of the Chinese People's Liberation Army, Jinhua, Zhejiang 321021*

4 *Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089*

Abstract At present, ETKF (ensemble transform Kalman filter) method used in the operational GRAPES (Global/

收稿日期 2018-12-03; 网络预出版日期 2019-06-14

作者简介 张涵斌, 男, 1987年出生, 副研究员, 主要从事集合预报研究。E-mail: zhb828828@163.com

通讯作者 陈静, E-mail: chenjing@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目2018YFF0300103、2018YFC1507405, 国家自然科学基金项目41605082

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFF0300103, 2018YFC1507405), National Natural Science Foundation of China (Grant 41605082)

Regional Assimilation Prediction Enhanced System) regional ensemble prediction system of National Meteorological Center uses pseudo observation information, and the number and distribution of observations are fixed. To improve the ETKF method, real observation data are introduced into the ETKF process. The real observational radio-sounding data enable the perturbation field to represent uncertainty information about the observational state. Considering that the number and distribution of real observational data change daily, this can cause instability in the perturbation amplitude for the ETKF calculation. Therefore, the authors introduce a new self-adjustment amplitude rescaling factor. In this study, the authors analyzed ETKF schemes based on pseudo observations, real observations, and real observation plus the new rescaling factor and compared them in terms of their perturbation characteristics, ensemble verifications, and precipitation forecast skills. The results show that real sounding data can be effectively applied to the GRAPES regional ensemble forecasting system. Compared with pseudo observation data, real observation data is sparse, so large initial perturbation amplitudes can be obtained. The use of real observation data can help to improve the spread of the regional ensemble, but the improvements in the ensemble prediction accuracy and probability forecast skill are limited, as is the improvement in the precipitation prediction. The authors designed a new perturbation-amplitude rescaling factor to adaptively adjust the initial perturbation amplitude based on the spread and root-mean-square-error relationship in the grid space. Our investigation of the adaptive rescaling factor for adjusting the perturbation amplitude shows that this new rescaling factor can effectively obtain a stable initial perturbation amplitude and maintain the ETKF-generated perturbation structure. Since the real-observation-based ETKF scheme exhibits over-spread characteristics and limited improvement with respect to the pseudo-observation-based ETKF, the use of real observation data combined with the adaptive rescaling factor can effectively improve the skill of the regional ensemble in terms of the probabilistic forecast results while also effectively improving the precipitation forecasting skill.

Keywords Regional ensemble forecast, ETKF (Ensemble transform Kalman filter), Real observation, Rescaling factor

1 引言

数值天气预报正在逐渐由确定性预报向概率预报转变 (Epstein, 1969; Leith, 1974), 集合预报技术为概率预报提供了一个有效工具, 已经在国内外各大业务中心普遍应用 (Toth and Kalney, 1993, 1997; Molteni et al., 1996; Houtekamer et al., 1996; Bowler et al., 2008)。近年来针对中小尺度强天气现象的短期区域集合预报研究已逐渐成为研究热点。不同于大尺度天气现象, 中小尺度大气运动发生、发展的动力和热力机制更为复杂, 因此中小尺度天气现象的预报不确定性更加难以把握, 针对此类中小尺度天气进行概率预报的区域集合预报技术需要不断发展和完善 (陈静等, 2005)。

在区域集合预报研究中, 如何获得合理的初值扰动是一个研究难点, 目前国际上较为流行的方法是动力降尺度初值扰动, 该方法由于较为简便易行, 且能够产生较好的效果, 因此在国内外很多业务中心得到了采用 (Marsigli et al., 2005; Frogner et al., 2006; Bowler et al., 2008), 但该方法的局限性是无法在初始时刻产生充足的小尺度扰动结构, 因此很多学者尝试单独为区域集合预报产生与

区域模式分辨率相一致的初值扰动, 如增长模繁殖法 (Breeding, Toth and Kalney, 1993)、集合变换卡尔曼滤波法 (ETKF, Wang and Bishop, 2003) 等直接为区域集合预报产生扰动 (Stensrud and Fritsch, 1994; Stensrud et al., 1999; Du et al., 2003; Walser et al., 2006; Bishop et al., 2009; Bojarova et al., 2011), 此类方法能够在初始时刻即产生足够的小尺度扰动信息, 但缺点是此类单独为区域集合产生的扰动与侧边界扰动往往产生不协调, 引起虚假波动发展, 因此目前很多学者开展了多尺度混合初值扰动的研究, 即将全球集合预报动力降尺度初值扰动和区域版本的 Breeding、ETKF 等方法相结合, 来为区域集合预报生成初值扰动, 此种方法可以获得充分的大尺度和小尺度扰动信息, 并与侧边界扰动协调一致 (Caron, 2013; Wang et al. 2014; Zhang et al. 2015a)。

ETKF 方法在理论上是目前构造集合扰动较为合理的方案之一, 可在观测空间产生等概率分布的初值扰动场, 在一定程度上弥补 Breeding 方法的不足 (Wang and Bishop, 2003; Wang et al., 2004; Bowler and Mylne, 2009; 马旭林等, 2008)。ETKF 初值扰动方法的优势是引入了观测资料, 使扰动可

以体现分析场中观测的不确定性。考虑到真实观测资料站点较少，扰动振幅容易产生不稳定，Wang and Bishop (2003) 对 ETKF 方法进行了简化，将模式的分析场插值到观测站点（其观测站点的数量和分布都是固定的）来获得模拟观测资料进行初步研究，结果也表明此种设置下 ETKF 方案优于 Breeding 方案。此后多名学者尝试对 ETKF 方法进行应用及改进，智协飞等 (2015) 分别采用 ETKF 方法和 Breeding 方法对台风“苏拉”进行预报试验，结果表明 ETKF 对台风路径的预报效果更优；Wei et al. (2006) 尝试对 ETKF 引入真实观测资料，但是引入真实观测资料后，原有的调节因子方案对扰动振幅的调整存在问题，需要进一步改进。黄红艳等 (2016) 将 ETKF 方法与多物理过程结合，通过物理过程扰动调节预报扰动从而改进 ETKF 分析扰动，结果表明多物理 ETKF 能有效提高预报效果。

目前国家数值预报中心区域集合预报系统 GRAPES-MEPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Mesoscale Ensemble Prediction System) 经过多年的发展已具备较好的应用效果 (张涵斌等 2014; Zhang et al, 2015b)，而 ETKF 方法一直为 GRAPES-MEPS 所采用 (田伟红和庄世宇, 2008; 龙柯吉等, 2011)。最新版本的 GRAPES-MEPS V2.0 初值扰动采用多尺度混合方法，其中大尺度扰动部分由 T639 全球集合动力降尺度扰动提供，小尺度扰动部分则由 ETKF 方法提供 (Zhang et al, 2015a)。目前系统中 ETKF 算法的观测资料依旧采用模拟观测，鉴于业务中可以获得多种探空及地面观测，对 ETKF 方法引入真实观测资料具备较好的客观条件，有必要尝试真实观测资料在 ETKF 方法中的应用效果，另外目前系统的检验效果有待提高，从初值扰动的角度提高区域集合的预报技巧也是一项关键的研究内容。

本文尝试对 GRAPES-MEPS 系统的 ETKF 算法引入真实观测资料，以期使分析扰动更好地代表真实分析场中观测带来的不确定性；此外观测资料的分布和精度对于 ETKF 方法中的调节因子具有直接影响，当真实观测资料逐日变化，势必会影响扰动振幅的稳定性，因此需要在真实观测的基础上进一步开展新型扰动振幅调节因子的研究，以期获得更合理的初值扰动结构和振幅，从而改进 GRAPES-

MEPS 区域集合预报系统。

2 资料与方法

2.1 GRAPES-MEPS 区域集合预报系统简介

国家数值预报中心发展的区域集合预报系统 GRAPES-MEPS 目前已发展为 V2.0 版本，该系统采用 GRAPES-Meso 模式 V4.0 版，模式区域设置为水平分辨率 15 km，模拟区域范围为 (15°~60°N, 70°~144°E)，共 502×330 个格点 (图 1)。该系统包括一个控制预报和 14 个扰动成员预报，共 15 个集合成员，系统每天从 00 时 (协调世界时，下同)、12 时开始起报，预报时效 72 h。该系统与 T639 全球集合预报系统相耦合，采用 T639 全球集合预报系统来提供背景场和侧边界条件，T639 全球集合预报初值场通过动力降尺度获得降尺度扰动，并与 ETKF 方法相结合，构建多尺度混合初值扰动场 (blending, Zhang et al, 2015a)，模式扰动采用随机物理过程倾向方法 (袁月等, 2016)。

