

庄潇然, 闵锦忠, 王世璋, 等. 2017. 风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京 2012 年“7.21”暴雨预报中的应用 [J]. 大气科学, 41 (1): 30–42.  
Zhuang Xiaoran, Min Jinzhong, Wang Shizhang, et al. 2017. A blending method for storm-scale ensemble forecast and its application to Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 30–42, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.15233.

# 风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京 2012 年“7.21”暴雨预报中的应用<sup>1</sup>

庄潇然<sup>1,2</sup> 闵锦忠<sup>1,2</sup> 王世璋<sup>1,2</sup> 周凯<sup>1,2</sup> 蔡沅辰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

<sup>2</sup> 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

**摘 要** 风暴尺度集合预报系统 (Storm-Scale Ensemble Forecast system, 简称 SSEFs) 中集合成员之间发散度不足一直都是研究的难点。本文尝试了将 Barnes 空间滤波融入到集合转换卡尔曼滤波 (ETKF) 更新预报系统中的混合初值扰动法。该方案将 ETKF 方法的小尺度信息与来自于侧边界条件扰动的大尺度信息相结合, 缓解了扰动在侧边界不匹配的问题。通过 2012 年北京“7.21”暴雨并使用邻位方法对比分析了不同初值扰动方案在不同时间尺度与空间尺度上的特征, 在此基础上进一步探讨了构造混合初始扰动法的可行性。结果表明: ETKF 试验所构造的初始扰动无法与侧边界条件扰动相匹配, 混合后的初始扰动可以有效缓解 SSEFs 中由于初始扰动与侧边界扰动不匹配产生的虚假波动, 其中大尺度信息保留较多的混合试验 (ETKF80) 和动力降尺度方案 (Down) 在减少虚假波动方面的效果最优; 从集合离散度来看, 在前期暖区降水阶段 ETKF 的离散度在小尺度上最大, 随着锋面降水的开始, Down 的离散度逐渐超过 ETKF, 而使用各滤波波段构造的混合试验同时具备 ETKF 与 Down 二者的特征。选择合理的滤波波段可以获得最为合理的离散度表现 (ETKF180), 说明仅考虑侧边界匹配 (Down 和 ETKF80) 并不能获得最合理的集合离散度, 应综合考虑其他因素。从降水概率预报结果来看, 选取合适的滤波波段所构造的混合扰动试验同样获得了较好的效果。

**关键词** 风暴尺度集合预报系统 集合转换卡尔曼滤波 混合初始扰动 离散度 概率预报

**文章编号** 1006-9895(2017)01-0030-13

**中图分类号** P456.7

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.1605.15233

## A Blending Method for Storm-Scale Ensemble Forecast and Its Application to Beijing Extreme Precipitation Event on July 21, 2012

ZHUANG Xiaoran<sup>1,2</sup>, MIN Jingzhong<sup>1,2</sup>, WANG Shizhang<sup>1,2</sup>, ZHOU Kai<sup>1,2</sup>, and Cai Yuanchen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** In order to overcome the under-dispersive problem in the storm-scale ensemble forecast system (SSEFs), a new blending method to generate initial perturbation is designed and tested for the WRF SSEFs. This new scheme is based on the combination of the ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter) and the Barnes filter for scale decomposition. This

**收稿日期** 2015-07-26; 网络预出版日期 2016-05-12

**作者简介** 庄潇然, 男, 1991 年出生, 博士研究生, 主要从事风暴尺度集合预报技术研究。E-mail: zxrz3212009@163.com

**通讯作者** 闵锦忠, E-mail: minjz@nuist.edu.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目 41430427、40975068

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41430427 and 40975068)

scheme is applied to the simulation of the Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012 and the neighborhood methods is employed to verify the performance of this new scheme. Results indicate that the blending method can effectively solve the scale mismatch problem in the lateral boundary in storm-scale ensemble prediction system, in which ETKF80 (with wavelength scale of 180 km) and Down (Dynamical downscaling) show the best overall performance. The Dispersion Fractions Skill Score (DFSS) shows that the ETKF has a larger spread in small scales during the period of warm area precipitation while Down produces a larger spread at large scales during period of frontal precipitation. The experiments with initial perturbations generated by the blending method take advantage of both the ETKF and Down. The ETKF180 (with wavelength scale of 180 km) generates the most reasonable ensemble spreads. Results also indicate that in order to get better ensemble spread in SSEFs, not only the lateral scale mismatch but also some other elements (such as the interaction between different scales of initial perturbation) should be considered. The blending method ETKF180 also improves the precipitation probability forecast.

**Keywords** Storm-scale ensemble forecast system, Ensemble transform Kalman filter, Blending initial perturbation, Spread, Probability prediction

## 1 引言

随着数值天气预报的发展,人们对中尺度强对流天气的临近预报产生了浓厚的兴趣,该类天气往往时空尺度小且伴随着多尺度系统的复杂非线性相互作用,任一环节的细小偏差均有可能导致预报结果的重大差别(杜钧和李俊, 2014),因此仅通过提高数值模式的分辨率已无法显著改善预报效果(Mass et al., 2002)。考虑到风暴尺度集合预报系统(Storm-Scale Ensemble Forecast system, 简称 SSEFs; Vié et al., 2011; Gebhardt et al., 2011; Tennant, 2015)在强对流天气预报方面的优势(Kong et al., 2007),全球各大业务预报中心均在着力开发该类预报系统,但如何构建合适的初始扰动以及模式扰动方法目前仍然未知。

合理的初始扰动方案是完善的风暴尺度集合预报系统的基础,Wang et al. (2014)指出,区域集合预报中初始扰动需要满足三个条件:(1)包含分析不确定性,(2)与模式区域以及分辨率相适应,(3)与模式侧边界条件扰动相匹配;且这三个基本要求对于风暴尺度集合预报系统依然适用。动力降尺度(Dynamical downscaling, 简称 Down)是一种较为常见的初始扰动方案,即直接将嵌套外区域的全球集合预报或者是区域中尺度集合预报的分析场(或扰动场)插值到风暴尺度集合预报系统的网格区域当中,从而得到初始扰动,该方法的优点是节省计算资源且能够保证初始扰动场与侧边界条件扰动相匹配,从而避免初始场的不平衡(Peralta et al., 2012; Caron, 2013),此外,由于大尺度的扰动信息对集合离散度起主导作用(Johnson et al., 2014),而且对于发生发展快速的对流系统,即使

初始扰动场中并不包含小尺度信息,但是小尺度的扰动依然可以在很短的时间内产生并迅速增长,因此总体而言动力降尺度方案在风暴尺度集合预报系统当中是有效的(Hohenegger et al., 2008)。尽管如此,已有研究表明,小尺度的扰动信息对于高影响天气的预报是有效且必要的(Craig et al., 2012),集合转换卡尔曼滤波方法(Ensemble Transform Kalman Filter, 简称 ETKF)已被证明是一种有效的区域集合预报扰动方法(Harnisch and Keil, 2015; Zhang et al., 2015),与 Down 相比,通过 ETKF 方案所构造的初始扰动中包含了分析不确定性,且能够与模式分辨率相适应,但却不能保证与侧边界扰动相匹配,考虑到这一点,Wang et al. (2014)基于中欧区域中尺度集合预报系统(Wang et al., 2011),提出了将欧洲中心全球集合预报系统(Buizza and Palmer, 1995)的大尺度扰动与中欧区域模式自身通过增长模繁殖法生成的中小尺度初始扰动相结合的混合初始扰动法(Blending),并证明该方法有效地解决了增长模繁殖法方案发散速度不足的问题,然而该方法在风暴尺度集合预报系统中的应用依然非常有限,考虑到暴雨等高影响天气的复杂内在机制,将“多尺度”的思想运用到该类天气的预报中是必要且有意义的。

此外,随着模式分辨率的提高、区域的减小,侧边界的影响显得愈发重要。Hou et al. (2001)研究指出,在不引入侧边界扰动的情况下,单向侧边界条件会严重抑制区域集合预报的发散度;Nutter et al. (2004)基于简单模式(PPV)验证了这一观点并指出引入侧边界扰动有助于提高区域集合预报的离散度。此外,当构造初始扰动考虑到分析循

