

计燕霞,孙鑫,张涵斌,等.2024.内蒙古对流尺度集合预报初始扰动构造的模拟试验研究[J].暴雨灾害,43(2),195–203. JI Yanxia, SUN Xin, ZHANG Hanbin, et al. 2024. Study on the simulation experiment about initial condition perturbation construction for convection-allowing ensemble prediction system in Inner Mongolia [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(2):195–203 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–065

内蒙古对流尺度集合预报初始扰动构造的模拟试验研究

计燕霞¹,孙鑫¹,张涵斌²,赵斐¹

(1. 内蒙古自治区气象台,呼和浩特 010051;2. 北京城市气象研究院,北京 100089)

摘要:对流尺度集合预报(Convection-allowing Ensemble Prediction, CAEP)是提高强对流天气预报能力的重要手段,构造合理的初始扰动是CAEP的关键问题。本文开展基于观测扰动初值法(Perturbed-observation, PO)的CAEP在内蒙古地区的试验,并以动力降尺度(Downscaling, DOWN)方法作为对比,分析PO方法在内蒙古地区CAEP的预报效果,以为内蒙古地区CAEP的构建提供技术参考。结果表明:(1) PO方法构造的初始扰动能引入内蒙古地区观测资料从而减少背景场的不确定性,且扰动具有充分的增长能力。(2) 与DOWN方法相比,PO方法可以显著减少CAEP的短时预报误差,高空和地面要素的RMSE分别减小4%~43%和3%~9%,集合离散度略有减少。高空要素的CRPS评分最大可减少约53%,地面要素的CRPS评分平均减少6%,整体提高了对流尺度集合预报质量。(3) PO方法能够提高短时降水的预报能力,0.1 mm、4 mm和13 mm 3个量级的TS评分分别提升了0.015、0.003和0.001 5。且降水个例表明,PO方法对降水的落区和量级预报更准确。

关键词:对流尺度集合预报;观测扰动;初值扰动;内蒙古

中图分类号:P456.7

文献标志码:A

DOI: 10.12406/byzh.2023–065

Study on the simulation experiment about initial condition perturbation construction for convection-allowing ensemble prediction system in Inner Mongolia

Ji Yanxia¹, Sun Xin¹, Zhang Hanbin², Zhao Fei¹

(1. Inner Mongolia Meteorological Observatory, Huhhot 010051; 2. Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

Abstract: Convection-allowing ensemble prediction (CAEP) is an important approach to improve the capability of strong convective weather prediction, and how to construct reasonable initial disturbance is one of the key issues of CAEP. In this paper, the experiments of the perturbed-observation (PO) method in the CAEP system in the Inner Mongolia region were carried out and evaluated by comparing them with the downscaling (DOWN) method. The performance of the PO method in the CAEP system was then analyzed, which will provide a technical reference for the construction of the CAEP system in Inner Mongolia. The results are as follows. (1) The initial perturbation constructed by the PO method can effectively include the observations in the Inner Mongolia region, which can reduce the uncertainty of the background field and the perturbation has sufficient growth capacity. (2) Compared with the DOWN method, the PO method can significantly reduce the short-term forecast error of CAEP. The root mean square error (RMSE) of upper-level elements is reduced by 4%~43%, and the RMSE of ground surface elements is reduced by 3%~9%, suggesting a slightly decreased ensemble spread. The continuous ranked probability score (CRPS) of upper-level elements can be reduced by up to 53% and the CRPS of ground surface elements is reduced by an average of 6%, which generally indicates an improvement in the quality of convective scale ensemble forecasts. (3) The PO method can also improve the capability of short-term precipitation forecasts. The TS score for precipitation levels of 0.1 mm, 4 mm, and 13 mm increased by 0.015, 0.003, and 0.0015, respectively. Furthermore, the case study shows that the PO method is more accurate in predicting the precipitation areas and intensity levels.