2.2 ETKF 方法介绍

集合变换卡尔曼滤波 (Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF) 方法最初应用于资料同化和适应性观测，随后用于为集合预报产生初值扰动。在基于集合卡尔曼滤波的资料同化方案中，误差协方差更新方程为

$$P^a = P^f - P^f H^T (HP^f H^T + O)^{-1} HP^f, \quad (1)$$

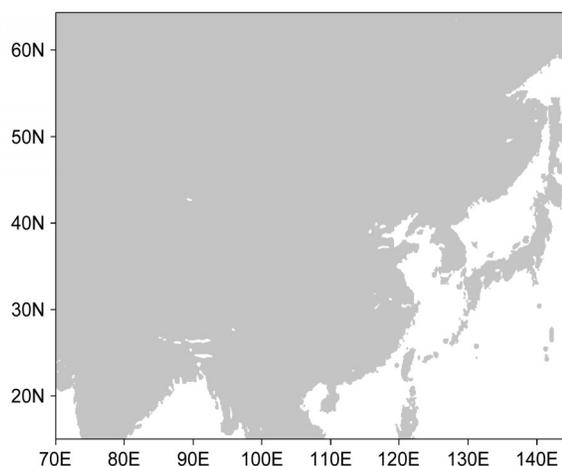


图1 GRAPES-MEPS 集合预报系统的区域范围设置
Fig. 1 Domain configuration of GRAPES-MEPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Mesoscale Ensemble Prediction System)

其中, \mathbf{H} 为线性观测算子, \mathbf{R} 为观测误差协方差矩阵, \mathbf{P}^f 为预报误差协方差。我们期望得到较为理想的分析扰动, 其协方差应该能代表上式中的分析误差协方差 \mathbf{P}^a 。定义分析扰动为: $\mathbf{X}^a = (x_2^a - x_1^a, x_3^a - x_1^a, \dots, x_k^a - x_1^a)$, 预报扰动为: $\mathbf{X}^f = (x_2^f - x_1^f, x_3^f - x_1^f, \dots, x_k^f - x_1^f)$, 下标 1 表示控制预报, K 为集合成员数 (包括控制预报)。这里引入一个变换矩阵 \mathbf{T} 为二者建立关系:

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^f \mathbf{T}. \quad (2)$$

为了求得变换矩阵 \mathbf{T} , 我们首先假设前一循环的预报扰动 \mathbf{X}^f 的协方差能够代表预报误差协方差 \mathbf{P}^f , 而我们需要本次循环的分析扰动 \mathbf{X}^a 的协方差能够代表分析误差协方差 \mathbf{P}^a , 则有

$$\mathbf{P}^f = \mathbf{Z}^f (\mathbf{Z}^f)^T, \quad (3)$$

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

其中, $\mathbf{Z}^f = \mathbf{X}^f / \sqrt{K-1}$ 。将 (3)、(4) 代入 (1) 求解 \mathbf{T} , Bishop et al. (2001) 给出变换矩阵 \mathbf{T} 的表达式为

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

其中, 矩阵 \mathbf{C} 的列包含了 $(\mathbf{Z}^f)^T \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}^f$ 的特征向量, 而对角矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 的非零元素包含了相应的特征值。

当集合预报的成员数较少时, 利用 ETKF 分析扰动估计得到的分析误差协方差矩阵 $\mathbf{P}^a = \mathbf{Z}^f \mathbf{T} \mathbf{T}^T \mathbf{Z}^f$ 就会远远低于真实的分析误差协方差矩阵, 为了解决这个问题, Wang and Bishop (2003) 引入分析扰动调节因子, 以使得预报时刻 (例如 ETKF 循环间隔为 12 h, 则预报时刻为 12 h 预报时长所处的时刻) 集合估计的预报误差方差与控制预报实际的误差方差保持一致。即 t_i 时刻的分析扰动为

$$\mathbf{X}_i^a = \mathbf{X}_i^f \mathbf{T}_i \Pi_i, \quad (6)$$

$$\Pi_i = \sqrt{\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_i} \quad (7)$$

为调节因子, 其中参数 α_i 的计算方式为

$$\alpha_i = \frac{\tilde{\mathbf{d}}_i^T \tilde{\mathbf{d}}_i - N}{\text{trace}(\tilde{\mathbf{H}} \mathbf{P}_i^e \tilde{\mathbf{H}}^T)} = \frac{\tilde{\mathbf{d}}_i^T \tilde{\mathbf{d}}_i - N}{\sum_{i=1}^{K-1} \lambda_i}, \quad (8)$$

N 表示观测点的数目, \mathbf{P}_i^e 为集合估计的预报误差协方差矩阵。 λ_i 是 $\mathbf{\Gamma}$ 的对角线上的元素 ($i=1, \dots, K-1$), $\tilde{\mathbf{d}}_i$ 是一个新息向量, 为 t_i 时刻观测值与观测空间的模式预报值之差, 有 $\tilde{\mathbf{d}}_i = \mathbf{R}^{-1/2} (\mathbf{y}_i - \mathbf{H} \mathbf{x}_i^f)$, 其

中, \mathbf{y}_i 是 t_i 时刻的观测值, \mathbf{x}_i^f 为控制预报量。

为了使集合扰动成员相对于控制预报中心化, 引入球面单形中心化方案 (Wang et al, 2004), 在方程 (5) 的基础上乘以 \mathbf{C}^T , 其中 \mathbf{C}^T 为方程 (5) 中矩阵 \mathbf{C} 的转置矩阵, 即得

$$\mathbf{X}_i^a = \mathbf{X}_i^f \mathbf{T}_i \mathbf{C}^T \Pi_i, \quad (9)$$

这样便得到了 ETKF 的最终表达式。

2.3 ETKF 方法真实观测资料方案介绍

目前的 GRAPES 区域集合预报系统在模式升级后已显示出较好的效果, 但是集合离散度的发展依然不够。业务系统中采用的资料依然是模拟观测资料, 是由 T639 控制预报分析场插值到观测空间中获得的模拟观测, 观测数目以及分布固定不变, 采用模拟观测资料计算得到的 ETKF 分析扰动无法有效代表业务分析场中真实观测的不确定性。理论上来说, ETKF 方法中对观测不确定性的反应, 是应该基于真实观测资料来实现的, 因此本研究的首要内容是对 ETKF 方法开展真实观测资料试验。

试验基于 GRAPES-MEPS 区域集合预报系统相同的设置, 原有的模拟观测资料引用模块利用 T639 控制预报的分析场双线性插值到 1100 个固定站点上形成每日 00 时、12 时的 850 hPa、500 hPa 和 200 hPa 探空资料, 而真实观测方案替换为使用每日 00 时、12 时的实际探空观测资料, 并依照原有的模拟观测方案, 提取真实探空的 850 hPa、500 hPa 和 200 hPa 三个层次的 u (纬向风)、 v (经向风)、 T (温度) 三个要素的观测, 经过业务质量控制方法后用于 ETKF 的计算。2.2 节的计算步骤可以看出, ETKF 扰动更新是在观测空间进行的, 因此真实观测资料的引入, 会对 ETKF 扰动的更新一循环过程产生一定的改变和影响, 不仅影响 ETKF 计算的初始扰动 (2) 式, 也影响调节因子的计算 (8) 式。为了了解真实观测的 ETKF 在区域集合中的应用效果, 与原有的模拟观测方案在 GRAPES-MEPS 区域集合预报系统中进行了对比。

2.4 新型扰动振幅自适应调节因子介绍

ETKF 方法采用模拟观测资料时, 由于观测分布和观测数是固定不变的, 因此模拟观测计算的调节因子较为稳定, 使得扰动振幅较为稳定, 而真实观测资料的站点数目较少, 且不固定, 引入真实观

测使得每次循环的观测资料发生变化，通过 ETKF 算法可以了解到观测数目及分布的变化能够显著影响 ETKF 初始扰动的结构和振幅，有可能使得 ETKF 原始方案计算的调节因子对扰动振幅的调节不够合适 (Wei et al., 2006)。因此本部分尝试设计一种新型的扰动振幅调节因子对 ETKF 产生分析扰动的振幅进行调整。