环时,在循环过程中加入侧边界条件扰动同样有助于提高集合离散度(Saito et al., 2012)。目前,各大业务中心的区域集合预报系统均是通过与全球集合预报系统相耦合获得侧边界扰动(Palmer et al., 2007),这样既可以提高集合离散度,又可以通过侧边界向区域模式中传入其本身所无法分辨的大尺度扰动信息,因此,如何有效地避免初始扰动与侧边界条件扰动在侧边界处尺度上的不一致所带来的不确定性,这同样是发展风暴尺度集合预报系统时需要重点考虑的问题。

2012年7月21日发生于北京的“7.21”特大暴雨给国民生活以及社会的经济带来了巨大的损失,许多气象学者已从环流形势、诊断分析、数值模拟、可预报性等方面进行了深入研究(孙建华等, 2013; 周玉淑等, 2014; 李俊等, 2015)。Barnes滤波早年由Barnes(1994)提出,并已经被成功地运用到气象场的尺度分离当中(Hsiao et al., 2010; Gao et al., 2014),本文使用WRF(Weather Research and Forecasting)模式,将Barnes滤波融入到ETKF方案当中构建风暴尺度集合预报系统,并与ETKF方案进行对比,研究混合初始扰动方法在“7.21”暴雨中的应用,为进一步发展适用于不同类型强对流天气的多尺度初始扰动方法提供科学依据。

## 2 模式与数据

试验采用了WRF模式3.5.1版本,采用双重单向嵌套,模式内、外层分辨率分别为4 km、24 km,水平格点数分别为 $221 \times 221$ 、 $111 \times 111$ ,垂直方向不等距35层,模式顶层10 hPa,背景场与外区域的侧边界条件均采用NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析资料。控制预报(CTL)采用的主要物理过程包括WSM5微物理方案(Hong et al., 2004)、YSU边界层参数化方案(Hong et al., 2006)、Dudhia短波辐射方案(Dudhia, 1989)、RRTM长波辐射方案(Mlawer et al., 1997)等,内区域未使用积云对流参数化方案[外区域则采用了Kain-Fritsch方案(Kain and Fritsch, 1990)],侧边界条件由外区域的模拟结果得到。模拟时段为2012年7月21日00时至22日00时(协调世界时,下同)。

传统的全球中期集合预报的分辨率较低,可采用较多的集合成员(20~50个)用以捕捉实际误差,而在SSEFs中,考虑到计算资源的限制,一般8~15个成员就已足够(Nuissier et al., 2012)。在本文

的集合预报试验中,选取NCEP全球集合预报的21个成员,使用聚类法(Szintai and Ihász, 2006)依照它们的各自特征进行归类合并成为8个成员,并将8个成员的分析扰动插值到外区域的网格中,为本次风暴尺度集合预报试验提供具有大尺度信息的侧边界条件扰动。与直接采用全球集合预报系统为SSEFs提供侧边界条件扰动相比,使用分辨率适中的外层嵌套模式的优点在于可以避免侧边界处由于分辨率的巨大差异所造成的天气系统不连续等一系列负面影响(Tennant, 2015)。

此外,本文采用中国国家气象信息中心的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 逐小时网格降水融合资料作为降水预报对比实况。NCEP ADP全球高空及地面观测资料(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0> [2015-10-09])则用于ETKF循环中更新扰动。

## 3 集合预报试验方案设计

### 3.1 ETKF 方案简介

ETKF方法由集合卡尔曼滤波(Evensen, 2004)衍生而来,与后者相比具有计算量更少的优点(Wei et al., 2006),其核心原理是通过求解变换矩阵 $T$ 的求解得到分析扰动,即:

$$X^a = X^f T \Pi, \quad (1)$$

其中, $X^f$ 为前一个循环的预报扰动;而引入放大因子 $\Pi$ 的作用是驱使预报误差协方差和集合估计方差相匹配(这种匹配关系是可信的集合概率预报的必要条件); $T$ 的具体求解方法参见Bowler and Mylne(2009)。

ETKF试验的框架如图1所示,初始时刻即7月18日00时的扰动由NCEP全球集合预报的分析扰动提供,扰动变量为 $T$ (温度)、 $Q_v$ (水汽混合比)、 $U$ (纬向风)、 $V$ (经向风),即使用聚类法(Szintai and Ihász, 2006)将21个集合成员聚类平均后并为8个成员(名称为集合成员1到8),并将每个成员的分析扰动分别插值到模式内区域与外区域的网格中,接着将插值后的扰动分别叠加到内区域与外区域的分析场上使内外区域分别得到8个扰动初始场,分析扰动的求解方程为

$$X^f = X_k^f - \overline{X^f}. \quad (2)$$

随后内区域进行6 h一次的ETKF循环,每个循环的分析时刻加入实时观测资料求解变换矩阵 $T$ 及放大因子,从而得到新的分析扰动 $X^a$ 并进行下一个6 h的模式预报,一直到7月21日00时共计12

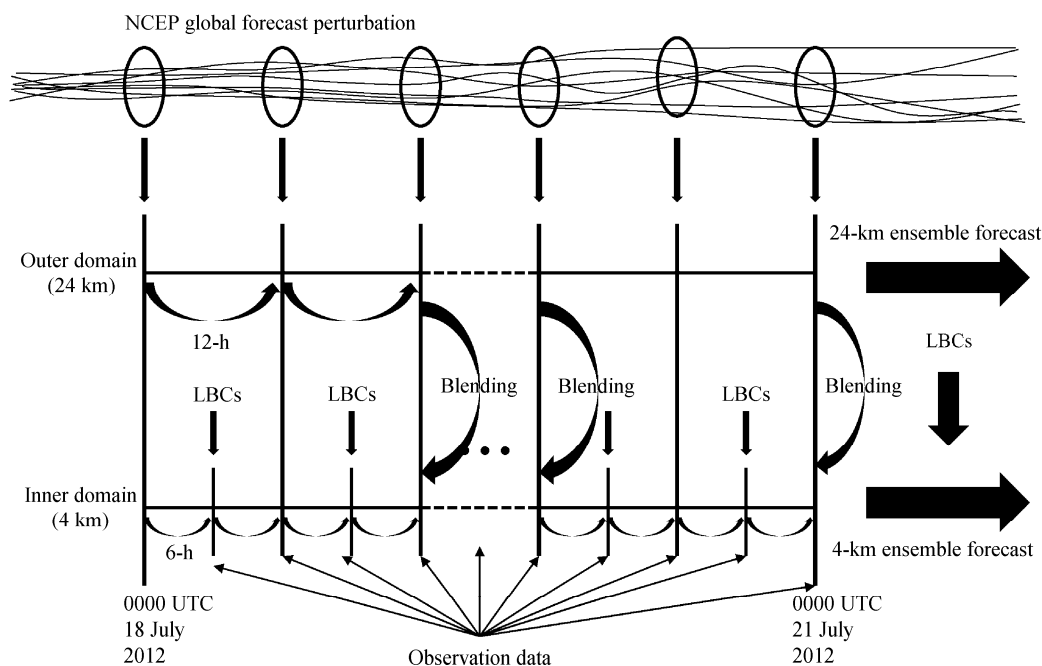


图1 ETKF-blending 集合更新预报系统框架示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter)-blending ensemble update system

个循环。为了防止外区域扰动过度发散, 每 12 h 重新引入实时的 NCEP 全球集合预报的分析扰动(扰动的获取方式与 7 月 18 日 00 时相同, 即将该时刻 NCEP 全球集合预报的分析扰动插值并叠加到相应时刻外区域的初始场上)并进行 12 h 预报, 从而为内区域提供大尺度的侧边界条件扰动, 以保证最终获得的分析扰动中既包含中小尺度不确定性, 又包含大尺度不确定性。将内区域最终的扰动叠加到 7 月 21 日 00 时的初始场上, 进行集合预报试验, 侧边界条件扰动依旧由外区域提供。

