

张涵斌,计燕霞,陈敏,等,2022. 基于观测扰动的集合预报 EDA 初值扰动方法研究[J]. 气象,48(4):406-417. Zhang H B, Ji Y X, Chen M, et al, 2022. Study on the EDA initial condition perturbation method for ensemble prediction system based on observation perturbation[J]. Meteor Mon, 48(4):406-417(in Chinese).

基于观测扰动的集合预报 EDA 初值扰动方法研究^{*}

张涵斌¹ 计燕霞² 陈 敏¹ 孙 鑫² 夏 宇¹

¹ 北京城市气象研究院, 北京 100089

² 内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051

提 要: 北京城市气象研究院初步发展了 3 km 分辨率的华北对流尺度集合预报系统。为构建适用于该系统的初值扰动, 设计了观测随机扰动方案, 并与全球集合预报动力降尺度背景场相结合, 利用三维变分同化方法构建了集合资料同化(EDA)初值扰动; 开展了 EDA 方案在华北对流尺度集合预报系统中的批量试验, 并与动力降尺度初值扰动方法进行了对比。结果表明: 观测扰动构建方法合理, 能够产生与观测误差量级相当且正态分布的观测扰动; 动力降尺度方法初始离散度较大, EDA 方案如果同化单一未扰动观测会约束各成员的集合离散度, 而同化扰动观测之后相对于同化单一观测而言离散度增加, 且基于观测扰动的 EDA 初值扰动场能够代表背景场和观测的不确定信息; 从统计检验结果来看, 相对于动力降尺度, EDA 初值扰动方法可以大幅减少短预报时效的预报误差, 集合离散度略有减少, 而集合概率技巧评分具有较明显提升; 降水概率预报检验结果表明 EDA 方法能够显著改善动力降尺度方法对强降水的漏报现象, 对于局地降水的量级和时段具有更准确的预报能力; 试验时段内的统计降水评分结果也表明, 不管是小雨、中雨还是大雨量级, EDA 方法均能够获得更好的概率预报评分效果。

关键词: 对流尺度集合预报, 集合资料同化, 初值扰动

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.102301

Study on the EDA Initial Condition Perturbation Method for Ensemble Prediction System Based on Observation Perturbation

ZHANG Hanbin¹ JI Yanxia² CHEN Min¹ SUN Xin² XIA Yu¹

¹ Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

² Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051

Abstract: At present, a prototype of Convection Permitting Ensemble Prediction System of North China is developed by Beijing Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration. In order to construct initial condition perturbation for this ensemble prediction system, an ensemble data assimilation (EDA) initial condition perturbation method is developed based on observation perturbation and background state from global ensemble using 3-dimension variation data assimilation (3D-Var). The batch experiments of EDA method in the Convection Permitting Ensemble Prediction System of North China are carried out and compared with another initial condition perturbation method of dynamical downscaling. The results show that the construction of observation perturbation is scientific, and can produce observation perturbation of normal distribution with the magnitude in accordance with observation error. For the initial field, the members of dynamic downscaling are sufficiently dispersive, and the EDA with unperturbed

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506804、2018YFF0300103)共同资助

2021 年 1 月 23 日收稿; 2021 年 10 月 23 日收修定稿

第一作者: 张涵斌, 主要从事气象集合预报研究. E-mail: zhb828828@163.com

observation will constrain the dispersion of members, while the EDA with perturbed observation can maintain the ensemble dispersion, and the generated perturbation can represent the uncertainty of both the background field and the observation. From the batch test results, the EDA can significantly reduce the forecast error of the short range compared with the dynamic downscaling, with the ensemble spread slightly decreased. The probability score also shows some improvements from EDA. The results of precipitation forecast show that the EDA method can significantly improve the precipitation forecast that it can provide more accurate magnitude and time period of local precipitation. The statistical score of precipitation forecast also show that EDA method has better probability forecast skill for light rain, moderate rain and heavy rain.

Key words: convection permitting ensemble prediction system, ensemble data assimilation (EDA), initial condition perturbation

引言

近年来数值天气预报技术有了飞速发展,数值模式的分辨率也越来越高,其中对流可分辨模式分辨率可达1~4 km,取消积云对流参数化方案,对流过程可以显式表达(Yano et al, 2018),业务单位也越来越多地依赖对流可分辨数值模式来对局地高影响天气进行预报。集合预报技术(Epstein, 1969; Leith, 1974)作为一种数值天气预报中的概率预报手段,也逐步从全球大尺度天气预报拓展到有限区域以及对流可分辨尺度数值天气预报当中(陈静等, 2005)。对于暴雨、强对流等局地强天气现象,其发生发展的动力和热力机制较为复杂,导致它们具有很强的预报不确定性,而对流尺度集合预报技术为解决此类强天气的概率预报问题提供了一个有效途径。

在集合预报研究中,如何获得合理的初值扰动是一个研究难点。集合预报初值扰动方法自全球集合预报开始已发展得较为成熟,如增长模繁殖法(BGM)(Toth and Kalney, 1993; 1997)、奇异向量法(SVs)(Molteni et al, 1996)以及集合变换卡尔曼滤波(ensemble transform Kalman filter, ETKF)(Wang and Bishop, 2003; Bowler et al, 2008)方法等,此类方法也沿用到了有限区域集合预报中(Stensrud and Fritsch, 1994; Stensrud et al, 1999; Du et al, 2003; Walser et al, 2006; Bishop et al, 2009; Bojarova et al, 2011; 张涵斌等, 2014),在初始时刻即可为区域集合预报产生足够的中尺度扰动信息;另外一些有限区域集合预报初值扰动采用大尺度集合直接动力降尺度(Marsigli et al, 2005; Frogner et al, 2006;

Bowler et al, 2008; 张涵斌等, 2017),也能为区域集合产生一定的效果。此外,为解决有限区域集合预报中的多尺度不确定性问题,有学者开始尝试尺度混合初值扰动方法的研究,即将全球集合预报动力降尺度初值扰动和区域版本的BGM、ETKF等方法相结合,来为有限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(Caron, 2013; Wang et al, 2014; Zhang et al, 2015; Keresturi et al, 2019)。

对流尺度集合预报是目前集合预报研究的热点和难点,其模式分辨率可达到1~4 km,关闭积云对流参数化方案,国内外关于对流尺度集合预报技术的发展尚处于相对初步的阶段(Johnson and Wang, 2016; Raynaud and Bouttier, 2016),如何为对流尺度集合预报产生有效的初值扰动,是一个值得继续深入研究的科学问题,与中尺度区域集合预报采用的方法类似,对于对流尺度区域集合预报而言,目前国际上较为流行的方法有动力降尺度,如德国气象局2.8 km分辨率的对流尺度集合预报系统COSMO-DE-EPS(Kühnlein et al, 2014),初值扰动来自四个业务全球模式动力降尺度生成,并做了中心化处理;英国气象局发展了2.2 km分辨率的集合预报系统MOGREPS-UK,初值、侧边界扰动均来自全球集合预报系统MOGREPS-G的动力降尺度扰动场,其中初值扰动做了中心化处理(Hagelin et al, 2017);法国气象局的对流尺度集合预报系统AROME-EPS在2016年业务运行,系统水平分辨率为2.5 km,初值扰动来自短期集合预报系统PEARP的动力降尺度场(Nuissier et al, 2016)。动力降尺度方法较为简便易行,且能够产生较好的效果,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。