ETKF 原始的调节因子通过循环找出一个稳定态，使得 ETKF 循环过程中的 12 h 预报时长的集合方差和预报误差方差大致相当，从而对扰动振幅进行调节，由公式 (6~8) 可知该调节因子的计算依赖于观测的分布，在观测资料的数目及分布不变的情况下，该调节因子值是稳定的，而真实观测资料的引入，由于资料观测数的日变化，会使得调节因子产生跳跃。此外对于区域集合预报而言，我们希望在重点关注的预报时段能够获得更好的集合离散度 (Spread) 和均方根误差 (RMSE) 关系 (Buizza et al., 2005)，因此，新的调节因子设计过程中要做到的是：(1) 振幅调节不再依赖观测数；(2) 以获得循环预报时刻较为合理的离散度—误差关系为目标。本节设计不同层次不同要素均一的自适应扰动振幅调节因子：利用模式格点空间不同层次不同要素的离散度和均方根误差在 12 h 预报时效的距离，通过预报循环进行自适应调节使二者距离逐渐减小，以期在预报关注时刻 (12 h 预报时长所处的时刻) 获得与集合预报均方根误差相匹配的集合离散度。

对于某一扰动量而言，第 i 次循环时刻经 ETKF 初步调整的分析扰动为 \mathbf{X}_i^a ，乘以调节因子后的最终初值扰动为 \mathbf{X}_i ：

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_i^a G_i, \quad (10)$$

G_i 为第 i 次循环时刻的自适应调节因子，其计算公式为

$$G_i = G_{i-1} \alpha_i = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_i, \quad (11)$$

α_i 为每次循环的参数，在第 i 次循环时刻，使用第 $i-1$ 次循环的 12 h 集合平均预报均方根误差和 12 h 预报离散度之比算出该参数 α_i ：

$$\alpha_i = E_{R_{i-1}} / S_{p_{i-1}}, \quad (12)$$

$E_{R_{i-1}}$ 为第 $i-1$ 次循环 12 h 预报均方根误差，即

$$E_R = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{m_i=1}^m \sum_{n_j=1}^n (\overline{F(m_i, n_j)} - O(m_i, n_j))^2}, \quad (13)$$

$S_{p_{i-1}}$ 为 $i-1$ 次循环 12 h 预报时刻集合离散度，即

$$S_p = \frac{1}{mn} \sum_{m_i}^m \sum_{n_j}^n \left\{ \frac{1}{N} \sum_{\text{mem}=1}^N [F_{\text{mem}}(m_i, n_j) - \overline{F(m_i, n_j)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

其中， m 、 n 为纬向和经向格点数， $\overline{F(m_i, n_j)}$ 为在 m_i 、 n_j 格点的集合平均预报， $O(m_i, n_j)$ 为对应的实况， N 为集合成员数， $F_{\text{mem}}(m_i, n_j)$ 为在 m_i 、 n_j 格点的集合平均预报。

该调节因子中计算的均方根误差和离散度采用 200 hPa、500 hPa、850 hPa 三个层次的 u 、 v 、 T 三个要素计算，并取三个层次、三个要素的平均值，得出一个 α 参数。 α 值从 1 开始经过几次循环，值不断变化，随着每次循环 RMSE 和 Spread 不断逼近， α 参数将会稳定到 1 左右，此时的自适应调节因子 G 将达一个稳定值，即为我们需要的初始时刻合适的扰动振幅调节因子。

2.5 试验方案设计

为了验证真实观测资料的引入以及新型调节因子对 ETKF 区域集合预报方法的作用，本文设计了三组试验方案，系统模式分辨率及范围设置均与业务 GRAPES-MEPS 一致，无物理过程扰动。三组方案均采用 ETKF 循环产生初值扰动，循环间隔 12 h。三组方案中的 ETKF 计算采用不同的设置：模拟观测、真实观测以及真实观测加新型调节因子。为便于描述，对试验中使用模拟观测的 ETKF 方案的集合简称 SIMULATE，采用真实观测方案的集合简称 REAL，在真实观测基础上引入新型调节因子方案的集合简称 REAL-RESCAL (表 1)。图 2 给出了区域集合试验运行流程，三组方案 ETKF 循环均从动力降尺度初值扰动开始，每次循环的 12 h 预报扰动都经过 ETKF 调整成为下一循环的分析扰动，循环间隔 12 h，经过 7~8 次循环后进行正式预报试验。对三组方案进行了连续一个月的试验，试验时段为 2015 年 6 月 5 日至 7 月 5 日。需要指出的是，本文对三组试验曾进行 ETKF 循环间隔 6 h 的设置，由于 06 时和 18 时的真实观测数目

表 1 三组集合预报试验设置

Table 1 Configuration sets of three ensemble forecast test

| 试验方案 | 初始扰动 | 观测资料 | 调节因子 |
|-------------|------|--------|---------|
| SIMULATE | ETKF | 模拟观测资料 | ETKF 原始 |
| REAL | ETKF | 真实观测资料 | ETKF 原始 |
| REAL-RESCAL | ETKF | 真实观测资料 | 自适应调节因子 |

相对于 00 时和 12 时急剧减少, REAL 方案的调节因子无法达到稳定, 因此 6 h 循环的结果在本文中省略。

3 试验结果分析

3.1 真实观测影响分析

与模式观测固定的观测数目及分布特征相比, 每日实际的观测探空资料受仪器、通讯等状况影响, 与模拟观测差异较为显著。图 3 给出了 2015 年 6 月 5 日 12 时 SIMULATE 和 REAL 两种 ETKF 方案观测分布情况, 可以看出模拟观测方案中观测站数在中国中部、东部较为密集, 日本地区也较为密集 (图 3a), 而真实观测站点数目为 150 多个, 主要集中于中国东部和南部地区, 而高原和东南、西太平洋沿岸观测较少 (图 3b)。

图 4 给出两种方案观测站点数与调节因子 β 随

时间的演变。可以看出, SIMULATE 方案观测数目无变化, 是 1100 个, 相应调节因子 β 稳定在 16~20 之间; REAL 方案观测数目逐日略有变化, 但是变化不大, 站点数稳定在 150 至 170 个, 相应的调节因子 β 稳定在 8~12 之间。说明观测站数的变化可以显著影响调节因子的大小, REAL 方案的调节因子明显小于 SIMULATE 方案, 说明引入真实观测进行 ETKF 计算时, 由于观测数目少使得分析场不确定性增大, 由变换矩阵 T 初步调整获得的分析的扰动量级足够大, 无需通过调节因子放大太多, 因此计算得出的方法因子较小。对 12 h 间隔的 ETKF 循环而言, 由于 00 时和 12 时观测站数虽有一定变化但是尚且较为稳定, REAL 方案计算的调节因子值可稳定在 8 至 12 之间, 但是对于 6 h 间隔的 ETKF 循环, 观测数目会急剧变化, 导致调节因子产生波动较大, 难以稳定 (图略), 因此在引入

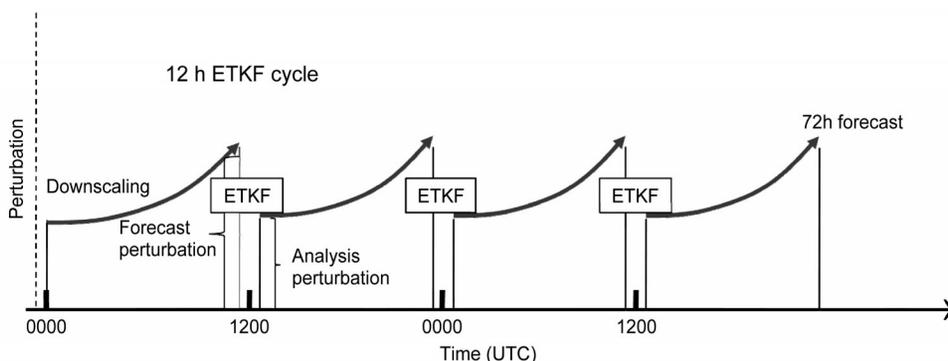


图 2 GRAPES-MEPS 集合预报的 ETKF 循环预报运行流程

Fig. 2 Flow chart of ETKF (ensemble transform Kalman filter) cycling forecast in GRAPES-MEPS