### 3.2 混合扰动方案设计

尽管通过 ETKF 循环更新系统所构造的初始扰动具有流依赖且包含分析中的多尺度不确定性等优点, 但还有两点不足: 首先, 由于循环过程中所用到的观测资料分布不均匀以及模式本身所带来的误差等原因, 实际分析误差中能够快速增长的部分与分析误差本身的分布并不一致, 因此对于不同的天气个例, 应当把其中能够快速增长的扰动部分提取出来; 其次, Wang et al. (2014) 曾提到, 由于 SSEFs 的模式区域较之中尺度集合预报系统更小, 因此侧边界扰动不匹配的影响可能更加重要。为此, 本文通过构造多尺度相互作用的混合初始扰动, 旨在解决 ETKF 方案的侧边界扰动不匹配问题,

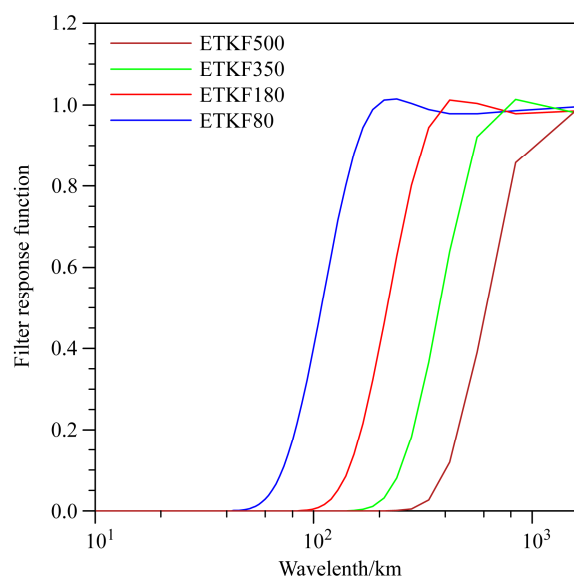


图2 4种滤波波段的 Barnes 低通滤波响应函数

Fig. 2 Response functions of Barnes low-pass filtering for the four blending schemes

并在此基础上获得更优的预报效果。

混合扰动的构建基于 Barnes 低通滤波, 并在传统 Barnes 滤波的基础上进行了二次修正(Gao et al., 2014), 从而达到快速收敛的效果(即响应曲线快速趋于最大值;图2)。本次试验旨在将内区域 ETKF 构造的初始扰动与外区域由 NCEP 全球集合预报提

供的扰动相结合，构造不同尺度相互作用的三维混合初始扰动，具体方案如下：

$$X_{d02}^a = X_{d02}^f THH - (X_{d02}^f THH)_{lowpass} + (X_{d01}^a)_{lowpass}, \quad (3)$$

其中，下标 d01 和 d02 分别代表外区域和内区域；lowpass 代表低通滤波过程。在 7 月 19 日 00 时、20 日 00 时和 21 日 00 时三个 ETKF 循环的分析时刻分别将内区域通过 ETKF 更新得到的扰动场，与外区域由 NCEP 全球集合预报扰动直接插值得到的扰动场，进行如公式（3）所示的滤波混合，并叠加到相应三个时刻的分析场上进行模式预报，意在探究在 ETKF 循环更新扰动的过程中不断融入与侧边界条件相匹配的大尺度信息，是否能进一步为风暴尺度集合预报带来正的贡献。

本次混合扰动试验依据模式配置（分辨率、区域大小等）选取了 4 组滤波波段构造对比试验（图 2；表 1）：ETKF80（48~120 km）、ETKF180（80~280 km）、ETKF350（140~560 km）、ETKF500（240~840 km），旨在比对不同尺度构造混合扰动方案在“7.21”暴雨中预报效果。值得注意的是：当选择滤波区间时，需要考虑模式分辨率以及区域大小等相关配置，本文中 ETKF80 试验的最小滤波响应波长（48 km）即外区域的最小可辨波长，ETKF500 试验的最大滤波响应波长（840 km）小于内区域的经向最大可分辨波长（1680 km）。此外，在进行扰动侧边界不匹配特征分析时，加入了 Down 试验作为对比，其原理是直接将 7 月 21 日 00 时的 NCEP 全球集合预报的分析扰动插值到内区域作为初始扰动（与外区域获取扰动的方式相同），该方法最突出的优点是内区域所叠加的初始扰动与其侧边界条件扰动相一致，缺点则是缺少包含分析不确定性的中小尺度扰动信息。为了定性比较，本文各组试验均未引入模式物理扰动。

表 1 集合预报试验方案

Table 1 Schemes of the different ensemble forecast experiments

试验名称	内区域初始扰动	外区域初始扰动（为内区域提供侧边界条件扰动）
ETKF	ETKF 方法	动力降尺度方法
ETKF80	混合扰动方法(48~120 km)	动力降尺度方法
ETKF180	混合扰动方法 (80~180 km)	动力降尺度方法
ETKF350	混合扰动方法 (140~560 km)	动力降尺度方法
ETKF500	混合扰动方法 (240~840 km)	动力降尺度方法
Down	动力降尺度方法	动力降尺度方法

图 3 给出了各组试验的集成员 1 在 850 hPa 上的温度扰动示意图。可以看到，通过混合法构造的四组初始扰动，尽管分布形态各有差异，但是它们均不同程度地将内区域的 ETKF 扰动与外区域的大尺度扰动融合在一起，其中 ETKF80 的分布形态最近似于 Down，且仅保留了 ETKF 扰动的部分风暴尺度信息，而 ETKF500 则保留了 ETKF 扰动的大部分信息，并加入了少量 Down 中的大尺度扰动信息。即滤波波段选取得越小，混合后的扰动融入的来自于 NCEP 全球集合预报扰动的大尺度信息就越多，但同时损耗的中小尺度信息也越多。

3.3 侧边界扰动匹配度的衡量方法

扰动在侧边界处不匹配主要是指细网格（内区域）的初始扰动与粗网格（外区域）的初始扰动（在单向边界模式中为细网格提供侧边界条件扰动）在侧边界处的尺度不一致，并由此导致模式侧边界处产生虚假杂乱波（Warner et al., 1997）。然而，这将会给预报带来怎样的负面效果尚未见报道。本文根据内区域与外区域地面气压离散度的差异作定量衡量，用二者的标准化偏差（NOR）表征该差异（即用内区域的地面气压离散度减去外区域插值到内区域后的地面气压离散度，再除以外区域的地面气压离散度）。二者的标准化偏差越趋近于 0，则侧边界扰动与初始扰动的契合程度越高。尽管由于内区域与外区域分辨率以及参数化方案选择不一致同样会导致 NOR 增大，但是在本文研究中认为侧边界条件扰动不匹配在其中占据主导地位（Caron, 2013）。

3.4 离散度与预报误差的衡量方法

使用离散分区预报技巧评分与误差分区预报技巧评分（dFSS 和 eFSS；Dey et al., 2014）来衡量离散度与预报误差，该评分方法基于邻位方法（Neighborhood method；Roberts and Lean, 2008），FSS（Fractions Skill Score）的计算步骤如下：（1）对于预报场和分析场区域每个格点上的降水值，首先定义一个阈值，并据此将降水场转化为“二进制”场（即满足阈值条件的格点表示为 1，未满足阈值的格点表示为 0），得到二值化的预报场  $I_F$  和分析场  $I_0$ ；（2）以分析格点为中心，设置“扫描半径”（这里的“半径”并非传统意义上的半径，而是指格点数），对于分析区域内的每个格点，将“扫描半径”范围内的每个格点的值（0 或 1）进行区域加权平均，从而得到该格点降水的邻域概率（Neighborhood

probability, 简称 NEP), 半径设置的越大, 该半径范围内的误差则得到更多的剔除, 得到预报和分析场的 NEP:  $F_{(n)i,j}$  和  $O_{(n)i,j}$  [公式 (4) 和 (5)], 其中  $n$  的值为两倍的“扫描半径”格点数再加 1 (即分析格点); (3) 分别求得  $F_{(n)i,j}$  和  $O_{(n)i,j}$  的均方差以及参照均方差 [公式 (6) 和 (7)], 并据此计算 FSS [公式 (8)]。

$$F_{(n)i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_F \left( i+k-1-\frac{n-1}{2}, j+l-1-\frac{n-1}{2} \right), \quad (4)$$

$$O_{(n)i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_O \left( i+k-1-\frac{n-1}{2}, j+l-1-\frac{n-1}{2} \right), \quad (5)$$

$$\text{MSE}_{(n)} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [F_{(n)i,j} - O_{(n)i,j}]^2, \quad (6)$$

$$\text{MSE}_{(n)\text{REF}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [F_{(n)i,j}^2 + O_{(n)i,j}^2], \quad (7)$$

$$\text{FSS}_{(n)} = 1 - \frac{\text{MSE}_{(n)}}{\text{MSE}_{(n)\text{REF}}}, \quad (8)$$