有学者也将中尺度区域集合预报中的初值扰动方法沿用到了对流尺度区域集合预报中,如沿用区域 BGM 方法(高峰等,2010;马申佳等,2018)、区域 ETKF 方法(庄潇然等,2016)以及混合扰动方法(庄潇然等,2017)等为对流尺度集合预报产生初值,也均取得了一定的效果。但是鉴于对流可分辨模式主要瞄准短预报时效(1~3 d)、局地天气的发生发展,因此观测资料的同化必不可少。集合资料同化(ensemble data assimilation, EDA)将资料同化与观测扰动相结合,是一种有效的初值扰动方法,目前在 ECMWF 全球集合预报系统中得到了应用(Buizza et al, 2005),而目前国内将 EDA 引入对流尺度集合预报系统中还未见报道。

目前华北区域中心业务运行确定性快速循环同化系统,为华北地区强对流天气的预报提供有效的业务支撑,但目前对华北地区强对流天气的发生发展不确定性的研究还较为有限,华北地区强对流天气概率预报的研究基础还较为匮乏,针对华北地区暴雨等强对流天气开展强对流集合预报研究势在必行。本文利用华北地区丰富的实时观测资料,探索华北对流尺度集合预报的 EDA 初值扰动方法。本研究不仅对华北对流尺度集合预报的发展具有重要意义,也可对强对流天气可预报性研究和业务对流尺度集合预报提供新方法新思路,具有较好的应用前景。

1 资料与方法

1.1 华北对流尺度区域集合预报系统

北京城市气象研究院 2018 年发展的对流尺度区域集合预报系统属于华北“睿图”模式体系的一个组成部分,该系统采用 WRF 模式(Weather Research Forecasting Model) V4.1.2 版,模式区域设置为水平分辨率 3 km,模拟区域范围为 35.5°~46.3°N、105.2°~122.4°E(图 1),共 550×424 个格点,覆盖华北大部分区域,垂直层次为 51 层模式面,模式层顶为 50 hPa。该系统包括 1 个控制预报和 20 个扰动成员预报,共 21 个集合成员,系统每天从 00 UTC 和 12 UTC 起报两次,预报时效为 24 h,预报输出间隔为 6 h。所有成员物理过程参数化方案设置与业务确定性预报 3 km 区域相一致,即

Thompson 微物理方案、Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 边界层方案及 RRTMG 长短波辐射方案,关闭了积云对流参数化方案。

1.2 集合资料同化初值扰动构建方案

传统的动力降尺度方法,将全球集合预报直接通过区域模式进行初始化来得到区域集合的初值场,并进行模式积分,此过程并未有资料同化过程,少了区域模式分析场的参与,因此传统的动力降尺度方法虽然简便,但具有一定局限性,首先是初值扰动尺度较大,与区域模式分辨率不匹配,其次是缺少观测信息,初值不够准确。

目前欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报系统采用奇异向量与集合资料同化 EDA 相结合产生初值扰动,EDA 方法通过对所有成员进行资料同化形成多组分析初值,从而改善所有成员的初值质量。本文构建的集合资料同化方法,首先将 NCEP 全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System, GEFS)资料初值场进行动力降尺度,获得区域模式降尺度的初值场,并基于 WRF 三维变分模块(WRF data assimilation, WRFDA),与多组观测进行资料同化,获得分析初值。目前华北业务数值预报系统中同化的观测包括常规地面站和探空、飞机报、地基 GPS 以及京津冀 6 部雷达径向风速度和反射率因子资料,考虑到非常规资料的影响较为复杂,本文中 EDA 的观测资料主要为华北地区常规地面站和探空观测。图 2 给出了对流尺度集合预报系统框架:GEFS 成员 1 动力降尺度得到 WRF 的背景场,利用 WRFDA 同化观测成员 1,得到模式的分析场成员 1,进行预报,以此类推,得到 21 个集合预报。

EDA 方法中的变分同化采用传统的三维变分(3D-Var)。在 3D-Var 框架中,为了获得最优分析场 $\mathbf{x}_a$,引入目标函数 J 来描述向量 $\mathbf{x}$ 与背景场 $\mathbf{x}_b$ 以及观测 $\mathbf{y}$ 的距离,即目标函数可表示为:

$$J(\mathbf{x}) = J_b(\mathbf{x}) + J_o(\mathbf{x}) \quad (1)$$

对于基于 3D-Var 的一组集合预报的资料同化,为获得每个成员的分析场,第 i 个集合成员(包括控制预报 ctl)的目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}_i) &= J_b(\mathbf{x}_i) + J_o(\mathbf{x}_i) \\ &= 1/2(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{b_i})^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{b_i}) + \\ &\quad 1/2(\mathbf{y}_i - \mathbf{H}\mathbf{x}_i)^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}_i - \mathbf{H}\mathbf{x}_i) \\ &\quad (i = \text{ctl}, 1, 2, \dots, 20) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵, $\mathbf{H}$ 为线性观测算子。本文中背景误差协方差矩阵的估计采用 NMC 方法获得,变分同化的控制变量为流函数、势函数、不平衡温度、假相对湿度以及不平衡表面气压。

EDA 流程中,不同成员的同化的观测是基于常规观测资料进行扰动形成的多组观测。观测扰动构造过程如下:

第一步,获取 WRFDA 中的三维变分常规资料观测文件中的观测变量的值以及观测误差信息,其中观测变量包含气压、风速、风向、温度以及相对湿度;观测误差信息来自 WRFDA 中自带的观测误差

统计量,这也是目前华北业务确定性数值预报系统中采用的观测误差。

第二步,利用随机数发生器生成 20 个正态分布的随机数 $R_k (k=1,2,\dots,20)$,数值范围在 $-2\sim 2$ 。

第三步,原有的观测文件中包含多个变量在不同高度以及地面的观测,包括相对湿度、风向、气压湿度、风速,构成了所有观测样本,针对每一个观测样本,用对应的观测误差 ϵ 乘以 20 个随机数 $R_k (k=1,2,\dots,20)$ 得到 20 个扰动,如对于 500 hPa 温度 T ,其观测误差为 $\epsilon=1.0$ K,如果随机生成的第一个随机数值为 $R_1=-1.2$,则第一个观测扰动值为 $R_k \times \epsilon = -1.2$ K。