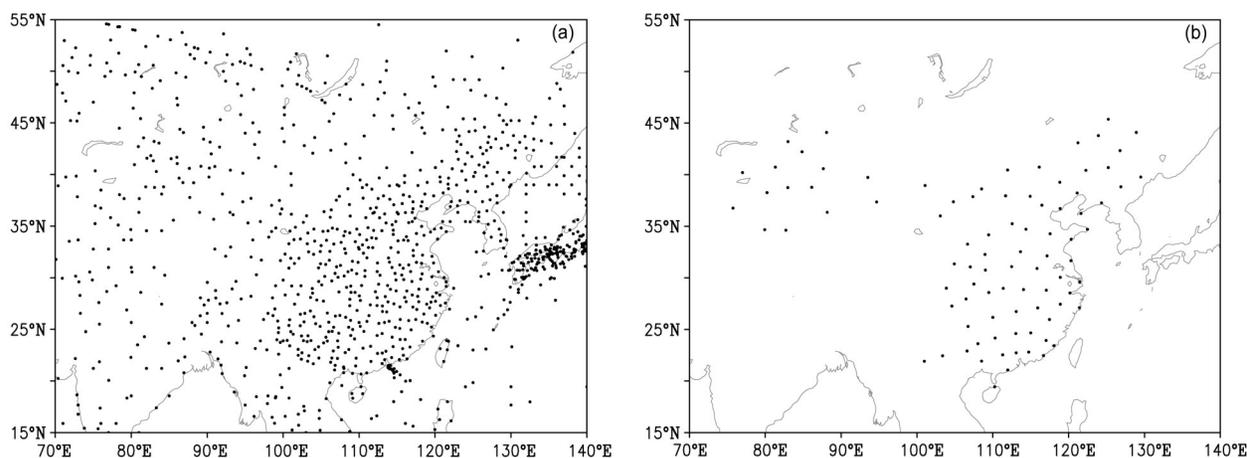


图 3 (a) SIMULATE 观测和 (b) REAL 观测站点水平分布

Fig. 3 Horizontal distributions of observation stations from (a) SIMULATE (ETKF with simulated observations) scheme and (b) REAL (ETKF with real observations) scheme

真实观测的情况下, 原调节因子的计算方案具有很大的局限性。

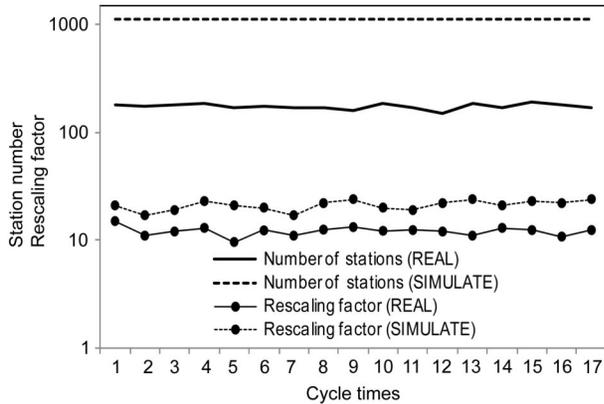


图4 SIMULATE、REAL 方案观测站点数、调节因子随ETKF 循环次数的变化

Fig. 4 Variations of observational station numbers and rescaling factors with the number of ETKF cycles from SIMULATED scheme and REAL scheme

3.2 扰动振幅调节因子作用过程分析

本试验舍弃了ETKF原始的观测空间计算的调节因子, 采用2.4节提到的新型调节因子。通过循环找出一个合理而稳定的调节因子值。ETKF循环从动力降尺度作为初值开始, 进行的短时效(12 h)分析—预报循环, 循环间隔12 h, 每次循环的12 h预报扰动首先通过ETKF计算获得初始分析扰动, 随后应用新型调节因子对初始分析扰动振幅进行调整, 此时的调节因子 G_0 以及参数 α 设置均为1。经过多次循环, 每次重新计算 α 参数来调整每次的 G_i , 当其稳定后即为我们所需要的合理的ETKF初值扰动振幅调节因子。

图5给出了第1~5次循环的850 hPa、500 hPa和200 hPa的12 h预报的 u 的集合离散度和均方根误差之间的差异, 可以看出初次循环, 由于初值来自动力降尺度, 扰动振幅较为合理, 因此本次循环12 h预报的离散度和均方根误差的差距不是太大。

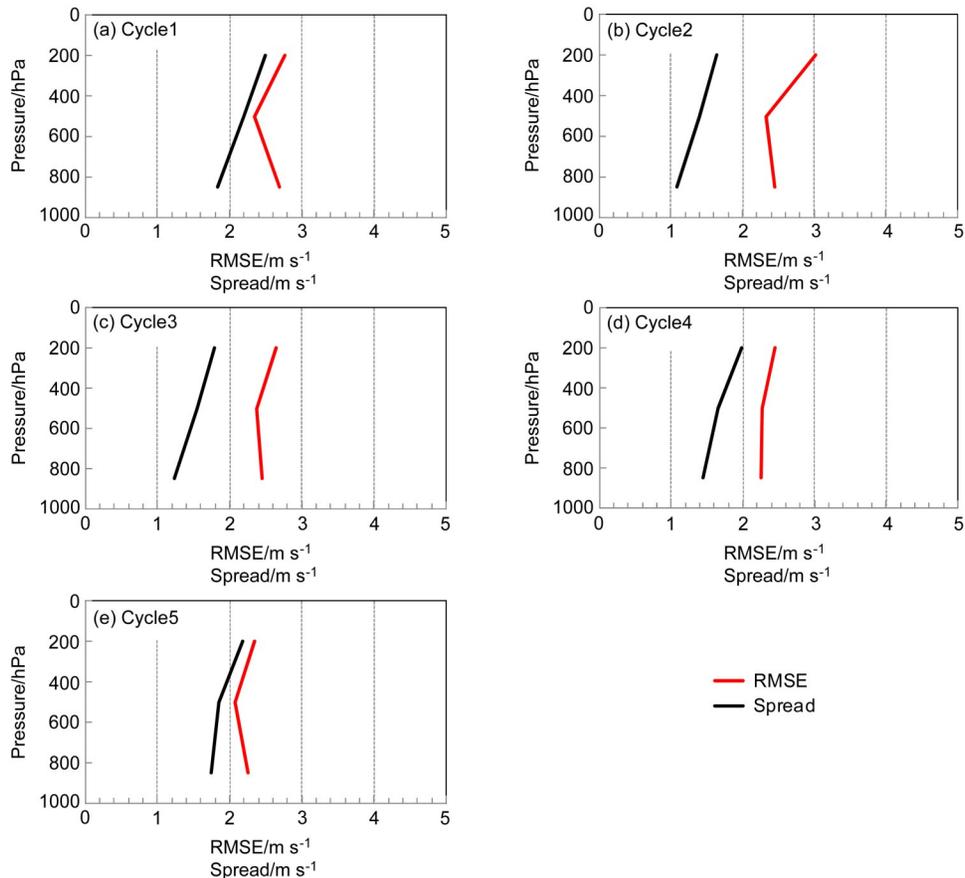


图5 ETKF 第1~5次循环计算的850 hPa、500 hPa和200 hPa的12 h预报 u 的均方根误差和离散度分布。红线为均方根误差, 黑线为离散度

Fig. 5 Root mean square errors (RMSEs) and spreads for 12-h u (zonal wind) forecast from ETKF cycles 1 to 5 at 850 hPa, 500 hPa, 200 hPa. Red lines: RMSEs; black lines: spreads

随后的循环,如第2次,由于ETKF的作用使初始振幅显著减小,而在调节因子为1的设置下没有进行有效放大,因此第2次循环的12 h预报的集合离散度和均方根误差具有较大距离,计算的参数 α 也较大,从而对下一次循环的调节因子 G_i 进行进一步放大,加大初值扰动振幅,随后的几次循环,误差和离散度不断接近,参数 α 稳定到1左右,调节因子 G 也接近一个稳定值。

图6给出了参数 α 和调节因子 G 逐步变化的过程,经过若干次循环,参数 α 稳定到1左右,调节因子也趋于一个稳定值,为6.5左右,这也意味着ETKF循环计算过程中,当ETKF算法获得初始分析扰动后,需要对扰动振幅放大6.5倍左右,可以保证12 h集合预报均方根误差和离散度达到一个大致相当的数量级。

3.3 扰动特征分析

为了解真实观测及新型调节因子引入对ETKF扰动的影响,本节对三种方案获得的ETKF分析扰动分布特征及增长特征进行分析,首先分析经ETKF初步调整获得的初始分析扰动结果。图7a、b、c给出三种方案2015年6月5日12时初始时刻500 hPa纬向风 u 仅经过变换矩阵 T 计算得出的初始分析扰动(公式2)绝对值集合平均水平分布,同时给出500 hPa高度场作为天气流型的参考。整体上看,经过变换矩阵 T 的初步调整,SIMULATE方案(图7a)的扰动量较小,扰动大值区也不过 0.4 m s^{-1} 左右,REAL方案(图7b)比SIMULATE方案扰动量级明显更大,许多区域扰动量级可达 0.8 m s^{-1} 以上,这也与REAL方案的观测误差不确定性