Key words: convection-allowing ensemble prediction; perturbed-observation; initial condition perturbation; Inner Mongolia

收稿日期: 2023-04-05;定稿日期:2023-09-05

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42030604);内蒙古自治区自然科学技术重点研发和成果转化项目(2022YFSH0009);内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0047)

第一作者: 计燕霞,主要从事数值天气预报研究。E-mail: jiyanyanxiao@163.com

通信作者: 孙鑫,主要从事数值天气预报和应用研究。E-mail: 641680001@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

引言

受全球变暖影响,强对流天气频频发生,其具有局地性强、突发性强、破坏力大的特点,常造成严重的气象灾害,严重影响人民的生产生活,因此提高强对流天气预报的准确性是天气预报业务急需解决的重要问题。单一的对流尺度模式由于模式非线性相互作用可能会导致模式预报的不确定性(王璐和沈学顺,2019),同时受模式系统本身的误差及初始场误差的不确定性影响从而对强对流天气的可预报性有限。为了解决上述问题,Kong等(2006)提出了对流尺度集合预报(Convection-allowing Ensemble Prediction, CAEP)的思路。CAEP模式分辨率通常小于4 km,可以不考虑积云对流参数化方案,能够提供强降水、大风等强天气概率预报信息,在天气预报业务中的应用越来越广泛。例如,深圳市气象局的CAEP系统对台风降水预报整体优于控制预报,集合平均和概率匹配平均预报误差比控制预报减少18.8%,对华南前汛期降水总体上集合概率匹配平均降水预报ETS (Equitable Threat Score)评分高于单个模式结果(谢坤等,2016;江崑等,2019;王德立等,2020),重庆市气象局自2017年7月起构建了CAEP系统并实现业务运行,为地面气象要素的预报提供更多参考且降水和气温的集合平均均优于控制预报(陈良吕等,2017,2023;胡婧婷等,2022),北京城市气象研究院2018年发展的华北CAEP系统也在初始扰动技术方面开展了一系列工作(张涵斌等,2022),为华北地区提供了强天气概率预报。

如何构造合理的初始扰动是CAEP的重要问题之一(Johnson and Wang, 2014)。动力降尺度(Downscaling, DOWN)方法是通过全球或区域集合预报降尺度产生CAEP集合初值的一种初始扰动构造方法,是目前国际上天气中心CAEP系统使用的主流方法(Kühnlein et al., 2014; Nuissier et al., 2016; Hagelin et al., 2017)。国内关于动力降尺度方法也开展了一些研究,研究表明该方法能获得较大的集合离散度(SPREAD)且集合预报质量较好(李俊等, 2020; 马亚楠, 2022; 朱科锋等, 2022),但在初始时刻无法准确描述大气中的中小尺度结构和对流尺度特征(Wang et al., 2011; Kühnlein et al., 2014),有时对一些极端天气可预报性较低(朱科锋等, 2022)。增长模繁育法(马申佳等, 2018; 李湘, 2020; 李坤等, 2021)和集合转换卡尔曼滤波法(Ma et al., 2009; 蔡瑾婕, 2018)产生的对流集合初值包含丰富的中小尺度信息,但存在离散度偏小的问题。为了能进一步提高SPREAD且解决侧边界扰动不匹配问题,有学者开展了混合尺度初始扰动方法(庄潇然等, 2017; 马旭林等, 2018),但

以上方法构建的对流集合初始扰动都没有引入观测资料。而加拿大气象局的全球集合预报系统采用的基于最优插值法的扰动观测法(Perturbed-observation, PO)是通过资料同化将观测资料和其不确定性引入初始场的一种初值扰动方法(Houtekamer et al., 1996; Buizza et al., 2005)。欧洲中期天气预报中心的全球集合预报系统采用的集合资料同化方法(Ensemble Data Assimilation, EDA)是基于四维变分同化将观测资料和其不确定性引入初值扰动的一种方法(Buizza et al., 2008)。而CAEP的主要目的是关注短时强对流天气的发生概率和强度(王璐和沈学顺, 2019),因此引入观测信息对提高对流集合预报质量很有必要。国内张涵斌等(2022)在2022年首次开展了EDA初值扰动方法在CAEP中的研究工作,结果表明EDA初值扰动方法能够提高华北地区强降水的预报能力,对强降水的量级和落区预报更为准确,相对特征作用曲线下面积评分(AROC)最高可达0.65。

内蒙古自治区气象台的睿图数值预报系统自2016年业务化运行,为内蒙古地区提供精细化数值预报产品,但在实际业务中还缺乏对短时、局地强对流天气概率预报产品的支撑。为了能进一步满足内蒙古地区强对流天气的预报需求,本文初步瞄准呼和浩特、鄂尔多斯、包头市等强对流天气高发区(黄晓璐等, 2017),以动力降尺度方法作为对比,在内蒙古地区开展基于观测扰动初值法的CAEP试验,选择2020年7月3—12日开展批量试验,重点分析7月11—12日受高空槽东移和低层暖湿气流输送的共同影响下发生在内蒙古中部的暴雨过程,分析CAEP在该地区的预报效果,以期为该地区CAEP的构建提供参考。