第四步,原观测值 O_{at} 加上 20 组观测扰动值可获得 20 组新的观测,即扰动观测 O_k :

$$O_k = O_{at} + R_k \times \epsilon \quad k = 1, 2, \dots, 20 \quad (3)$$

20 组经过扰动的观测与原观测共同构成 21 组观测文件,且扰动后的多组观测是相对独立的,用于每个集合成员的资料同化。

图 3 是 2018 年 7 月 15 日 00 UTC 时次探空观测扰动的绝对值 $|R_k \times \epsilon|$ 以及观测误差 ϵ 的分布,对于探空资料来说,在整层大气中,无论是风速、温度还是气压,观测扰动值基本上分布在探空观测误差附近,如对于风速(图 3a),250 hPa 左右的观测误差为 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而观测扰动绝对值则在 $2.2\sim 4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内分布;对于地面站观测来说情况也类似,地面温度的观测误差为 1.1 K,而地面站点的观测扰动绝对值在 $0.7\sim 1.4$ K 分布(图略)。

观测扰动 $R_k \times \epsilon$ 是否正态分布也在一定程度上反映了观测扰动的质量。通过计算一段时间内(2018 年 7 月 1—15 日)不同量级的扰动样本占总样本比率可获得观测扰动的概率密度分布,图 4 给出了探空观测的 850 hPa 温度(T_{850})、500 hPa 纬向风速(U_{850})扰动概率密度分布,由图 4a 可以看出, T_{850} 的观测扰动主要分布在 $-2\sim 2$ K 附近,这主要是由于 T_{850} 观测误差统计为 $\epsilon T_{850} = 1$ K,而随机数 R 值在 $-2\sim 2$ 。此外可以看出观测扰动的概率密度分布与标准正态分布(均值为 0,标准差为 0.5)较接近,即扰动值越大的样本占比越小,而超过 $-2\sim 2$ K 区间的扰动样本占比较小,几乎为 0;对于 U_{850} 观测扰动(图 4b)结果也类似,表明构建的观测扰动基本合理。

至此 21 组扰动观测数据已构建完成,包括原有的观测数据(用于控制预报同化),以及 20 组扰动观

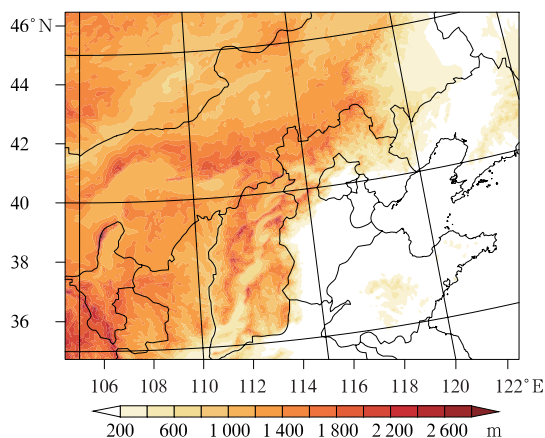


图 1 华北对流尺度集合预报系统
区域范围设置及地形高度

Fig. 1 Simulation area of Convection Permitting
Ensemble Prediction System of North China
with terrain height shown as shaded

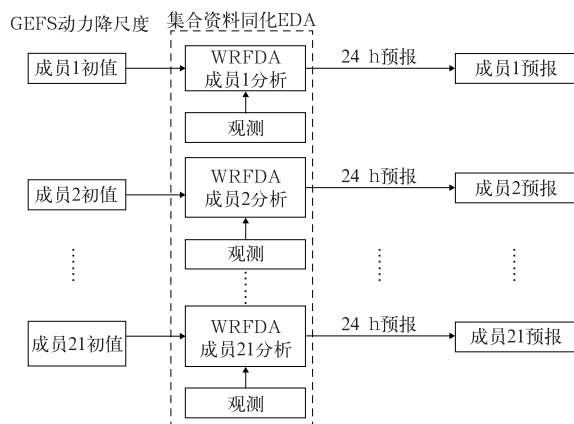


图 2 对流尺度区域集合预报系统框架

Fig. 2 Framework of Convection Permitting Ensemble
Prediction System of North China based on EDA

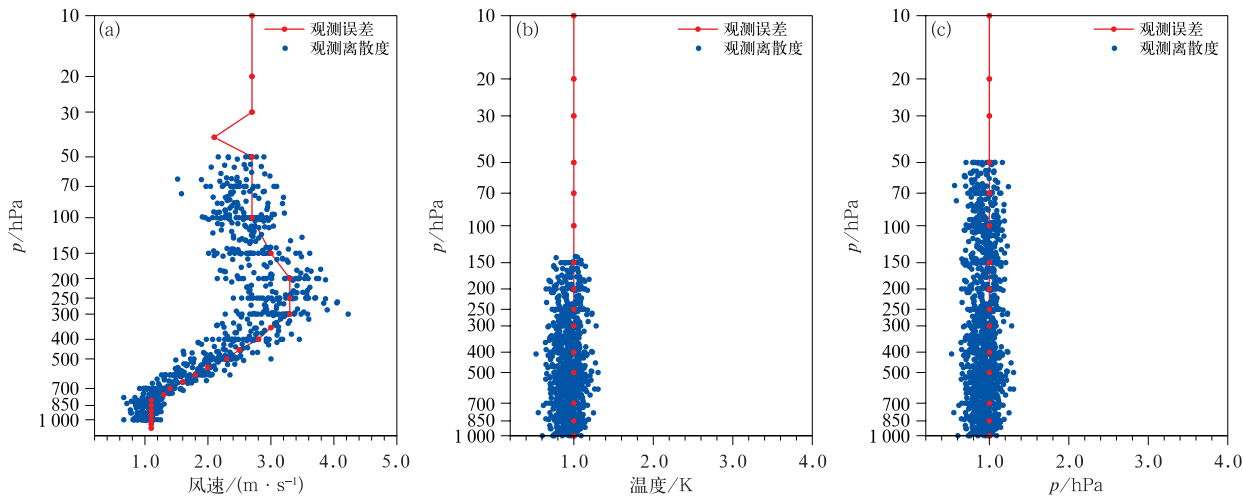


图 3 探空观测扰动分布:(a)风速,(b)温度,(c)气压
Fig. 3 Distribution of sound observation perturbation
(a) wind speed, (b) temperature, (c) pressure

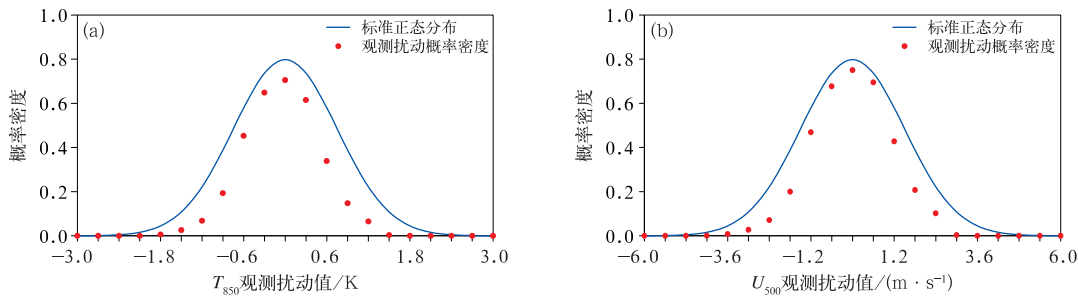


图 4 不同观测资料的观测扰动概率密度分布
(a)850 hPa 温度(T_{850}), (b)500 hPa 纬向风速(U_{500})
Fig. 4 Distribution of probability density function of observation perturbation
(a) temperature at 850 hPa (T_{850}), (b) zonal wind at 500 hPa (U_{500})