其中,  $n$  表示邻位格点数 (即两倍的扫描半径加 1),  $N_x$  和  $N_y$  分别表示纬向和经向格点数。考虑到降水过程的往往伴随着不同尺度系统的相互作用, 在进行高分辨率降水预报后处理的时候考虑不同尺度上的作用是必要的, 因此基于该方案的一系列评分算法近年来在国内外已得到了广泛的运用 (Duda and Gallus, 2013; Zhu et al., 2015)。

对于控制试验和各组集合试验共 9 个预报成员, 计算每两个成员间的 FSS (共 36 组) 并计算平均从而得到 dFSS, 与传统的集合离散度算法相比, dFSS 有效避免了集合平均的求解, 并且可以衡量集合离散度在不同空间尺度上的作用特征 (Dey et al., 2014), dFSS 越小则离散度越高。同理, eFSS 则是依据 9 个预报成员与分析场间的 FSS 进行求解, eFSS 越大则误差越小。

### 3.5 降水概率预报技巧的衡量方法

集合预报的优点之一就是能够为未来发生的天气事件提供概率预报指导。布莱尔评分 (Brier score, 简称 BS; Candille and Talagrand, 2005) 是一种常见的衡量集合概率预报技巧高低的评分方法, 其表示形式为

$$\text{BS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2, \quad (9)$$

其中,  $P_n$  为每个格点上的预报概率;  $O_n$  表示观测频率, 对于某个阈值, 如果观测点的数值符合设定的阈值, 则  $O_n$  为 1, 否则  $O_n$  为 0。为了进一步评估混合初值扰动试验相对于 ETKF 试验在降水预报技巧上的表现, 本文在 BS 的基础上引入了其技巧评分 BSS (Brier skill score; Hersbach, 2000):

$$\text{BSS} = 1 - \frac{\text{BS}}{\text{BS}_{\text{REF}}}, \quad (10)$$

其中, 下标 REF 表示参照试验; BSS 大于 0 说明试验相对于参照试验有正的预报技巧贡献, 小于 0 则说明试验相对于参照试验无预报技巧贡献。本文将 ETKF 试验作为参照试验, 即  $\text{BS}_{\text{REF}}$ 。进一步引入 3.4 节中说到的邻位算法, 即分别使用预报场与分析场的 NEP 来代替公式 (9) 中的  $P_n$  和  $O_n$ , 从而可以得到 BSS 评分随空间尺度的变化。

## 4 试验结果分析

### 4.1 侧边界不匹配机制分析

图 4a 给出了 ETKF 试验中内区域与外区域地面气压离散度的 NOR 在预报 1 h 时刻的空间分布。由图可见, 在区域左上角和右下角的侧边界附近出现了较大范围的正偏差大值区, 大值中心达 1。图 4b-f 分别对应为 4 种滤波波段混合扰动法以及 Down 试验的 NOR 值分布。可见, 混合扰动法可以有效缓解 ETKF 扰动方法所造成的侧边界扰动不一致的问题。其中, ETKF80 的效果最优, 它几乎完全消除了红色的正值偏差区域, 在区域左下角甚至优于 Down; ETKF180 其次; ETKF500 最差。其原因在于: 当混合时选取的波长较小时, 混合扰动可以获得更多来自于外区域的大尺度扰动场的信息, 从而能够更好地与同样由外区域大尺度扰动所驱使的侧边界扰动相匹配。但是好的侧边界匹配度是否就意味着可以获得更好的降水预报评分? 该问题将在文中作进一步深入分析。

### 4.2 离散度与预报误差

本次降水过程主要分为锋前暖区降水 (2~8 h) 和锋面降水 (9~20 h) 两个阶段, 在锋面降水阶段中 9~12 h 对应为中尺度对流系统的形成阶段, 12~20 h 为发展及成熟阶段, 21 h 之后则为消亡阶段。图 5 给出了北京地区 (39.4°~41°N, 115.4°~117.5°E) 实况与控制试验的逐小时累积降水随预报时效的变化。可见, 控制试验与实况的匹配度较高, 但是对前期暖区降水的模拟还存在一定偏差。与控



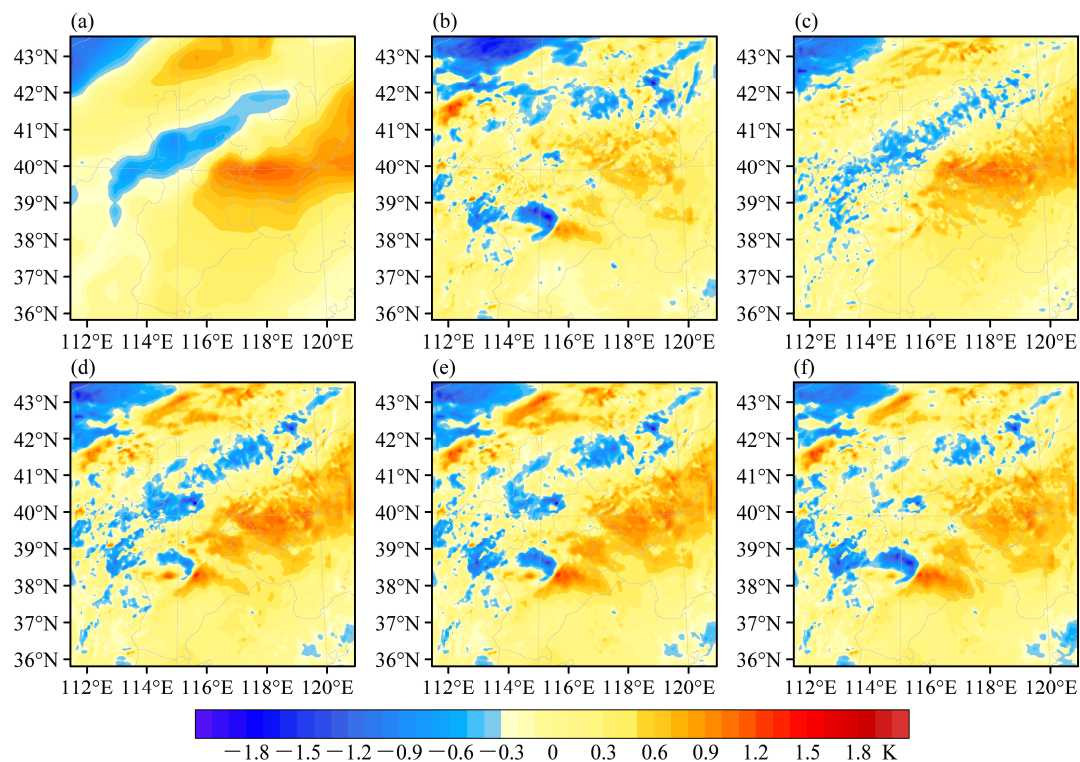


图3 扰动成员1在850 hPa的温度扰动(单位: K): (a) Down; (b) ETKF; (c) ETKF80; (d) ETKF180; (e) ETKF350; (f) ETKF500

Fig. 3 850-hPa temperature perturbations (units: K) for Member 1: (a) Expt Down; (b) Expt ETKF; (c) Expt ETKF80; (d) Expt ETKF180; (e) Expt ETKF350; (f) Expt ETKF500