增大有关。两者扰动结构均与天气流型对应较好,在低涡附近存在明显的扰动大值区,此外两者的扰动场中,与观测密集区域对应的位置扰动量级较小,如中国东部和南部地区。REAL-RESCAL方案(图7c)扰动整体分布与REAL方案较为类似,由于两种方案均采用真实观测,经过变换矩阵 T 的初步调整,两种方案的扰动量级较为一致, 0.8 m s^{-1} 以上的扰动区域均较多,但由于REAL-RESCAL方案前几次循环的调节因子计算与REAL方案不一致,因此扰动幅度整体上略小于REAL方案。

图7d、e、f依次表示三种集合方案经过变换矩阵 T 以及调节因子作用(对应公式6)得出的结果。整体上看,虽然SIMULATE方案(图7d)调节因子较大,乘以调节因子后的分析扰动量级依然不如REAL方案(图7e)。而REAL-RESCAL方案(图7f)整体扰动量级不如REAL方案,由于REAL方案原始方案计算的调节因子的稳定态为8~12左右,而REAL-RESCAL新方案计算的调节因子为6左右,因此REAL-RESCAL新方案最终得到的分析扰动量级要小于REAL方案,但是在动力不稳定区和观测稀疏区,依然能保证足够的扰动量级来代表这些区域的初始不确定性,扰动幅度要略大于SIMULATE方案。

图8给出了2015年6月5日12时起报的三种方案不同预报时效的 u 扰动绝对值所有成员平均的垂直廓线分布。可以看出,三种方案的 u 扰动随预报时效均具有较好的增长能力,其中SIMULATE方案(图8a)各个时效扰动量级较小,初始时刻扰动最大值为 2 m s^{-1} ,REAL方案(图8b) u 扰动量级较大,特别是初始时刻,其在整个垂直方向上的扰动最大值接近 4 m s^{-1} ,这对模式初始不确定性而言显得过大,而REAL-RESCAL方案(图8c)初值扰动最大值为 2.5 m s^{-1} 左右,更为合理,且其扰动增长速率较快,72 h预报时效扰动最大值可达 5.5 m s^{-1} 左右。

3.4 集合预报检验结果

为了考察引入真实观测资料以及新型调节因子后对集合预报检验效果的影响,进行了集合预报连续试验,统计了2015年6月5日至7月5日试验时段内统计平均的集合平均均方根误差和离散度关系、连续等级概率评分(continuous rank probability score, CRPS, Hersbach, 2000)随预报时效的演变。

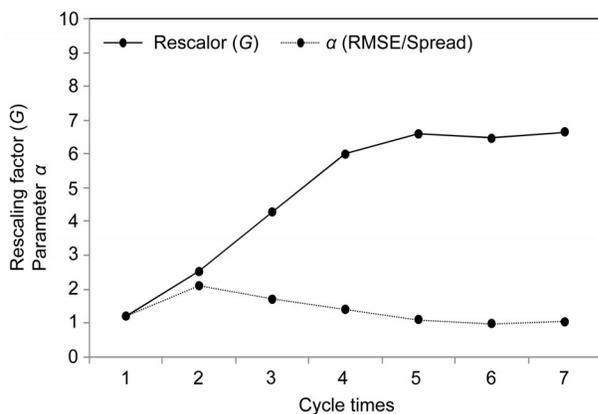


图6 ETKF第1~7次循环计算的参数 α 和调节因子 G 的变化情况
Fig. 6 Variations of parameter α and rescaling factor (G) from ETKF cycles 1 to 7

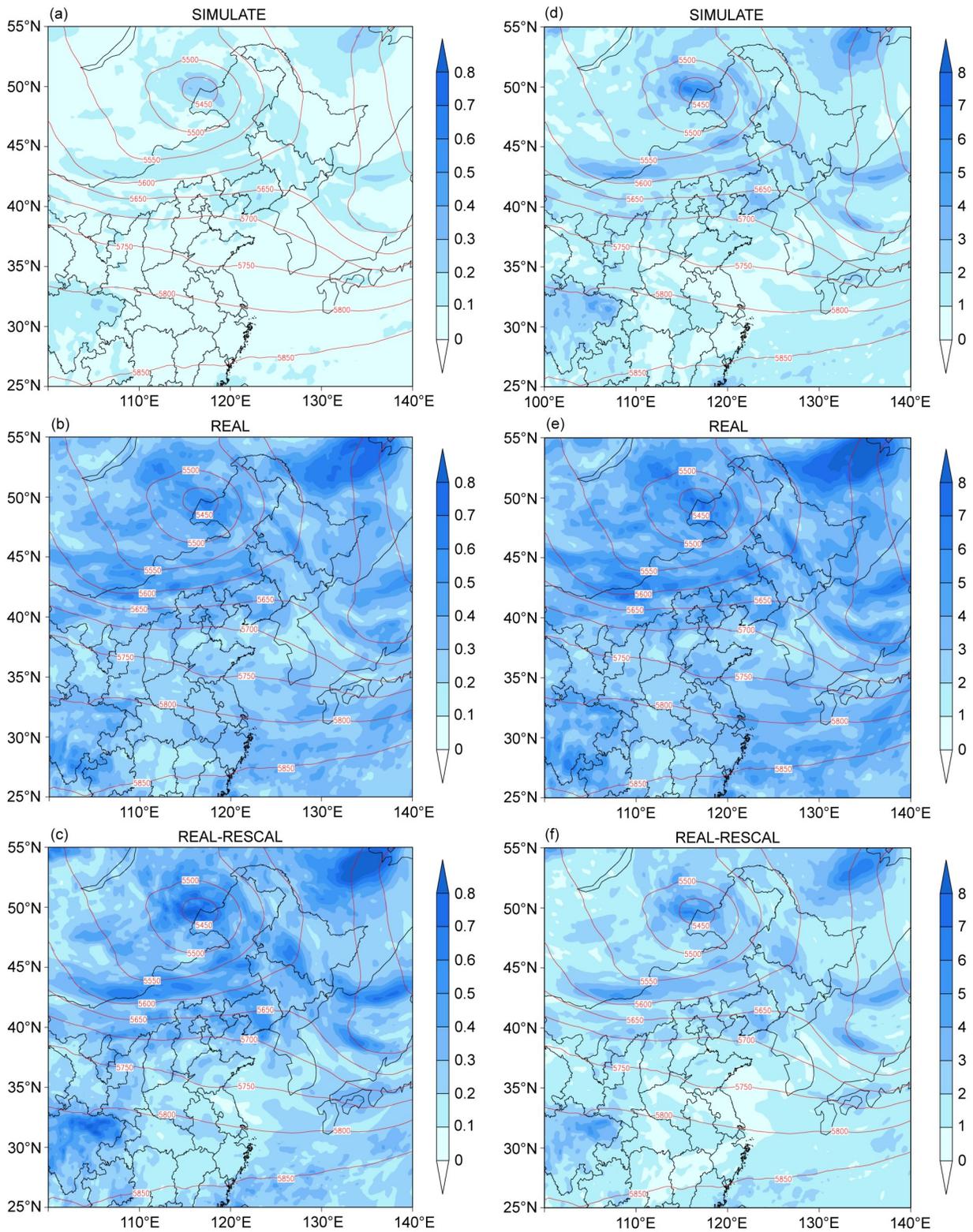


图7 2015年6月5日12时 (a、d) SIMULATE方案、(b、e) REAL方案、(c、f) REAL-RESCAL方案经过 (a、b、c) 变换矩阵 T 调整后以及 (d、e、f) 变换矩阵 T 及调节因子共同作用后的 500 hPa 纬向风 u 的分析扰动绝对值集合平均水平分布 (阴影, 单位: $m s^{-1}$) 和控制预报的 500 hPa 等高线分布 (红色等值线, 单位: gpm)

Fig. 7 Horizontal distribution of 500-hPa zonal wind perturbation (shadings, units: $m s^{-1}$) generated by (a, b, c) transform T and (d, e, f) transform T and the rescaling factor from (a, d) SIMULATE scheme, (b, e) REAL scheme, (c, f) REAL-RESCAL (ETKF with real observations and new rescaling factor) scheme and 500-hPa geopotential height (red contours, units: gpm) from control forecast at 1200 UTC on 5 June 2015