测数据(用于扰动成员同化)。

1.3 EDA 初值扰动方案试验设计

为了验证集合资料同化方法在对流尺度集合预报系统中的作用,本文基于 EDA 初值扰动方法开展了对流尺度集合预报试验,并与动力降尺度初值扰动方法进行对比。系统模式分辨率及范围设置均与 1.1 节中介绍的一致。

设计了三种试验方案:方案一基于 GEFS 多成员预报场的动力降尺度构建初值扰动并作为参照试验,称为 DOWN 方案;方案二为采用 GEFS 多成员动力降尺度初值与单一未扰动观测进行集合资料同化的方案,称为 EDA-NOPO 方案;方案三为 GEFS 多成员动力降尺度初值与扰动观测进行集合资料同

化的方案,称为 EDA-PO 方案。从方案二与方案一的对比可以看出资料同化的作用,而方案三与方案二的对比可以看出观测扰动的作用。三组试验设置见表 1,试验时段选取 2018 年 7 月 11 日至 8 月 11 日,连续一个月。其中 2018 年 7 月 16 日在北京城区发生了对流强降水过程,作为批量试验中的重点分析个例。

表 1 三组集合预报试验设置

Table 1 Configuration of three sets of ensemble tests	
试验名称	初值扰动方法
DOWN	GEFS 全球集合预报分析场动力降尺度
EDA-NOPO	不同成员采用相同的观测进行 EDA 构建区域集合分析场
EDA-PO	不同成员采用扰动观测进行 EDA 构建区域集合分析场

1.4 试验数据

本文构建的对流尺度集合预报背景场和侧边界条件来自 GEFS 全球集合分析场和预报场,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,该资料每天 00 UTC、12 UTC 获取 2 次,预报间隔为 6 h。本文中高空和地面要素检验采用全国探空和地面观测站资料,这两种资料在整点时刻(00 UTC 和 12 UTC)站点较密,其中探空站在华北范围内有 24 个,地面观测站在华北范围内有 420 个,可较好地用于检验,而 06 UTC 和 18 UTC 时刻的探空和地面测站数量较少,因此仅采用整点观测进行检验,即检验间隔为 12 h;降水检验采用全国基本降水观测站(约 2507 个),包括逐 3 h 和逐 6 h 累计降水。所有针对站点的检验均通过双线性插值方法将模式格点预报插值到观测站点上进行。

2 试验结果分析

2.1 扰动特征分析

本节具体分析 EDA 的引入会对集合初值场产生怎样的效果。图 5 给出了三种方案 500 hPa U 分量风的集合初值场离散度分布以及 500 hPa 观测站

点分布,从 DOWN 方案可以看出其离散度较大,尤其是内蒙古东部和宁夏地区,全场离散度可达 $1.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;对于 EDA-NOPO 方案,各成员同化相同观测之后,初值离散度相对于 DOWN 方案呈现出显著减小特征,如内蒙古西部以及宁夏等地区,与该地区观测位置对应较好,全场整体的离散度为 $0.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;而 EDA-PO 方案同化了扰动观测之后,虽然在内蒙古西部以及宁夏等地区离散度有所减小,但是某些位置有所增加,如大连东部地区、河北南部、山西和山东南部观测密集区域,体现了观测扰动的作用,使得 EDA-PO 方案全场离散度达到了 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,虽然不及 DOWN 方案,但是显著优于 EDA-NOPO 方案。以上结果说明资料同化减小了背景场的不确定性,而观测扰动有效地表达了观测的不确定性。

为进一步研究 EDA 方法对初值扰动的影响,本节对三种方案扰动增长特征进行分析。对于一个 $M_i \times M_j$ 的二维格点场引入平均绝对扰动:

$$P = \frac{1}{M_i \times M_j} \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |IC_k^{ij} + IC_{al}^{ij}| \right) \quad (4)$$

式中: IC_k^{ij} 为第 k 个成员在格点 (i, j) 的初值, IC_{al}^{ij} 为对应得控制预报的初值, N 为扰动的集合成员数

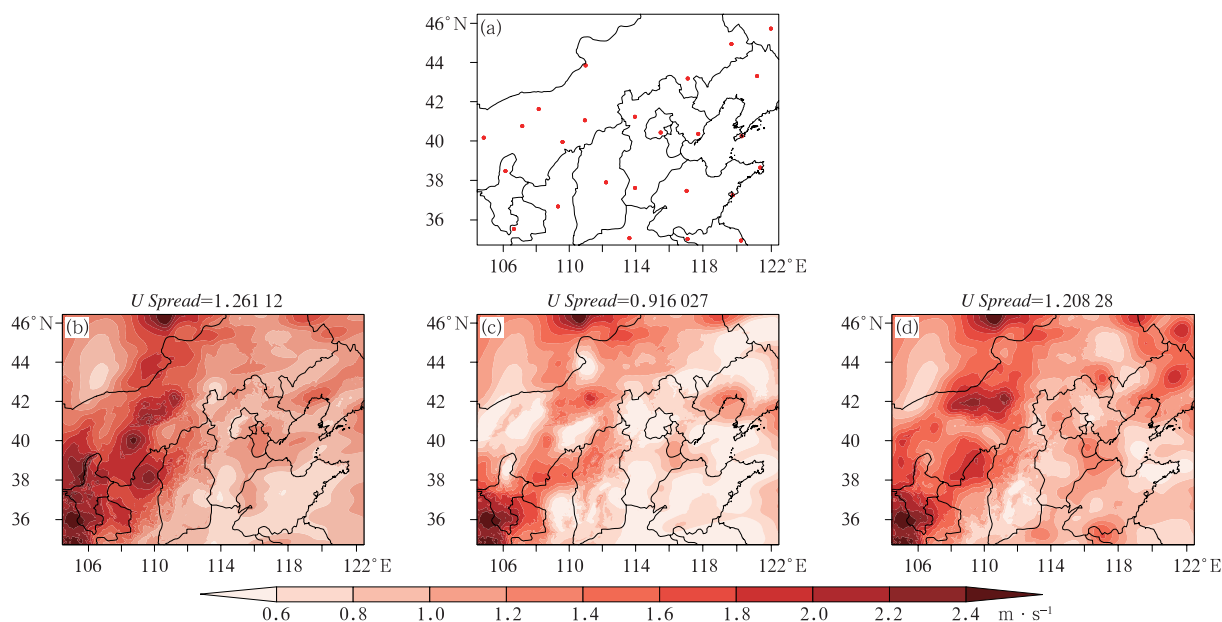


图5 2018年7月15日12 UTC 500 hPa的(a)观测资料分布和(b)DOWN,(c)EDA-NOPO,(d)EDA-PO方案 U 分量风的集合初值场离散度分布

Fig. 5 (a) Distribution of sounding observation at 500 hPa pressure level, (b, c, d) spread distributions of zonal wind components at 500 hPa of (b) DOWN scheme, (c) EDA-NOPO scheme and (d) EDA-PO scheme at 12 UTC 15 July 2018