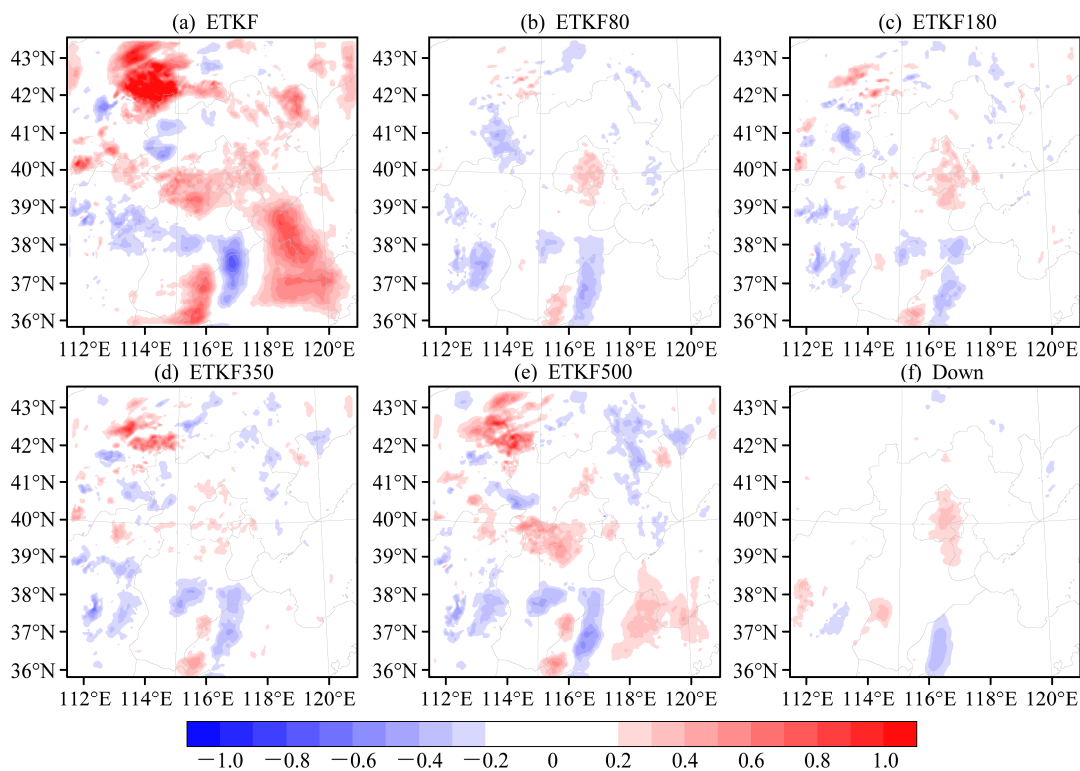


图4 各组集合预报试验内区域与外区域地面气压离散度标准化偏差: (a) ETKF; (b) ETKF80; (c) ETKF180; (d) ETKF350; (e) ETKF500; (f) Down  
Fig. 4 Normalized differences in surface pressure spread between inner domain and outer domain for different ensemble forecast experiments: (a) ETKF, (b) ETKF80, (c) ETKF180, (d) ETKF350, (e) ETKF500, and (f) Down

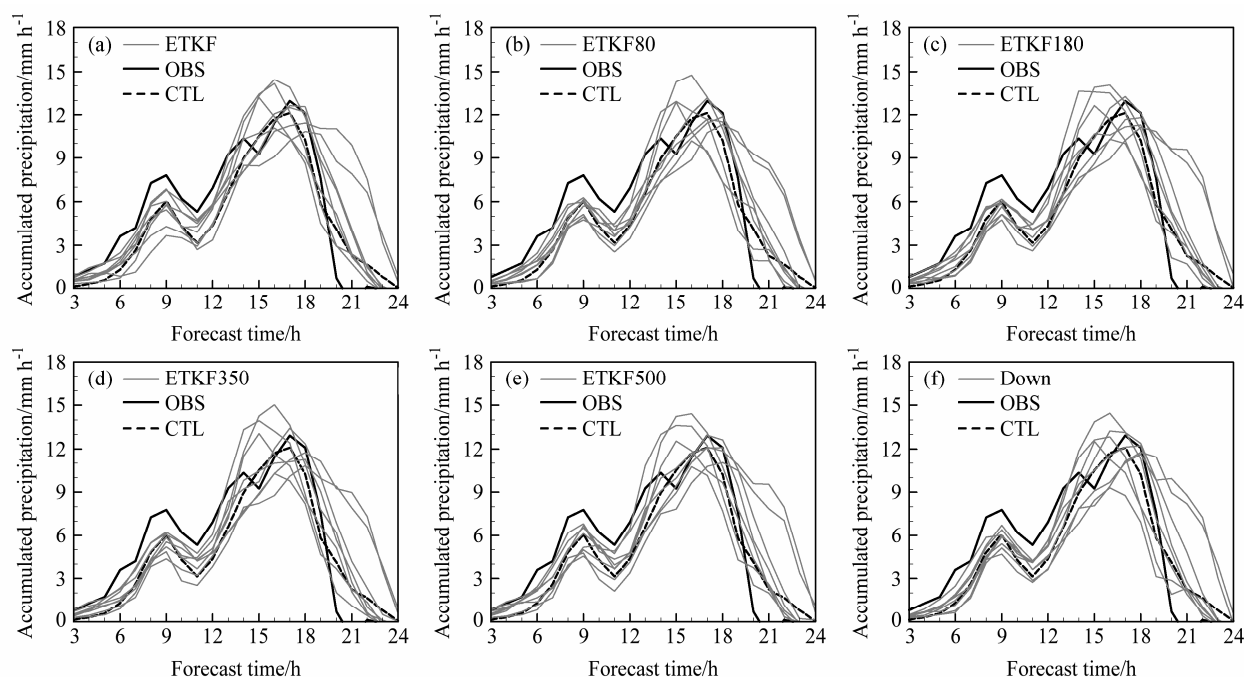


图 5 2012 年 7 月 21 日 03 时至 7 月 22 日 00 时北京地区 (39.4°~41°N, 115.4°~117.5°E) 观测与各组集合试验的集成员、控制试验区平均的逐小时累积降水量 (单位:  $\text{mm h}^{-1}$ ) 时间序列: (a) ETKF; (b) ETKF80; (c) ETKF180; (d) ETKF350; (e) ETKF500; (f) Down。虚线为控制试验, 黑色实线为观测, 灰色实线为集成员

Fig. 5 Spatially averaged hourly accumulated precipitation over Beijing area (39.4°~41°N, 115.4°~117.5°E) as a function of lead time from initialization time 0300 UTC 21 Jul for observations (OBS), ensemble members of different ensemble experiments, and control experiments (CTL): (a) ETKF; (b) ETKF80; (c) ETKF180; (d) ETKF350; (e) ETKF500; (f) Down

制试验相比, 各组集合试验对该阶段的预报均有更高的技巧, 实况降水在多个时次均处于集合区间之内, 且多数预报成员较控制试验均与实况更为接近, 说明集合预报较单一确定性预报包含了更多接近于实况的预报信息。各组集合试验之间并没有非常明显的差异, 其原因可能是由于“7.21”暴雨过程中的大尺度强迫较为显著 (庄潇然等, 2016), 导致不同初始扰动间的作用差异较小, 当然这也可能与未考虑模式扰动有关。

图 6 给出了各组混合试验以及 Down 试验与 ETKF 试验逐三小时累积降水的 dFSS 和 eFSS 之差 [阈值选取为  $10 \text{ mm (3 h)}^{-1}$ , 其他各组阈值得到的结果类似]。图 6 中  $x$  轴为“扫描半径”,  $y$  轴为预报时间 (每个时刻对应为前 3 h 到该时刻的累积降水)。可以看出, 与 ETKF 试验相比, 仅包含较大尺度扰动信息的 Down 试验在预报前 9 h 的离散度显著较低 (图 6e), 这一阶段对应为暖区降水, 以平缓的持续性降水为主, 随着“扫描半径”的增加, ETKF 与 Down 在离散度上的差异逐渐减小, 说明小尺度的扰动信息对离散度的贡献主要体现在较