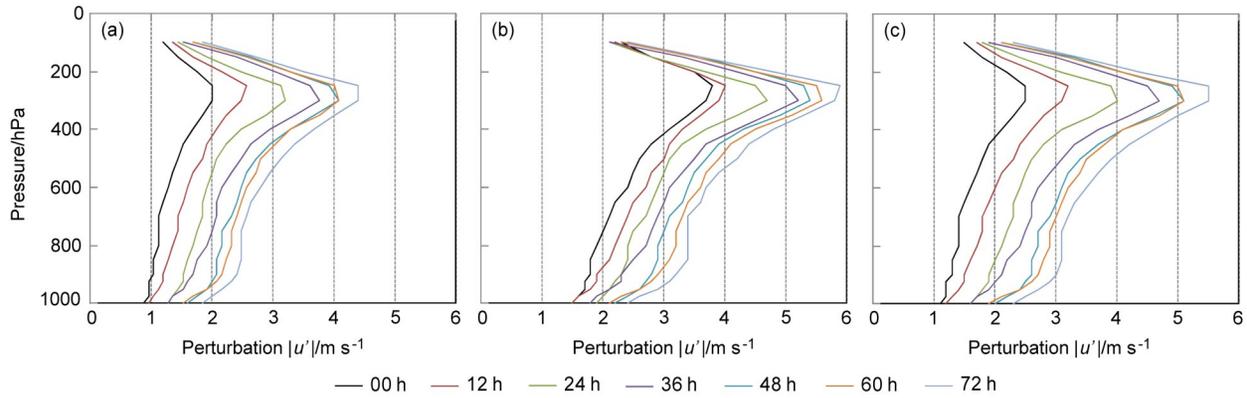


图8 (a) SIMULATE方案、(b) REAL方案、(c) REAL-RESCAL方案的纬向风 u 扰动预报绝对值集合平均的垂直分布
Fig. 8 Vertical distributions of absolute ensemble mean values of zonal wind perturbation from (a) SIMULATE scheme, (b) REAL scheme, (c) REAL-RESCAL scheme

图9为若干等压面要素集合离散度—均方根误差关系和CRPS评分统计结果。从图9a、b可以看出，在72 h预报时效内，REAL方案的离散度最大，尤其是从初始时刻到较短预报时效内，真实观测资料获得了较大的集合离散度，如对于500 hPa纬向风 u_{500} （图9a），REAL方案的离散度在36 h预报时效内甚至大于了自身的均方根误差，REAL-RESCAL方案离散度虽不及REAL方案，但要优于SIMULATE方案。而对于集合平均的均方根误差，REAL方案并未产生明显改进，甚至短预报时效误差相对于SIMULATE方案以及REAL-RESCAL方案有所增加，但随着预报时效延长，三种方案均方根误差基本相同，从均方根误差与离散度比值（图9c、d）上看，SIMULATE方案与理想值1差距较大，REAL和REAL-RESCAL方案均可使该比值接近1，但是图9c显示REAL方案的该比值在36 h预报时效内小于1，呈过离散状态。纵观所有预报时效，REAL-RESCAL方案的集合平均均方根误差—离散度关系更为合理。图9c、d给出了三组集合试验不同要素的CRPS评分，由图可以看出对于不同变量，REAL方案在短预报时效表现出较大的CRPS值，说明真实观测资料的引入降低了概率预报准确度，而REAL-RESCAL方案和SIMULATE方案的CRPS评分较为接近，其CRPS值均小于REAL方法。通过以上分析可以看出，真实观测资料与新型调节因子搭配能够取得较好的预报检验效果，新型的调节因子可以有效调整ETKF分析扰动初始离散度，避免引入真实观测资料引起的过离散现象，并有效保持或者提高等压面要素的概率预报

技巧。对其他等压面要素的检验结果也类似，这里不再赘述。

3.5 降水预报检验结果

为了检验三种集合方法的降水预报效果，接下来研究2015年一次典型的强降水个例。图10a给出了2015年6月7日00时至8日00时观测到的24 h累计降水，可以看出该降水个例具有明显的系统性特征，从西南到华东具有明显的雨带，其中最大降水落区位于江苏安徽交接地区，24 h累计降水可达100 mm以上。图10 b-d给出了三种集合方法从2015年6月6日12时起报的24 h累计降水大于25 mm量级概率预报。SIMULATE方案（图10b）对实况的位置和范围均给出了一定的指示信号，但与实况中相比有所偏北（如江苏南部强降水中心）；对于REAL方案（图10c），大概率区域与实况观测的强降水中心相比能给出一定的指示信号，但概率强度与SIMULATE相比略弱，概率分布较为广泛零散（如对湖南—贵州交界处的强降水的概率预报强度较小）；REAL-RESCAL方案（图10d）相对于SIMULATE方案，降水落区更为偏南（如江苏南部降水），与实况对应更准，另外对于湖南—贵州附近雨带，预报概率量级要比REAL方案更大，更为接近实况。

我们采用集合平均TS评分、相对作用特征面积（Area of Relative Operation Curve, AROC）和Brier Score（BS）评分来评估三种集合扰动方案在试验时段内对所有降水个例降水预报的统计检验结果。图11给出了0.1~100 mm五个降水量级的集合平均预报TS评分、AROC以及BS评分。可以看

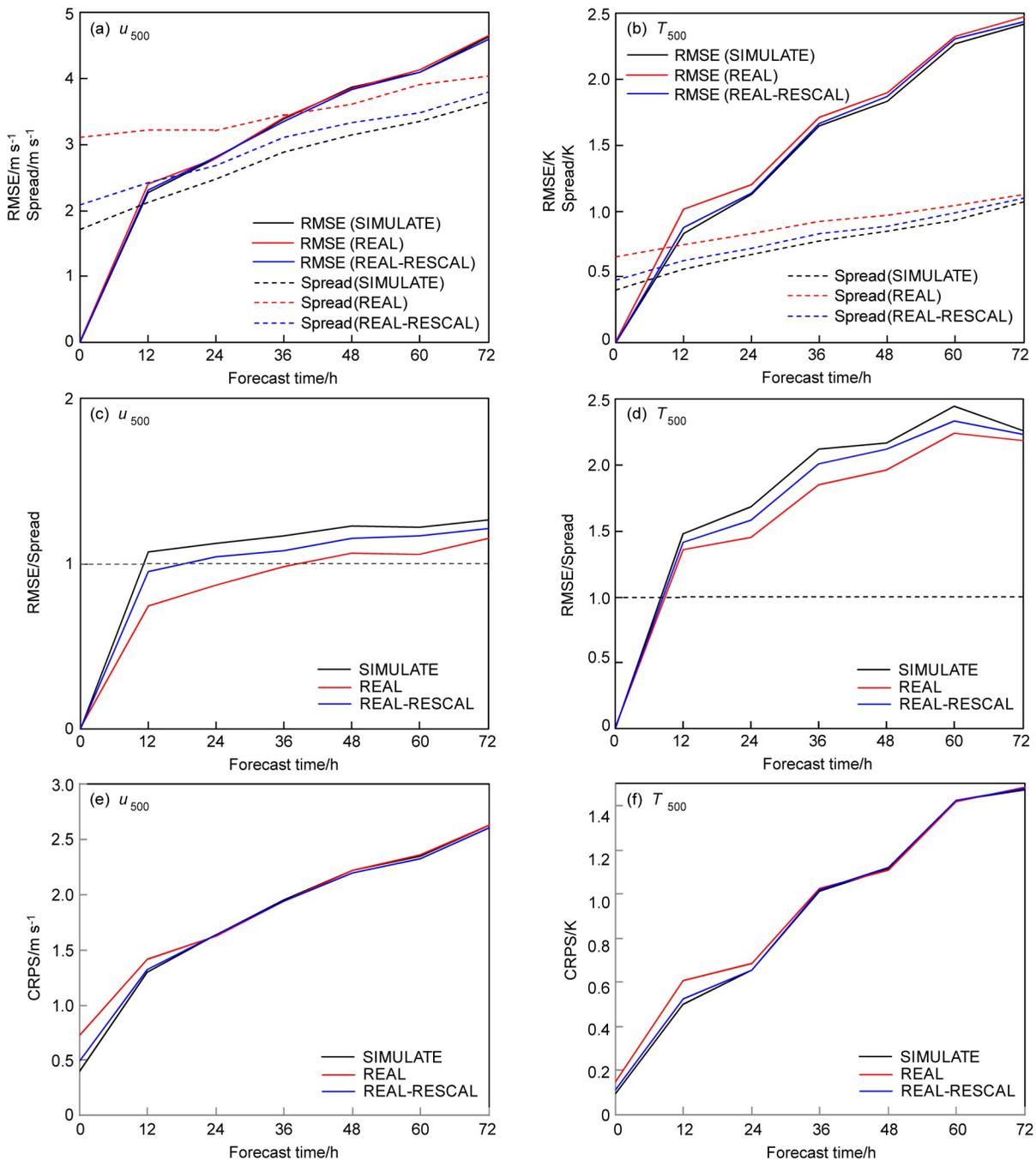


图9 SIMULATE 方案、REAL 方案和 REAL-RESCALE 方案集合预报结果：(a) 500 hPa 纬向风 (u_{500})、(b) 500 hPa 层温度 (T_{500}) 的集合平均均方根误差 (RMSE) 和离散度 (Spread)；(c) u_{500} 、(d) T_{500} 的 RMSE 与 Spread 比值；(e) u_{500} 、(f) T_{500} 的 CRPS 评分