(本研究中为 20 个)。

从逐 6 h 的平均绝对扰动演变特征(图 6)来看,在初始时刻 DOWN 方案具有很大的扰动幅度,且扰动增长较为明显,12 h 扰动最大值可达 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;EDA-NOPO 方案因为引入了观测资料同化,使得扰动能量在各个层次相对于 DOWN 方案有所减小,12 h 扰动最大值也未超过 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;而 EDA-PO 方案由于进行了观测扰动,初值扰动幅度相对于 EDA-NOPO 方案有显著提高,在随后时刻虽然其扰动有所增长速率较快,12 h 预报时效扰动最大值可达 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,与 DOWN 方案相当。从 24 h 预报时效来看,DOWN 和 EDA-PO 的扰动最大值均可达 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 EDA-NOPO 仅达到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明同化单一观测会对集合扰动显著削弱,而同化扰动观测会最大限度上保持扰动的振幅。

2.2 集合预报检验结果

对批量试验时段内的结果进行评分统计,进一步定量分析 EDA 方法的预报效果。由于 EDA-NOPO 方案离散度较低,且不作为主要分析对象,这里分析的 EDA 方案特指 EDA-PO 方案。采用的集合预报检验方法为集合平均的均方根误差(RMSE)、集合离散度以及连续等级概率评分(CRPS)。批量试验检验主要包括等压面要素、地面要素以及降水三个部分。

RMSE 和集合离散度(Spread)是集合预报最常用的检验方法。本文首先对低空和近地面温度、纬向风风场进行检验。图 7 给出了试验时段内统计的

850 hPa 温度和纬向风(T_{850} , U_{850})、2 m 温度($T_{2 \text{ m}}$)以及 10 m 纬向风($U_{10 \text{ m}}$)的检验结果。从图 7 可知 EDA 方案的 RMSE 在 0~24 h 时效内均小于 DOWN 方案,尤其是短预报时效最为明显,如 12 h 预报时效,EDA 集合的 RMSE 为 1.3 K,而 DOWN 集合的 RMSE 为 1.55 K,说明 EDA 方法有效地降低了集合预报短预报时效的误差;从集合离散度来看,DOWN 方案的离散度在短时效内略优于 EDA 方案,如 DOWN 方案 T_{850} 的 12 h 集合离散度为 0.61 K,而 EDA 方案的 12 h 集合离散度为 0.52 K,对于其他层次和要素的检验结果也较为类似,这里不再赘述。以上结果说明 EDA 方法可以有效提高集合预报的准确性,减小预报误差,离散度会略有降低,与图 5 中得出的结论类似,但是整体集合预报的可靠性会有所提高。

CRPS 评分(Hersbach, 2000)是能够有效衡量集合预报中多种事件预报准确性的综合指标,是对集合预报质量的整体评价,评分越小表示集合预报质量越好。从 CRPS 评分来看(图 8),不管是等压面要素还是近地面要素,EDA 方案的 CRPS 值均小于 DOWN 方案,说明 EDA 方案能够显著提高对流尺度集合预报的准确性。

2.3 降水预报检验结果

为了检验 EDA 初值扰动方法的预报效果,研究了试验时段内一次典型的强降水个例。图 9a 给出了观测的 2018 年 7 月 15 日 18 UTC 至 16 日 00 UTC 的 6 h 累计降水。可以看出该个例在华北地区表现

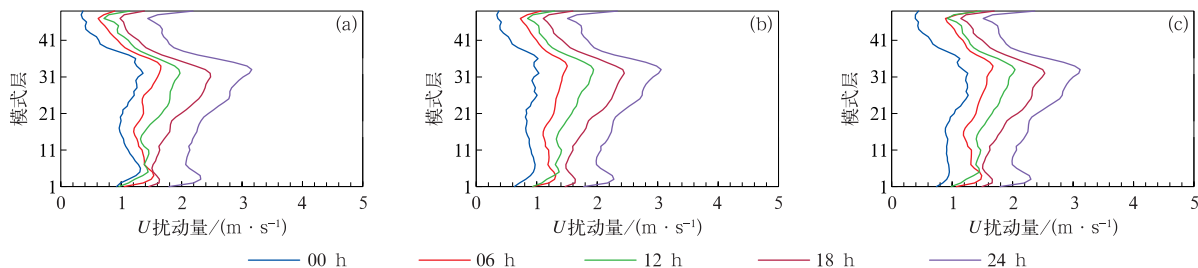


图 6 (a)DOWN 方案, (b)EDA-NOPO 方案, (c)EDA-PO 方案

所有成员 U 扰动绝对值平均的垂直分布
(不同线型表示不同预报时效)

Fig. 6 Vertical distribution of mean absolute perturbation of zonal wind of (a) DOWN scheme, (b) EDA-NOPO scheme and (c) EDA-PO scheme
(Different lines denote different forecast lead times)