小的预报尺度上。各组混合扰动试验在这一阶段的离散度同样小于 ETKF (图 6a-d), 但与 Down 相比均有不同程度的提高; 在 MCS 的形成阶段 (9~12 h), 各组试验的离散度与 ETKF 均无显著差异, 随着 MCS 的逐渐发生发展 (12~21 h), Down 与各组混合试验的离散度均显著超过了 ETKF, 其中 ETKF180 的效果最优 (图 6b), 其优势一直持续到 MCS 的消亡阶段 (21~24 h)。总体而言, 尽管 ETKF 中包含分析不确定性的小尺度信息在前期的小尺度预报上是有效的, 但其离散度很难持续增长, 而 Down 由于缺失小尺度信息而在前期表现较差, 但其离散度可以快速增长, 混合扰动则兼具了 ETKF 与 Down 二者的特征, 选择合理的混合尺度甚至可以获得最优的离散度增长速度 (ETKF180)。

以往的研究表明, 较高的离散度往往对应着较大的预报误差 (Toth, 2001), 图 6e-j 给出的 eFSS 也体现了这一点: 在暖区降水阶段 ETKF 的预报误差均显著大于其他各组试验, 且随预报尺度的增加而增加, 说明小尺度的扰动信息对于小尺度的误差有所改善, 但对于较大尺度的误差则影响较小; 而



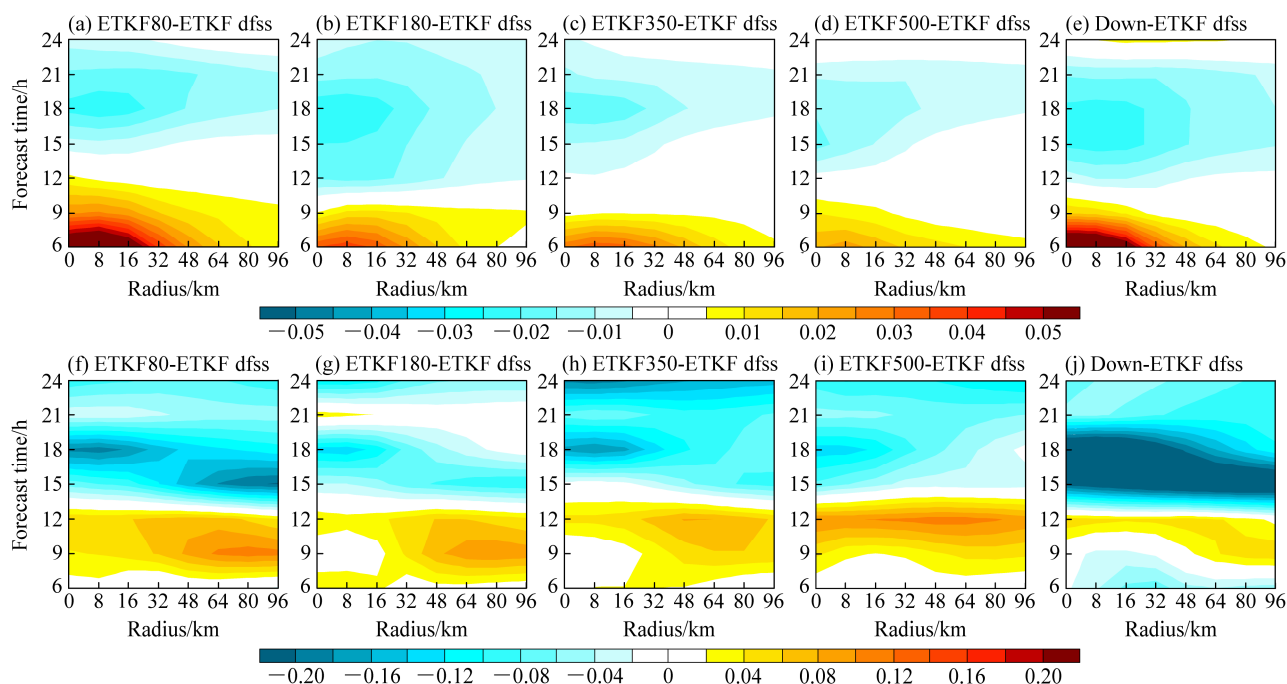


图 6 (a-e) 离散分区预报技巧评分与 (f-g) 误差分区预报技巧评分 ( $\times 10$ ): (a, f) ETKF80 与 ETKF 的差; (b, g) ETKF180 与 ETKF 的差; (c, h) ETKF350 与 ETKF 的差; (d, i) ETKF500 与 ETKF 的差; (e, j) Down 与 ETKF 的差

Fig. 6 (a-e) Dispersion and (f-g) error fractions skill scores (dfss and eFSS) for (a, f) difference between the ETKF80 and ETKF, (b, g) difference between the ETKF180 and ETKF, (c, h) difference between the ETKF350 and ETKF, (d, i) difference between the ETKF500 and ETKF, (e, j) difference between the Down and ETKF

在锋面降水阶段, ETKF 试验的 eFSS 表现相对更好, 而 Down 的表现最差, ETKF180 与 ETKF 试验较为接近, 在 21 h 时甚至略优于 ETKF。

总体而言, 构造能够与侧边界条件扰动相匹配的混合初始扰动可以改善本次过程中降水最为强盛阶段的离散度表现, 但不确定性的提高(即离散度增加)同时会带来较大的预报误差, 合理地选择混合尺度可以获得最优的离散度表现, 并缓解由此所带来的误差的增大, 说明该方案是可行且有效的。

#### 4.3 降水概率预报

图 7 给出了各组混合试验以及 Down 的 BSS (参照试验均为 ETKF), 可以看出与 ETKF 相比, 各组混合试验的优势均主要体现在较高雨量的预报上, 而对于  $30 \text{ mm} (3 \text{ h})^{-1}$  以下阈值的预报, 仅有 ETKF180 略优于 ETKF, 这也与 4.2 节中 ETKF180 较优的 dfss 和 eFSS 相一致, 进一步验证并说明了在 SSEFs 中构造混合初始扰动方法是可行的, 但需要选择合理的滤波区间。

为进一步研究各组集合试验的概率预报技巧在不同尺度上的作用特征, 图 8 给出了各组混合试验与 Down 基于 NEP 的逐三小时累积降水的 BSS。

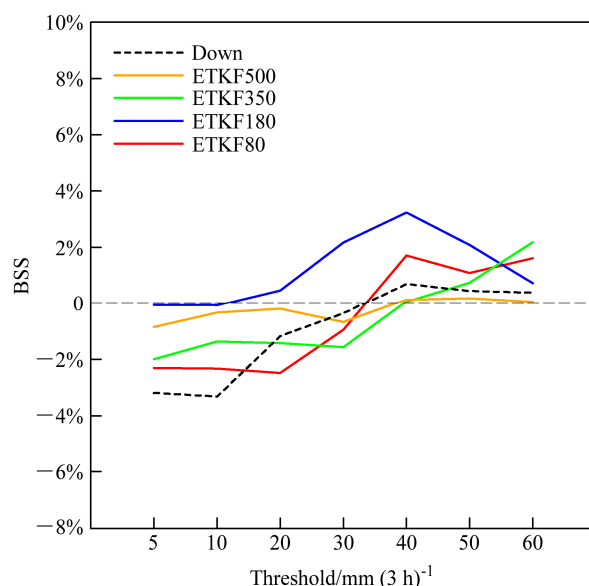


图 7 各组集合预报试验时间平均的逐三小时累积降水量 BSS

Fig. 7 Temporally averaged BSS (Brier skill score) of different ensemble experiments with reference scheme of ETKF for 3-h accumulated