1 试验方案设计与暴雨个例

1.1 模式及试验方法设计

1.1.1 资料说明

本文使用的资料包括:(1) 2020年7月2—11日每日00:00和12:00(世界时,下同)起报的美国国家环境预报中心的全球集合预报(Global Ensemble Forecast System, GEFS)的逐6 h预报场,用于驱动CAEP系统。(2) 2020年7月3—12日中国国家信息中心经过质控,参与集合预报检验的地面观测资料(包含282个国家气象观测站和24个其它气象观测站),包括温度、风场、逐6 h降水量资料和探空观测(11个站)。(3) 2020年7月11日06:00内蒙古乌兰察布C波段多普勒天气雷达逐6 min体扫资料,采用VCP21体扫模式,用于分析中小尺度对流系统的演变。(4) 模式同化的观测资料为2020年7月2—11日每日00:00和12:00模式范

围内的地面气象观测站(244个)、探空观测(10个)的常规观测资料。

1.1.2 模式设置

CAEP系统采用WRF模式V3.8版,水平分辨率为3 km,模拟区域范围为103.5°—116.49°E, 35.72°—45.14°N(见图1),覆盖呼和浩特市、包头市等地区,共342×345个格点,垂直方向共50层,共21个集合成员,暂不进行模式扰动。

1.1.3 初始扰动构造方法

本文采用张涵斌等人(2022)使用的初值扰动构造方法,如图2,将GEFS前21个集合成员的12 h的预报场分别动力降尺度,作为CAEP模式21个成员的背景场,然后利用三维变分同化方法分别同化21组观测资料,得到CAEP的初始场,其中观测资料为覆盖模式范围的地面站、探空常规观测资料。先基于实际观测,对观测中的温度、相对湿度、气压、风向进行随机扰动得到20个扰动观测,与原观测共同构成21个观测成员。每个集合成员分别同化相应的观测成员,形成各

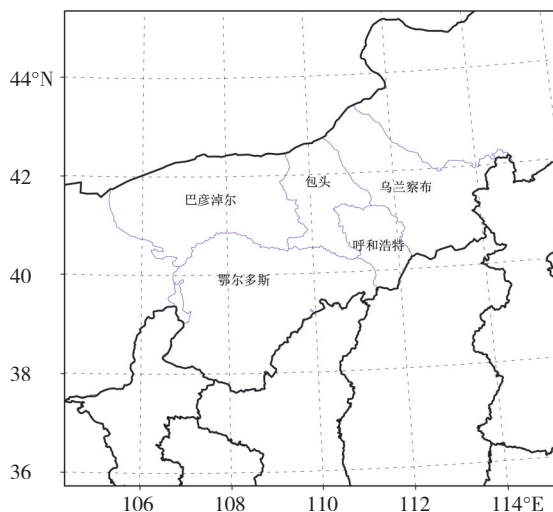


图1 对流尺度集合预报系统模拟区域(紫色线为内蒙古行政市界线,下同)

Fig.1 Simulation area of convection-allowing ensemble prediction system.

The purple lines mark the administrative city boundary of Inner Mongolia, the same hereinafter