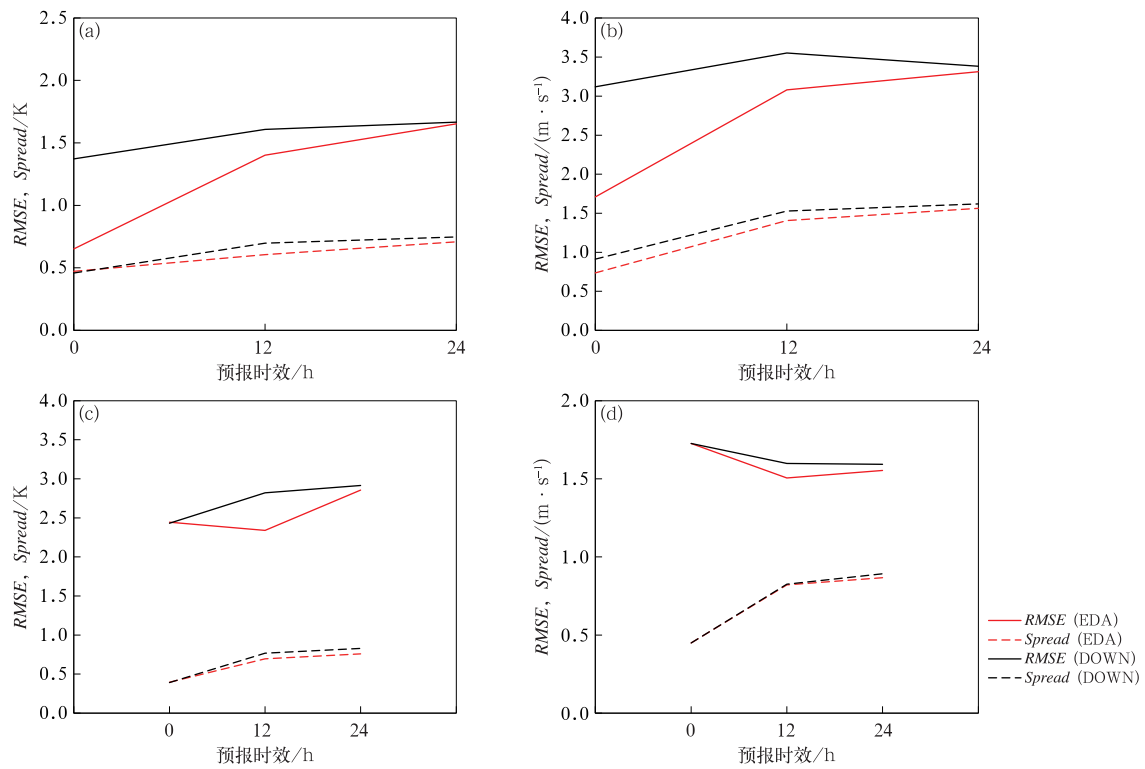


图7 集合平均均方根误差(RMSE)与离散度(Spread)随时间演变特征

(a) T_{850} , (b) U_{850} , (c) T_{2m} , (d) U_{10m}

Fig. 7 Evolution characteristics of RMSE and Spread with forecast lead time

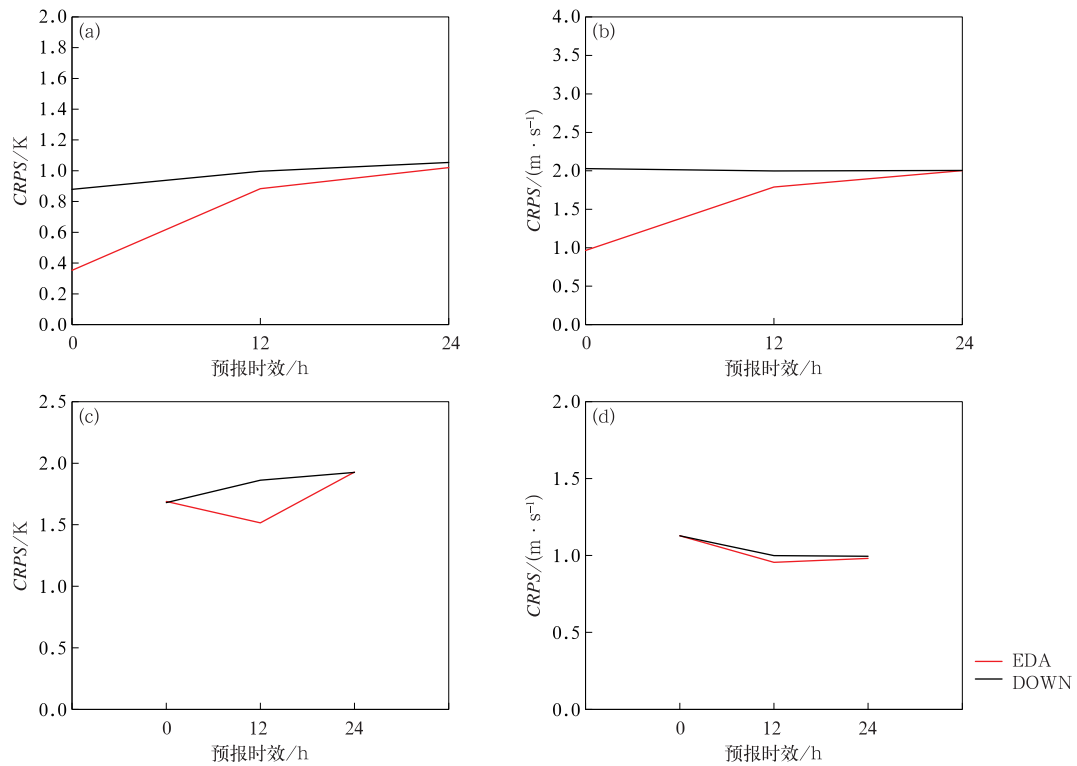
(a) T_{850} , (b) U_{850} , (c) T_{2m} , (d) U_{10m} 

图8 同图7,但为CRPS评分

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for CRPS

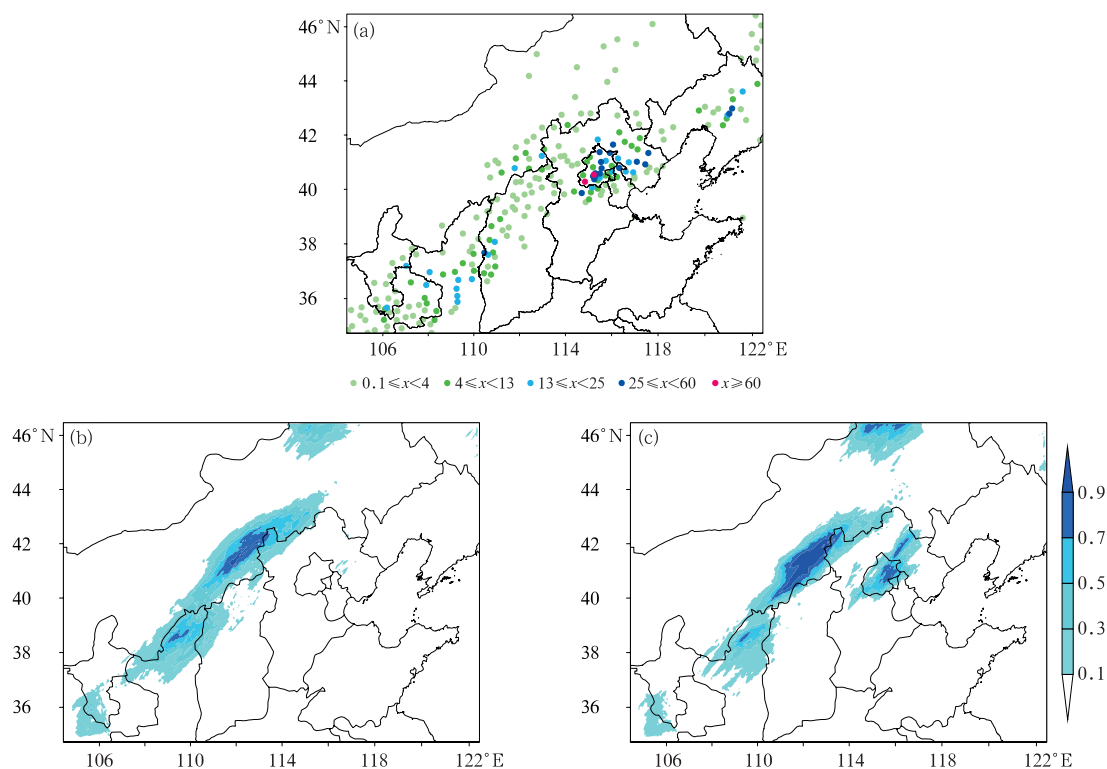


图 9 2018 年 7 月 15 日 18 UTC 至 16 日 00 UTC 的(a)6 h 累计降水观测(单位:mm)及
(b,c)>4 mm 量级概率预报

(a)观测,(b)DOWN 方案,(c)EDA 方案

Fig. 9 (a) The 6 h accumulated precipitation (unit: mm) and (b, c) probability forecasts for > 4 mm precipitation from 18 UTC 15 to 00 UTC 16 July 2018