可以看出, 在暖区降水阶段, Down 仅在大尺度部分优于 ETKF (图 8e、j), 证明了与侧边界扰动相匹配的大尺度扰动信息可以有效改善前期的大尺

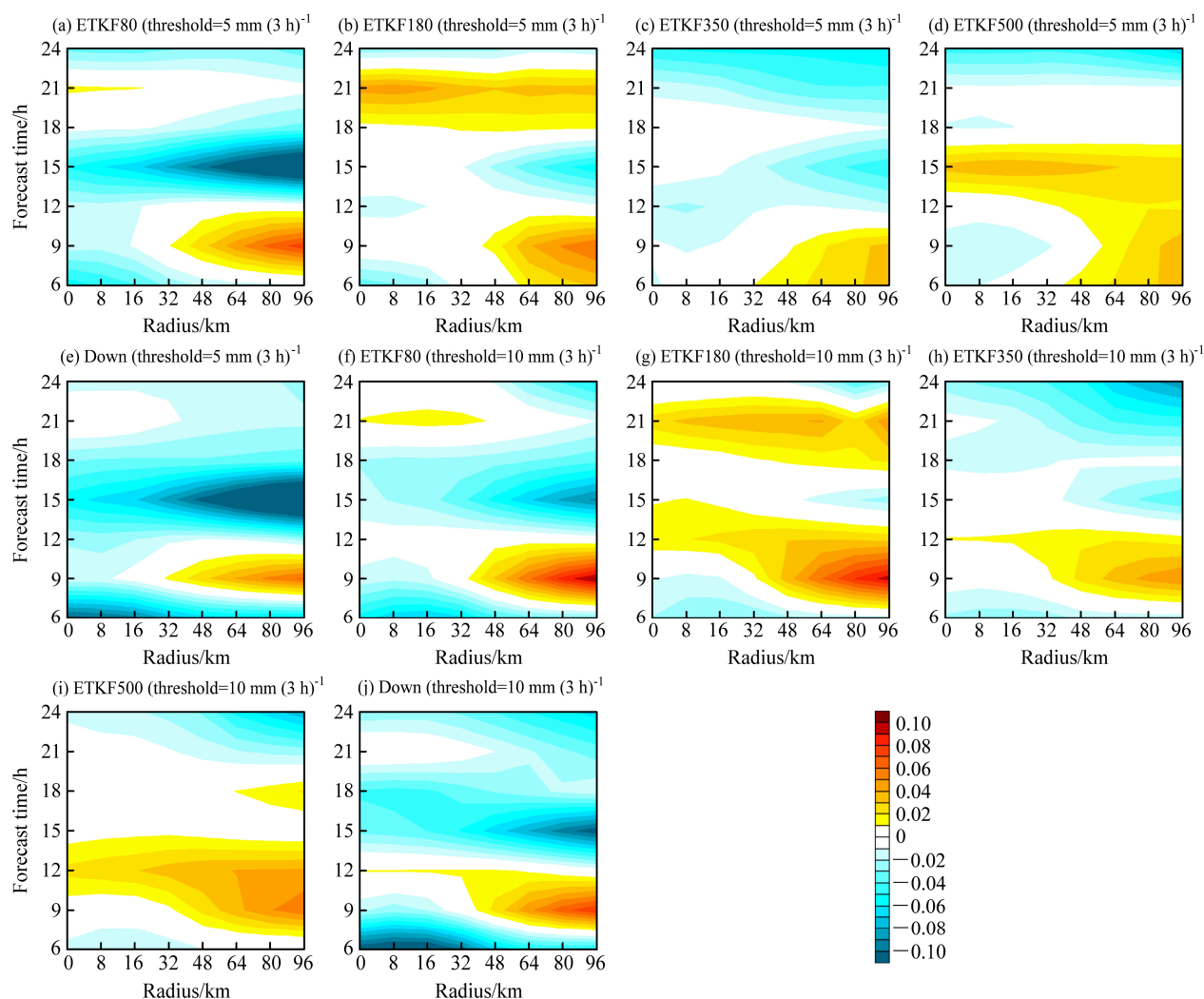


图 8 阈值为 (a-e)  $5 \text{ mm (3 h)}^{-1}$  和 (b-f)  $10 \text{ mm (3 h)}^{-1}$  的各组集合试验的 BSS: (a, f) ETKF80; (b, g) ETKF180; (c, h) ETKF350; (d, i) ETKF500; (e, j) Down

Fig. 8 BSS for different ensemble experiments with thresholds of (a-e)  $5 \text{ mm (3 h)}^{-1}$  and (b-f)  $10 \text{ mm (3 h)}^{-1}$ : (a, f) ETKF80; (b, g) ETKF180; (c, h) ETKF350; (d, i) ETKF500; (e, j) Down

度预报部分,但在小尺度预报部分,包含分析不确定性的尺度扰动信息是必要的。相较之下,各组混合扰动试验均显著改善了 Down 试验在小尺度部分技巧不足的问题,同时也进一步提高了大尺度部分的预报技巧,这一特征随着阈值的提升愈发显著;在预报 9 h 之后,Down、ETKF80、ETKF350 较 ETKF 均无改进,且劣势均体现在大尺度的预报部分,这可能是由于伴随着 MCS 逐渐由小尺度向较大尺度的发展,ETKF 试验所构造的扰动当中包含分析不确定性的中小尺度信息也在相应地向大尺度发展,并可以更好地与实时的天气形势相适应。值得注意的是,在 9~18 h 时段,ETKF500 的预报技巧在大尺度部分均优于 ETKF,考虑到

ETKF500 实际上保留了大部分 ETKF 中的中小尺度扰动信息,可以认为 ETKF500 中提取出小尺度扰动信息已经包含了能够快速增长的部分。在离散度表现上最优的 ETKF180 试验较之 ETKF 试验在大部分预报时段与尺度上也均有所改善(图 8b、g)。

值得注意的是,在解决侧边界不匹配问题方面效果最优的 ETKF80 试验并没有获得较为理想的预报结果,这也说明仅考虑侧边界扰动匹配并不能获得最优的预报效果,应综合考虑不同尺度扰动的相互作用(即在混合的时候选取合适的滤波区间)。

## 5 结论与讨论

鉴于强对流天气是在复杂天气条件下经多尺

度系统非线性相互作用而形成的, 本文采取了将 Barnes 低通滤波融入到 ETKF 更新预报系统中的混合初值扰动法, 并基于此在 WRF 模式上构建了风暴尺度集合预报系统。通过对北京“7.21”特大暴雨进行集合预报试验, 对比了 ETKF、Down 以及各组混合扰动试验的作用特征, 从而探讨了在风暴尺度集合预报中使用混合初始扰动方法的可行性, 得到以下主要结论:

(1) 滤波波段选取的越小, 混合后得到的扰动中越能够吸纳来自于外区域的大尺度扰动信息, 反之则保留更多 ETKF 扰动的中小尺度特征。各组滤波波段构造的混合扰动法均有效缓解了模式初始扰动与侧边界扰动不匹配的问题, 其中 ETKF80 由于吸纳了较多与侧边界条件扰动相匹配的大尺度信息, 因而效果最优。

(2) 控制试验 (CTL) 对本次过程中的暖区降水阶段的模拟效果不佳, 与之相比, 各组集合试验有着更高的可信度。

(3) 从 dFSS 上来看, 包含中小尺度分析不确定性的 ETKF 在暖区降水阶段的集合离散度最高, 仅包含较大尺度扰动信息的 Down 离散度最低, 但这一特征仅表现在小尺度的预报层面, 在大尺度上 ETKF 的离散度在这一阶段则没有明显的优势。各组混合扰动试验的离散度居于 ETKF 和 Down 之间, 除了 ETKF80 以外, 其他三组混合试验效果均更加接近于 ETKF; 随着锋面降水阶段的开始, Down 与各组集合试验的离散度均超过 ETKF, 选择合适的滤波波段构造混合试验 (ETKF180) 在各个尺度上均获得最优的离散度。

(4) 从 eFSS 上来看, 在暖区降水阶段 ETKF 试验的预报误差大于其他各组试验, 但均集中在大尺度上, 说明 ETKF 中的中小尺度扰动信息对于小尺度的预报误差有着较好的捕捉能力, 但在大尺度上存在明显缺陷。随着预报时次的增加, 各组混合试验和 Down 试验的离散度均超过 ETKF, 同时预报误差也逐渐增大, 但其中 ETKF180 的 eFSS 表现仍与 ETKF 相近, 说明选择合理的滤波区间构造混合扰动可以获得最优的离散度以及预报误差表现。

(5) 从降水概率预报 (BSS) 方面看, ETKF180 的总体效果依然最优, 这也与其较好的 dFSS、eFSS 相对应。

(6) 从各组集合试验的 BSS 随时空尺度的变化特征来看, 与侧边界扰动相匹配的大尺度扰动信息

可以有效改善预报前期的大尺度预报部分, 但在小尺度预报部分, 包含分析不确定性的小尺度扰动信息是必要的, 在预报 9 h 之后的锋面降水阶段, Down、ETKF80、ETKF350 较 ETKF 均无改进, 说明 ETKF 当中包含分析不确定性的中小尺度扰动信息在向大尺度发展的同时可以更好地与实时的天气形势相适应。ETKF180 的效果总体而言依然最优, 进一步印证了在 SSEFs 当中构造混合初始扰动是可行的, 但需要选取合适的滤波区间。