集合成员的预报模式初值并制作CAEP。

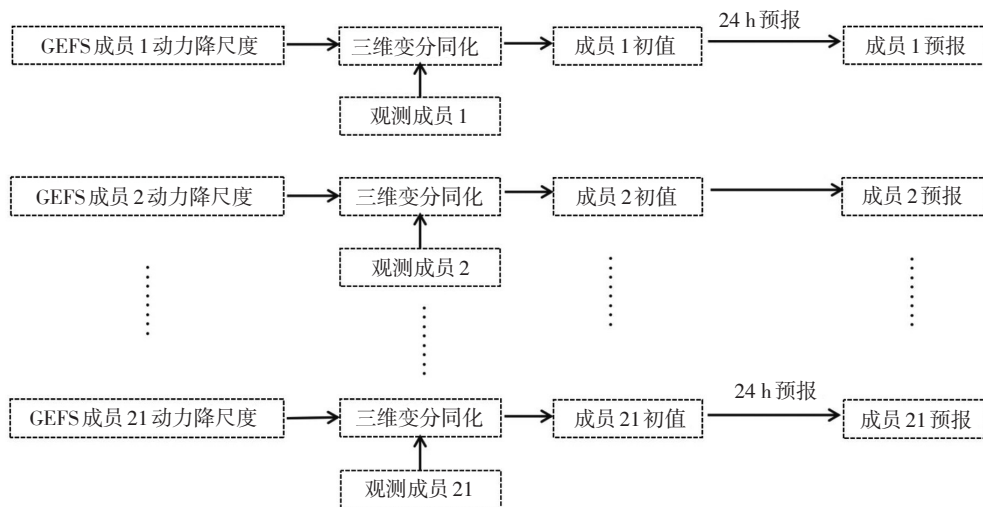


图2 对流尺度区域集合预报系统框架(张涵斌等,2022)

Fig.2 Framework of convection-allowing ensemble prediction system

1.1.4 试验方案

为了评估PO方法在内蒙古CAEP中的预报效果,本文以DOWN方法作为对比,开展两组试验,试验方法设置见表1,两组试验仅初值扰动方法不同,其余设置均相同。考虑到2020年7月3—12日降水日数多且有一次暴雨过程,因此选择这10 d开展批量试验,每日在00:00和12:00起报。

表1 试验设置

Table1 Configuration of tests

试验方法	初值扰动方法设置
DOWN	GEFS 12 h 预报场动力降尺度
PO	GEFS 12 h 预报场动力降尺度+同化扰动观测

1.2 暴雨个例

2020年7月11—12日受500 hPa高空槽东移和低层暖湿气流输送的共同影响(图3a),内蒙古中部发生了一次暴雨过程,其中在11日06:00—12:00多个站点持续出现短时强降水,降水主要发生在呼和浩特市大部、乌兰察布市南部、北部和包头市中部,11日06:00乌兰察布、呼和浩特市有明显的对流性降水,回波强度达55 dBz以上(图3b)。

2 试验结果与分析

2.1 扰动演变特征

为分析引入扰动观测对集合初值场及扰动增长

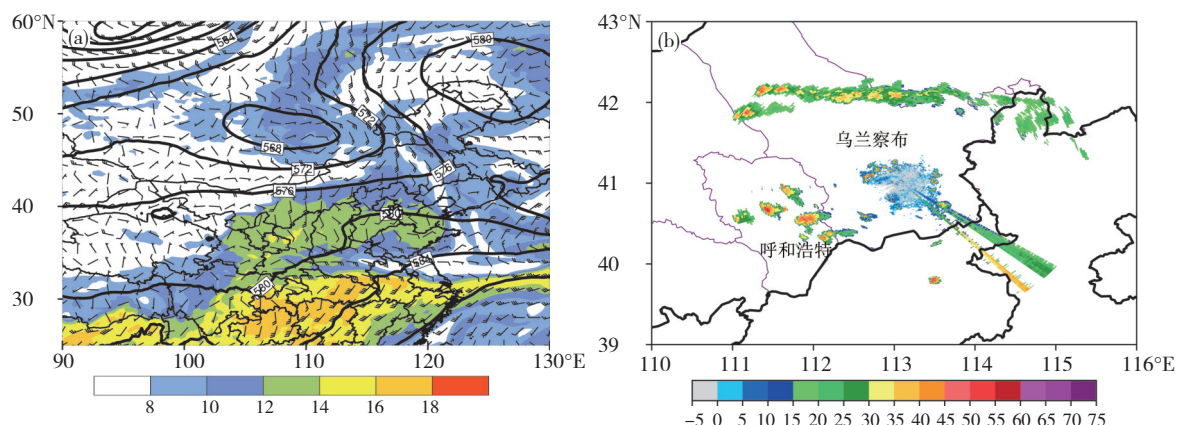


图3 2020年7月11日00:00内蒙古500 hPa高度场(黑色实线,单位: dapgm)、850 hPa风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和比湿(填色,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) (a), 06:00 乌兰察布天气雷达组合反射率因子(b, 单位: dBz)

Fig.3 (a) The 500 hPa geopotential height (black solid line, unit: dapgm), 850 hPa wind (wind barb, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and 850 hPa specific humidity (color-filled, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in Inner Mongolia at 00:00 UTC, (b) composite radar reflectivity from Wulanchabu weather radar (unit: dBz) at 06:00 UTC on 11 July 2020