(a) observation, (b) DOWN scheme, (c) EDA scheme

为明显的东北—西南向雨带分布,尤其是在北京地区具有明显的大值区,某些站点的 6 h 累计降水可达 60 mm 以上。图 9b,9c 给出了 DOWN 和 EDA 两种集合方法从 2018 年 7 月 15 日 12 UTC 起报、对该降水个例时段 6 h 累计降水大于 4 mm 量级概率预报。DOWN 集合(图 9b)由于没有资料同化,对实况的位置和范围均存在较明显的漏报;对于 EDA 集合(图 9c),大概率区域较好地给出了实况观测的强降水中心位置,北京地区大于 4 mm 降水概率局地可达 70% 以上,有效地改善了 DOWN 集合的漏报现象。此外两种方案对河北、山西、内蒙古交界区域均表现出了较大的降水概率,相对于实况均略偏北,其中业务确定性模式强降水也在该地区存在一定的偏北(图略),主要由于 WRF 模式对本次系统性降水过程的环流形势预报略有偏差,尤其是西南气流位置偏北所致,这里不再做深入分析。

为了探索对流尺度集合预报对局地降水的量级

以及时段的识别能力,研究了 2018 年 7 月 15—16 日降水过程中北京地区逐 3 h 累计降水变化。图 10 给出了 2018 年 7 月 15 日 15 UTC 至 16 日 12 UTC 的北京区域内平均的逐 3 h 观测降水量及成员预报降水量。图中的观测降水量演变可以看出该降水过程在北京地区具有明显的强降水时段,一个是 15 日 21 UTC 左右,一个是 16 日 12 UTC 左右,这两个时段北京地区平均 3 h 累计降水可达 8 mm 以上。从集合成员预报可以看出,DOWN 集合各成员预报不够发散,且对这两个时段的降水变化描述不够准确,9 h 预报显著低估了实况降水,18 h 预报又明显高估了实况;EDA 成员来看,首先各个成员预报较为发散,9 h 预报有若干成员非常接近实况量级,对于 18~24 h 第二次强降水时段,各个成员预报相对于 DOWN 集合要更加接近。

我们采用 ROC 面积 (AROC) 和 Brier 评分 (BS) 来评估两种集合扰动方案在试验时段内对所

有降水个例预报的统计检验结果,其中 AROC 代表了某一量级降水命中率和假警报率之间的关系,AROC 越大说明概率预报的命中率越高;BS 评分衡量了预报概率和事件发生频率之间的距离,值越

小说明概率预报表现越好。图 11 给出了 2018 年 7 月 11 日至 8 月 11 日这连续一个月所有降水个例统计计算的 0.1~13 mm 三个降水量级的逐 6 h 降水 AROC 和 BS 评分演变。可以看出,不管是小雨、

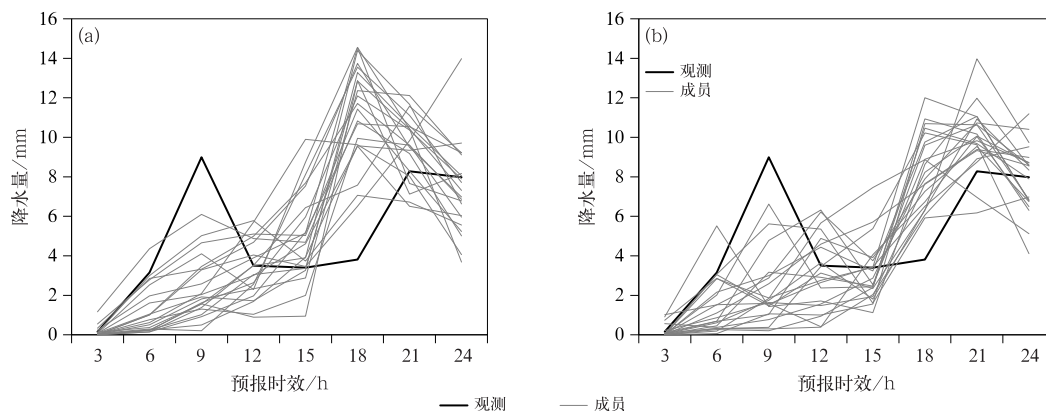


图 10 2018 年 7 月 15 日 15 UTC 至 16 日 12 UTC 的北京区域内平均的
逐 3 h 观测降水量及成员预报降水量
(a)DOWN 方案,(b)EDA 方案

Fig. 10 Observation and ensemble members forecasts of 3 h accumulated precipitation
from 15 UTC 15 to 12 UTC 16 July 2018
(a) DOWN scheme, (b) EDA scheme

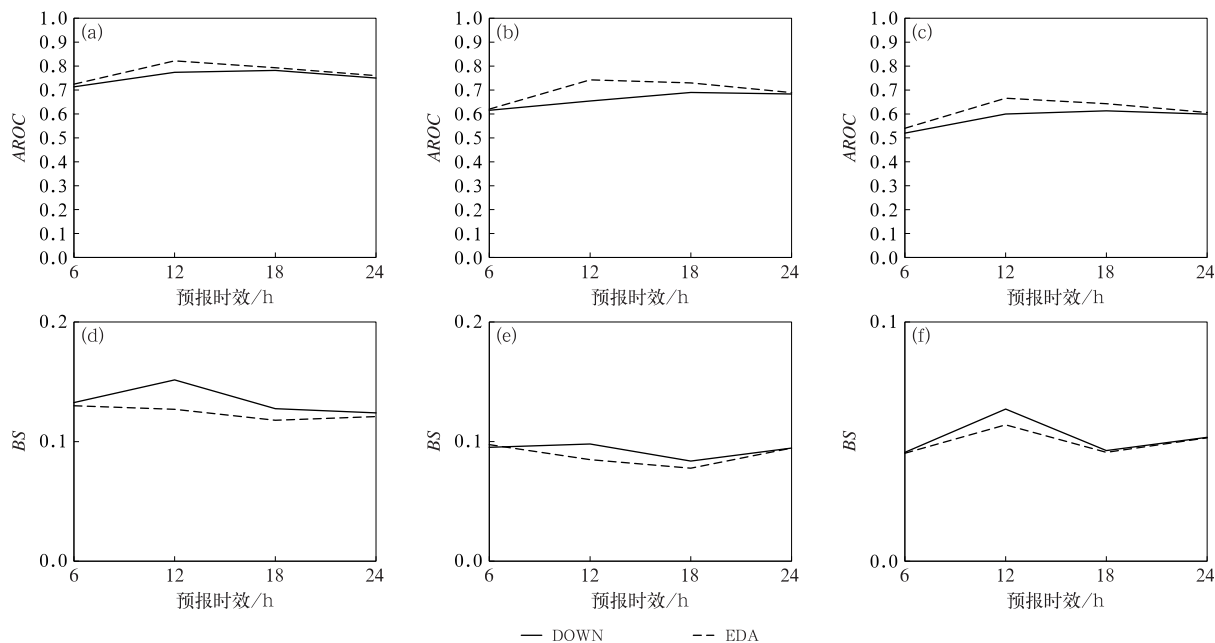


图 11 DOWN 方案和 EDA 方案 2018 年 7 月 11 日至 8 月 11 日连续一个月
逐 6 h 降水(a,b,c)AROC 和(d,e,f)BS 评分演变
(a,d)>0.1 mm,(b,e)>4 mm,(c,f)>13 mm