本文基于社会关注度较高的北京“7.21”特大暴雨过程, 初步探讨了基于多尺度混合初始扰动方法的风暴尺度集合预报系统的适用性。未来研究中需要考虑不同天气系统背景下的强对流天气个例, 并分别研究其中误差的发展特征与天气系统本身、模式配置之间的关联, 为进一步发展自适应的风暴尺度集合预报初始扰动方法打下基础。此外, 仅对初始场及侧边界条件进行扰动并不能使集合成员之间获得足够的发散度, 因此如何选取合适的次网格尺度物理过程扰动方案与初始扰动方案进行不同尺度上的相互搭配与弥补也是未来工作的主要着眼点。

## 参考文献 (References)

- Barnes S L. 1994. Applications of the Barnes objective analysis scheme. Part I: Effects of undersampling, wave position, and station randomness [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11 (6): 1433-1448, doi:10.1175/1520-0426(1994)011<1433:AOTBOA>2.0.CO;2.
- 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, Palmer T N. 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (9): 1434-1456, doi:10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2.
- Candille, Talagrand O. 2005. Evaluation of probabilistic prediction systems for a scalar variable [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (609): 2131-2150, doi:10.1256/qj.04.71.
- Caron J F. 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: A case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (1): 356-374, doi:10.1175/MWR-D-12-00051.1.
- Craig G C, Keil C, Leuenberger D. 2012. Constraints on the impact of radar rainfall data assimilation on forecasts of cumulus convection [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138 (663): 340-352, doi:10.1002/qj.929.
- Dey S R A, Leoncini G, Roberts N M, et al. 2014. A spatial view of ensemble spread in convection permitting ensembles [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (11): 4091-4107.
- 杜钧, 李俊. 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用 [J]. *气象科技进展*, 4 (5): 6-20. Du Jun, Li Jun. 2014. Application of ensemble

- methodology to heavy-rain research and prediction [J]. *Adv. Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese), 4 (5): 6–20, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.001.
- Duda J D, Gallus W A. 2013. The Impact of large-scale forcing on skill of simulated convective initiation and upscale evolution with convection-allowing grid spacings in the WRF [J]. *Wea. Forecasting*, 28 (4): 994–1018, doi:10.1175/WAF-D-13-00005.1.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (46):3077–3107.
- Evensen G. 2004. Sampling strategies and square root analysis schemes for the EnKF [J]. *Ocean Dyn.*, 54 (6): 539–560, doi:10.1007/s10236-004-0099-2.
- Gao F, Childs P P, Huang X Y, et al. 2014. A relocation-based initialization scheme to improve track-forecasting of tropical cyclones [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (1): 27–36, doi:10.1007/s00376-013-2254-5.
- Gebhardt C, Theis S E, Paulat M, et al. 2011. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries [J]. *Atmos. Res.*, 100 (2–3): 168–177, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.008.
- Harnisch F, Keil C. 2015. Initial conditions for convective-scale ensemble forecasting provided by ensemble data assimilation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143 (5): 1583–1600, doi:10.1175/MWR-D-14-00209.1.
- Hersbach H. 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems [J]. *Wea. Forecasting*, 15 (5): 559–570, doi:10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2.
- Hohenegger C, Walser A, Langhans W, et al. 2008. Cloud-resolving ensemble simulations of the August 2005 Alpine flood. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134 (633): 889–904
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (1):103–120.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9):2318.
- Hou D C, Kalnay E, Egemeier K K. 2001. Objective verification of the SAMEX '98 ensemble forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (1): 73–91, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0073:OVOTSE>2.0.CO;2.
- Hsiao L F, Liou C S, Yeh T C, et al. 2010. A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (8): 3298–3315, doi:10.1175/2010MWR3275.1.
- Johnson A, Wang X G, Xue M, et al. 2014. Multiscale characteristics and evolution of perturbations for warm season convection-allowing precipitation forecasts: Dependence on background flow and method of perturbation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (3): 1053–1073, doi:10.1175/MWR-D-13-00204.1.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (23):2784–2802.
- Kong F, Droegeemeier K K, Hickmon N L. 2007. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: Storm-scale experiments [J]. *Mon. Wea. Rea.*, 135 (3): 759–782, doi:10.1175/MWR3323.1.
- 李俊, 杜钧, 刘羽. 2015. 北京“7.21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验 [J]. *气象学报*, 73 (1): 50–71. Li Jun, Du Jun, Liu Yu. 2015. A comparison of initial condition-, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing “7.21” excessive storm rain event [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 73 (1): 50–71, doi:10.11676/qxxb2015.008.
- Mass C F, Ovens D, Westrick K, et al. 2002. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (3): 407–430, doi:10.1175/1520-0477(2002)083<0407:DIHRPM>2.3.CO;2.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-*k* model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14):16663–16682.
- Nuissier O, Joly B, Vié B, et al. 2012. Uncertainty of lateral boundary conditions in a convection-permitting ensemble: A strategy of selection for Mediterranean heavy precipitation events [J]. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12 (10): 2993–3011, doi:10.5194/nhess-12-2993-2012.
- Nutter P, Stensrud D, Xue M. 2004. Effects of coarsely resolved and temporally interpolated lateral boundary conditions on the dispersion of limited-area ensemble forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (10): 2358–2377, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2358:EOCRAT>2.0.CO;2.
- Palmer T N, Buizza R, Leutbecher M, et al. 2007. The ensemble prediction system—Recent and ongoing developments [C]//ECMWF Technical Memorandum.
- Peralta C, Bouallègue Z B, Theis S E, et al. 2012. Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D7), doi:10.1029/2011JD016581.
- Roberts N M, Lean H W. 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (1): 78–97, doi:10.1175/2007MWR2123.1.
- Saito K, Seko H, Kunii M, et al. 2012. Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction [J]. *Tellus A*, 64 (1): 11594, doi:10.3402/tellusa.v64i0.11594.
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. *大气科学*, 37 (3): 705–718. Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Fu Shenming, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 703–718, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12202.
- Szintai B, Ihász I. 2006. The dynamical downscaling of ECMWF EPS products with the ALADIN mesoscale limited area model: Preliminary evaluation [J]. *IDOJÁRÁS*, 110 (3–4): 253–277.
- Tennant W. 2015. Improving initial condition perturbations for MOGREPS-UK [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141 (691): 2324–2336, doi:10.1002/qj.2524.
- Toth Z. 2001. Ensemble forecasting in WRF [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (4): 695–697.
- Vié B, Nuissier O, Ducrocq V. 2011. Cloud-resolving ensemble simulations of Mediterranean heavy precipitating events: Uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (2):

- 403–423
- Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al. 2011. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (655): 483–502, doi:10.1002/qj.751.
- 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]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (5): 2043–2059, doi:10.1175/MWR-D-12-00354.1.
- Warner T T, Peterson R A, Treadon R E. 1997. A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78 (11): 2599–2617, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2599:ATOLBC>2.0.CO;2.
- Wei M Z, 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, doi:10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. 2015. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (8): 1143–1155, doi:10.1007/s00376-015-4232-6.
- 周玉淑, 刘璐, 朱科锋, 等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析 [J]. *大气科学*, 38 (5): 885–896. Zhou Yushu, Liu Lu, Zhu Kefeng, et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 885–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13185.
- Zhu K F, Yang Y, Xue M. 2015. Percentile-based neighborhood precipitation verification and its application to a landfalling tropical storm case with radar data assimilation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (11): 1449–1459, doi:10.1007/s00376-015-5023-9.
- 庄潇然, 闵锦忠, 蔡沅辰, 等. 2016. 不同大尺度强迫条件下考虑初始场与侧边界条件不确定性的对流尺度集合预报试验 [J]. *气象学报*, 74 (2): 244–258. Zhuang Xiaoran, Min Jinzhong, Cai Yuanchen, et al. 2016. Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 74 (2): 244–258, doi:10.11676/qxxb2016.019.