Fig. 9 Ensemble verification scores for the SIMULATE, REAL, and REAL-RESCALE schemes: Ensemble mean RMSEs and spreads of (a) 500-hPa zonal wind (u_{500}), (b) 500-hPa temperature (T_{500}); RMSEs/spreads of (c) u_{500} , (d) T_{500} ; CRPS (continuous rank probability score) of (e) u_{500} , (f) T_{500}

出，对于集合平均预报 TS 评分，三者在不同量级各有优劣，其中 SIMULATE 方案在 0.1 mm、25 mm 量级占优，REAL 方案在 100 mm 量级占优，而 REAL-RESCALE 方案与 SIMULATE 方案的降水评分较为一致，对于 50 mm 降水量级，该方案具有最优表现。对于 AROC 降水概率预报评分，完美

的 AROC 等于 1，没有技巧的预报 AROC 等于 0.5。由于离散度较好，REAL 方案在 10 mm 以上量级均优于 SIMULATE 方案，而 REAL-RESCALE 方案基本上与 REAL 方案具有相当的表现，50 mm 量级降水表现最优。BS 评分是负定向评分，表示概率预报与实况之差，SIMULATE 方案 BS 值较高，说明

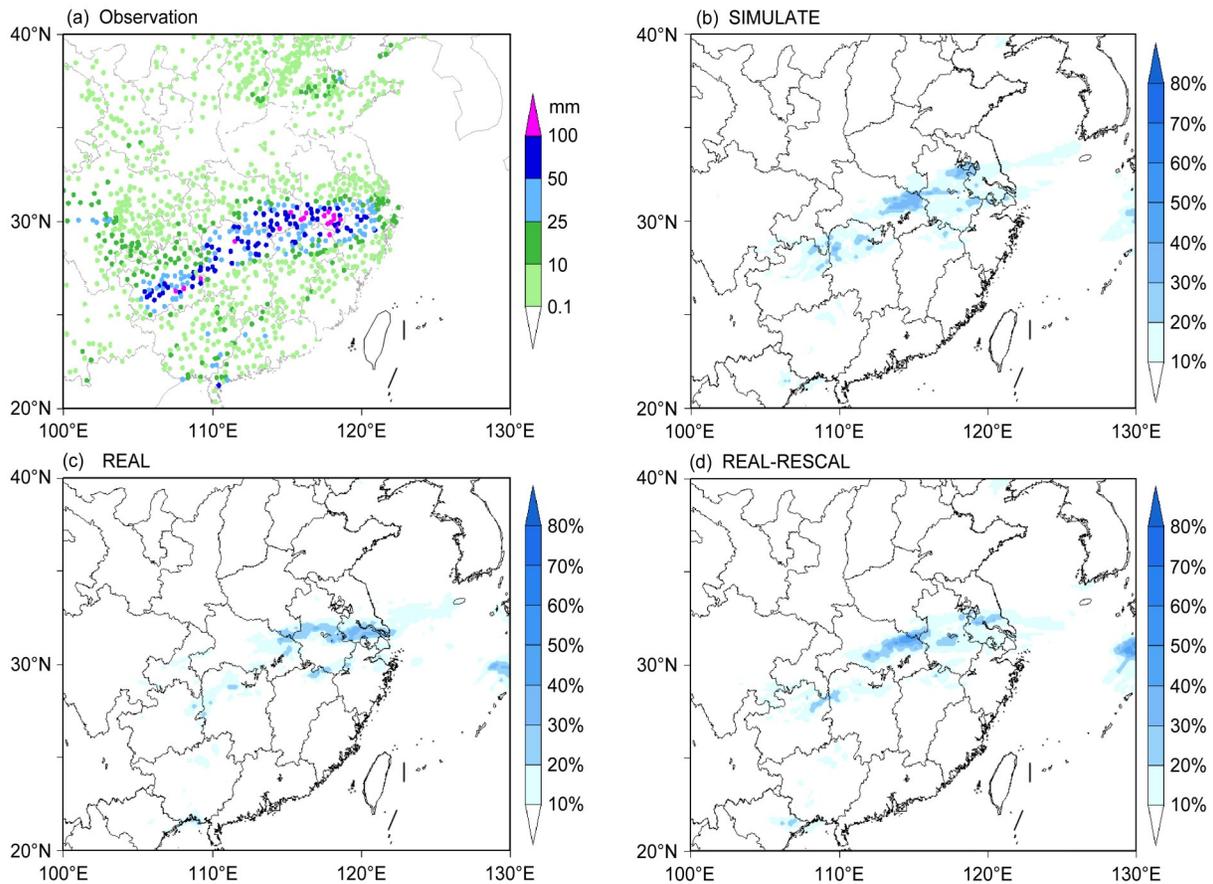


图10 2015年6月7日00时至8日00时 (a) 24 h 累计降水量的实况观测分布 (单位: mm) 以及 (b) SIMULATE 方案、(c) REAL 方案、(d) REAL-RESCAL 方案 24 h 累计降水量超过 25 mm 的概率预报 (单位: %)

Fig. 10 (a) 24-h accumulative precipitation (units: mm) from observations and probability forecast (units: %) for 24-h accumulative precipitation more than 25 mm from (b) SIMULATE scheme, (c) REAL scheme, (d) REAL-RESCAL scheme from 0000 UTC 7 June to 0000 UTC 8 June 2015

概率预报误差较大。REAL 方案相对于 SIMULATE 方案在所有量级均占优, 说明真实观测资料方案有助于提高降水的概率预报结果, 然而这种概率预报的提高主要是由于集合离散度的增加引起的, 对于实际业务应用的意义如何有待进一步研究。而 REAL-RESCAL 方案在离散度小于 REAL 方案的情况下, 对于 25 mm 以上降水具有更小的 BS 值, 说明降水概率预报效果较好。

综上所述, 将真实探空资料引入 ETKF 计算中可以在一定程度上提高降水概率预报结果, 但是由于真实观测数目较少引起初始离散度较大, 集合成员之间较为分散, 对诸如集合平均 TS 评分中降水预报命中率提升有限, 而真实观测资料与新的扰动调节因子方案相结合无论对于集合平均预报, 还是降水的概率预报结果均有一定的提高, 是一种行之有效的方案。

4 结论和讨论

本文针对 GRAPES 区域集合预报系统中 ETKF 扰动方案未引入真实观测, 且离散度相对不足的问题, 探索了将真实探空观测资料引入 ETKF 计算的可行性, 在真实观测的基础上设计了新的扰动振幅调节因子并进行了应用, 开展了模拟观测 ETKF、真实观测 ETKF 以及真实观测结合新型扰动调节因子的 ETKF 三种集合方案的预报试验, 从扰动分布、概率预报检验以及降水预报检验等方面进行了综合评估, 从而为改进 GRAPES 区域集合预报效果提供基础。得出以下结论:

(1) 真实探空资料能够有效应用于 GRAPES 区域集合预报系统中, 真实观测资料与模拟观测资料相比较为稀疏, 能够引起 ETKF 初始扰动振幅的变化以及调节因子的变化, 可以获得更大的初值扰动振幅。