Fig. 11 Time evolution of 6 h precipitation scores of (a, b, c) AROC and
(d, e, f) BS for DOWN and EDA schemes from 11 July to 11 August 2018
(a, d) > 0.1 mm, (b, e) > 4 mm, (c, f) > 13 mm

中雨还是大雨,EDA 集合的 AROC 评分均优于 DOWN 集合,尤其是 12~18 h 预报时效的优势更加明显,24 h 预报时效两种集合的 AROC 表现趋于一致;BS 评分情况也类似,EDA 集合方案在所有量级均显示出相对于 DOWN 集合的优势,其中 12~18 h 预报时效的改进最为明显,说明 EDA 方法能够显著改善 DOWN 的降水预报效果。

3 结论与讨论

本文基于华北对流尺度集合预报系统探索了集合资料同化 EDA 的构建方法,该方法利用多成员变分同化,将全球集合动力降尺度初值场与观测扰动相结合,为对流尺度集合预报获得更优的初值扰动场。设计了三组对比试验,即动力降尺度初值扰动,多成员同化单一观测的 EDA,以及多成员同化不同观测的 EDA。从扰动特征、概率预报检验以及降水预报检验等方面进行了综合评估。得出以下结论:

(1)设计了针对华北对流尺度集合预报的 EDA 初值扰动方案,该方案以 GEFS 全球集合分析场作为背景场,集合成员分别同化常规观测资料构建对流尺度集合预报的 EDA 初值场。对观测资料设计了随机扰动方案,观测扰动幅度能够与观测误差相一致,且呈现正态分布特征。

(2)EDA 方法会改变初值场中要素分布特征,进而改变初始离散度分布,使得初始扰动可以有效减少初值场中背景场的不确定性,同时体现观测的不确定性。相对而言,观测扰动会最大程度上保持充分的初始离散度且扰动具有较好的增长能力,而不对观测进行扰动则会限制初始集合离散度以及其增长效果。

(3)集合预报检验结果表明相对于动力降尺度,EDA 初值扰动方法可以大幅减少短预报时效的预报误差,离散度略有减少;对于对流尺度集合预报的概率技巧评分具有较明显提升。

(4)降水试验结果表明 EDA 集合能够显著改善动力降尺度集合对强降水的漏报现象,对于局地降水的量级和时段具有更准确的预报能力;试验时段内的统计降水评分结果也表明不管是小雨、中雨还是大雨量级,EDA 方案均能够比动力降尺度获得更好的概率预报评分效果。

以上结论表明 EDA 初值扰动方法在华北对流

尺度集合预报中是行之有效的,该方法充分利用华北地区丰富的观测资料,可获得能够反映真实分析场中背景场和实际观测不确定性,而且扰动振幅更合理的初值扰动场,因此具有较好的实际应用价值。本文开展试验基于常规观测资料进行集合资料同化,考虑到业务应用需要与雷达资料同化相结合,未来需要进一步开展试验。

参考文献

- 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 J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble meso-scale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 717-726 (in Chinese).
- 高峰,闵锦忠,孔凡铀,2010.基于增长模繁殖法的风暴尺度集合预报试验[J].高原气象,29(2):429-436. Gao F, Min J Z, Kong F Y, 2010. Experiment of the storm-scale ensemble forecast based on breeding of growing mode[J]. Plateau Meteor, 29(2): 429-436 (in Chinese).
- 马申佳,陈超辉,何宏让,等,2018.基于 BGM 的对流尺度集合预报试验及其检验[J].高原气象,37(2):495-504. Ma S J, Chen C H, He H R, et al, 2018. Experiment and verification of the convective-scale ensemble forecast based on BGM[J]. Plateau Meteor, 37(2): 495-504 (in Chinese).
- 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 H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2014. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 40(9): 1076-1087 (in Chinese).
- 张涵斌,李玉焕,范水勇,等,2017.基于动力降尺度的区域集合预报初值扰动构建方法研究[J].气象,43(12):1461-1472. Zhang H B, Li Y H, Fan S Y, et al, 2017. Study on initial perturbation construction method for regional ensemble forecast based on dynamical downscaling[J]. Meteor Mon, 43(12): 1461-1472 (in Chinese).
- 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 X R, Min J Z, Cai Y C, et al, 2016. Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary condition[J]. Acta Meteor Sin, 74(2): 244-258 (in Chinese).
- 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 X R, Min J Z, Wang S Z, et al, 2017. A blending method for storm-scale ensemble forecast and its application to Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 41(1): 30-42 (in Chinese).
- Bishop C H, Holt T R, Nachamkin J, et al, 2009. Regional ensemble forecasts using the ensemble transform technique[J]. Mon Wea Rev, 137(1): 288-298.

- Bojarova J, Gustafsson N, Johansson Å, et al, 2011. The ETKF rescaling scheme in HIRLAM[J]. *Tellus*, 63A: 385-401.
- 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.
- Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al, 2005. A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems [J]. *Mon Wea Rev*, 133(5): 1076-1097.
- 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.
- 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[M]//Côté J. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation (WGNE)*: 5, 09-5, 10.
- Epstein 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]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132(621): 2785-2808.
- Hagelin S, Son J, Swinbank R, et al, 2017. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(708): 2846-2861.
- Hersbach H, 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems[J]. *Wea Forecasting*, 15(5): 559-570.
- Johnson A, Wang X G, 2016. A study of multiscale initial condition perturbation methods for convection-permitting ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 144(7): 2579-2604.
- Keresturi E, Wang Y, Meier F, et al, 2019. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(720): 993-1012.
- Kühnlein C, Keil C, Craig G C, et al, 2014. The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(682): 1552-1562.
- Leith C E, 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecast[J]. *Mon Wea Rev*, 102(6): 409-418.
- Marsigli C, Boccanera F, Montani A, et al, 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification[J]. *Nonlinear Process Geophys*, 12(4): 527-536.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al, 1996. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation[J]. *Quart J Roy Meteor*, 122(529): 73-119.
- Nuissier O, Marsigli C, Vincendon B, et al, 2016. Evaluation of two convection-permitting ensemble systems in the HyMeX Special Observation Period (SOP1) framework[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(S1): 404-418.
- Raynaud L, Bouttier F, 2016. Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(695): 854-866.
- Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al, 1999. Using ensembles for short-range forecasting[J]. *Mon Wea Rev*, 127(4): 433-446.
- 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]. *Mon Wea Rev*, 122(9): 2068-2083.
- 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]. *Mon Wea Rev*, 134(10): 2877-2887.
- Wang X G, 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 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.
- Yano J I, Ziemiański M Z, Cullen M, et al, 2018. Scientific challenges of convective-scale numerical weather prediction[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(4): 699-710.
- 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.

(本文责编:俞卫平)