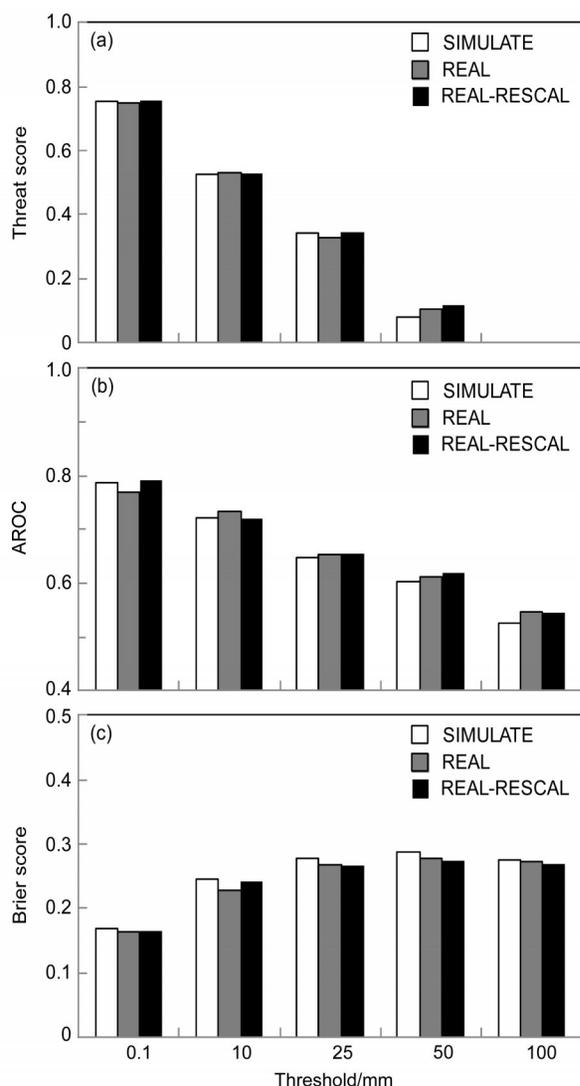


图 11 SIMULATE 方案、REAL 方案和 REAL-RESCALE 方案在 0.1~100 mm 五个降水量级的评分：(a) 集合平均 TS 评分；(b) 相对作用特征面积 AROC；(c) BS 评分

Fig. 11 Precipitation scores from SIMULATE scheme, REAL scheme, and REAL-RESCALE scheme at different thresholds ranging from 0.1-100 mm: (a) Ensemble mean threat scores; (b) AROC (Area of Relative Operation Curve); (c) Brier scores

(2) 设计了新的扰动振幅调节因子，通过格点空间中离散度和均方根误差关系来对初值扰动振幅进行自适应调整，该方法能够有效使扰动振幅的调整不依赖观测数目，并获得循环预报时刻（12 h）更为合理的集合均方根误差—离散度关系。

(3) 集合预报检验结果表明真实观测资料有助于提高区域集合的离散度，但对集合预报技巧以及概率预报结果的提高有限，而真实观测资料与扰动振幅自适应调节因子相结合，可以获得更为合理的

集合离散度—均方根误差关系，有效提高区域集合的概率预报结果。

(4) 降水个例试验结果表明真实观测 ETKF 方法对于降水预报效果提高也有限，且由于离散度过大导致降水概率预报量级偏小；而真实观测资料与扰动振幅自适应调节因子相结合，对降水落区及量级预报能保持较好的水平，降水统计评分也表明不管是集合平均预报还是概率预报，真实观测结合新型调节因子的方案能够获得更好的评分效果，尤其是对大雨以上量级效果更优。

以上结论表明如果将实际观测引入 ETKF 方案中，需要与新型调节因子相结合，从而获得能够反映真实分析场实际观测不确定性、且扰动振幅更合理的分析扰动场，具有较好的实际应用价值。本文开展试验基于纯粹的 ETKF 方法进行，考虑到业务应用需要与多尺度混合方案相结合，未来需要进一步开展试验。

参考文献 (References)

Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects [J]. *Monthly Weather Review*, 129(3): 420-436.

Bishop C H, Holt T R, Nachamkin J, et al. 2009. Regional ensemble forecasts using the ensemble transform technique [J]. *Monthly Weather Review*, 137(137): 288-298. doi:10.1175/2008MWR2559.1

Bojarova J, Gustafsson N, Johansson A, et al. 2011. The ETKF rescaling scheme in HIRLAM [J]. *Tellus*, 63A: 385-401. doi: 10.1111/j.1600-0870.2011.00513.x

Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, et al. 2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(632): 703-722. doi:10.1002/qj.234

Bowler N E, Mylne K R. 2009. Ensemble transform Kalman filter perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135(640): 757-766. doi:10.1002/qj.404

Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al. 2005. A comparison of the ECMWF, MSC and NCEP global ensemble prediction systems [J]. *Monthly Weather Review*, 133(5): 1076-1097.

Caron J F. 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: A case study [J]. *Monthly Weather Review*, 141(141): 356-374. doi:10.1175/MWR-D-12-00051.1

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 [J]. *大气科学*, 29(5): 717-726. Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(5): 717-726. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.05

Du J, DiMego G, Tracton M S, et al. 2003. NCEP short-range

- ensemble forecasting (SREF) system: Multi-IC, multi-model and multi-physics approach research activities in atmospheric and oceanic modelling, CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation (WGNE), WMO Tech. Doc. 1161.
- Epsten E S. 1969. Stochastic dynamic prediction [J]. *Tellus*, 21(6): 739–759.
- Frogner I L, Haakenstad H, Iversen T. 2006. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(621): 2785–2808. doi: 10.1256/qj.04.178
- Hersbach H. 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems [J]. *Wea. Forecasting*, 15(5): 559–570.
- Houtekamer P L, Lefaiivre L, Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 124(6): 1225–1242.
- 黄红艳, 齐琳琳, 刘健文, 等. 2016. 多物理ETKF在暴雨集合预报中的初步应用 [J]. *大气科学*, 40(4): 657–668. Huang Hongyan, Qi Linlin, Liu Jianwen, et al. 2016. Preliminary application of a multi-physical ensemble transform Kalman filter in precipitation ensemble prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (4): 657–668. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.14308
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecast [J]. *Monthly Weather Review*, 102(6): 409–418.
- 龙柯吉, 陈静, 马旭林, 等. 2011. 基于集合卡尔曼变换的区域集合预报初步研究 [J]. *成都信息工程学院学报*, 26(1): 37–46. Long Keji, Chen Jing, Ma Xulin, et al. 2011. The preliminary study on ensemble prediction of GRAPES-meso based on ETKF [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 26 (1): 37–46. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2011.01.006
- 马旭林, 薛纪善, 陆维松. 2008. 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 [J]. *气象学报*, 66(4): 526–536. Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66(4): 526–536. doi:10.11676/qxxb2008.050
- Marsigli C, Boccanera F, Montani A, et al. 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: Validation of the methodology and verification [J]. *Nonlinear Processes Geophys.* 12(4): 527–536.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(122): 3–119.
- Stensrud D J, Fritsch J M. 1994. Mesoscale convective systems in weakly forced large-scale environments. Part II: Generation of a mesoscale initial condition [J]. *Monthly Weather Review*, 122(9): 2068–2083.
- Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. 1999. Using ensembles for short-range forecasting [J]. *Monthly Weather Review*, 127(4): 433–446.
- 田伟红, 庄世宇. 2008. ETKF方法在区域集合预报中的初步应用 [J]. *气象*, 34(8): 35–39. Tian Weihong, Zhuang Shiyu. 2008. Application of ETKF method to regional ensemble forecasts [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34(8): 35–39.
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74(12): 2317–2330.
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125(12): 3297–3319.
- Walser A, Arpagaus M, Appenzeller C, et al. 2006. The impact of moist singular vectors and horizontal resolution on short-range limited-area ensemble forecasts for two European winter storms [J]. *Monthly Weather Review*, 134(10): 2877–2887.
- Wang X, Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60(9): 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? [J]. *Monthly Weather Review*, 132(7): 1590–1605.
- Wang Y, Bellus M, Geleyn J F, et al. 2014. A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: Blending [J]. *Monthly Weather Review*, 142(5): 2043–2059.
- Wei M, Toth Z, Wobus R, et al. 2006. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP [J]. *Tellus A*, 58(1): 28–44.
- 袁月, 李晓莉, 陈静, 等. 2016. GRAPES区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究 [J]. *气象*, 42(10): 1161–1175. Yuan Yue, Li Xiaoli, Chen Jing, et al. 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(10): 1161–1175. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.001
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. GRAPES区域集合预报系统应用研究 [J]. *气象*, 40(9): 1076–1087. Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40(9): 1076–1087. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.005
- Zhang H, Chen J, Zhi X, et al. 2015a. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(8): 1143–1155. doi:10.1007/s00376-015-4232-6
- Zhang H, Chen J, Zhi X, et al. 2015b. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system [J]. *Atmosphere*, 6(3): 341–360. doi:10.3390/atmos6030341
- 智协飞, 朱寿鹏, 孙晶, 等. 2015. 基于BGM与ETKF的台风“苏拉”(1209)集合预报的对比试验. I: 路径预报 [J]. *大气科学学报*, 38 (6): 776–784. Zhi Xiefei, Zhu Shoupeng, Sun Jing, et al. 2015. Comparative experiments of ensemble forecasting of typhoon Saola (1209) based on BGM and ETKF. Part I: Track forecast [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38(6): 776–784. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150420002