能力的影响,图4是不同方法下 u 风场离散度的垂直分布随时间的演变特征。可见DOWN方法在0 h扰动振幅较大,低层扰动超过 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着预报时效增加,扰动不断增加,12 h扰动最大值超过 $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

(图4a);PO方法在0 h低层的扰动幅度较DOWN方法偏小,不超过 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在6 h和12 h扰动增长较明显,12 h扰动最大值也达 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,基本与DOWN方法相当(图4b)。

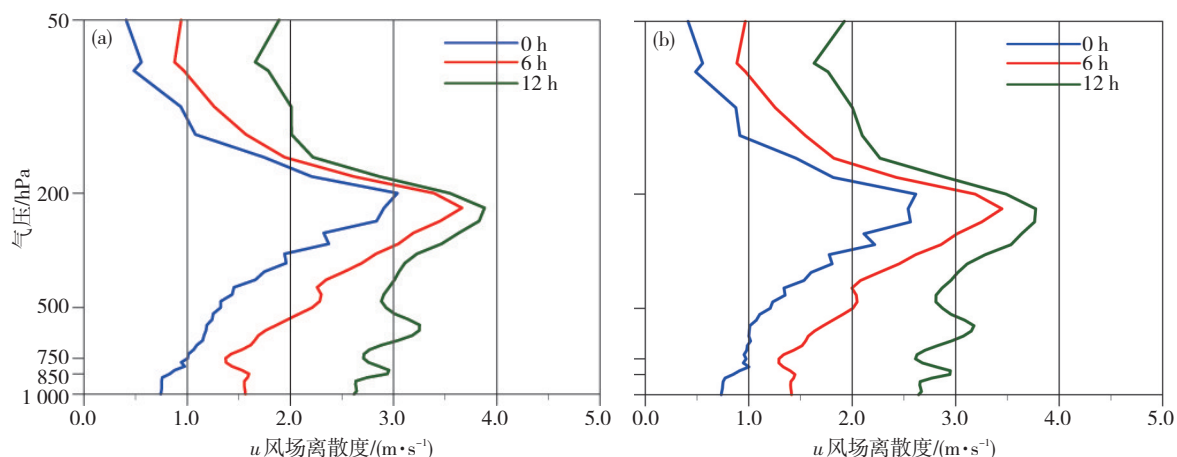


图4 2020年7月11日00:00起报的内蒙古DOWN方法(a)和PO方法(b)0 h、6 h和12 h预报时效 u 风场离散度的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of the spread of u component perturbation of the wind field forecasted by (a) DOWN scheme and (b) PO scheme at 0 h, 6 h, and 12 h on 11 July 2020 in Inner Mongolia

从扰动水平分布的时间演变特征(图5)来看,初始时刻DOWN方法离散度整体较大。在阿拉善盟东部、巴彦淖尔市东部和南部、锡林郭勒盟中部相比于PO方法850 hPa风场离散度都表现为大值区,对比850 hPa同化的观测资料分布(图5中蓝点)来看,PO方法在上述等地离散度变小,说明在初始时刻PO方法通过引入观测数据,从而减小初始场的不确定性。随着预报时效增加,PO方法和DOWN方法离散度逐渐增加,在12 h PO方法的离散度的分布与量级基本与DOWN方法相当,在内蒙古中部表现为大值区,个别地方小于DOWN方法。

综上,PO方法在初始时刻能有效引入观测数据,

减少背景场的不确定性,增加初始场的准确性。且扰动能量具有合理的结构与振幅,具有较好的增长能力。

2.2 集合离散度评估

集合离散度(SPREAD)是反应集合预报描述大气不确定性程度指标,集合平均的均方根误差(RMSE)用来反应集合预报的预报误差,理想的集合预报是在每个集合成员准确度大致相同的情况下,SPREAD与RMSE基本相当(杜钧,2022)。对850 hPa U 风场(U_{850})、850 hPa温度(T_{850})、10 m U 风场(U_{10})和2 m温度(T_2)进行检验,图6为上述四个要素的RMSE与SPREAD随预报时效变化图。可见,PO方法的RMSE在0~24 h整体小于DOWN方法,对于短时效内(0~12 h)的等压面要

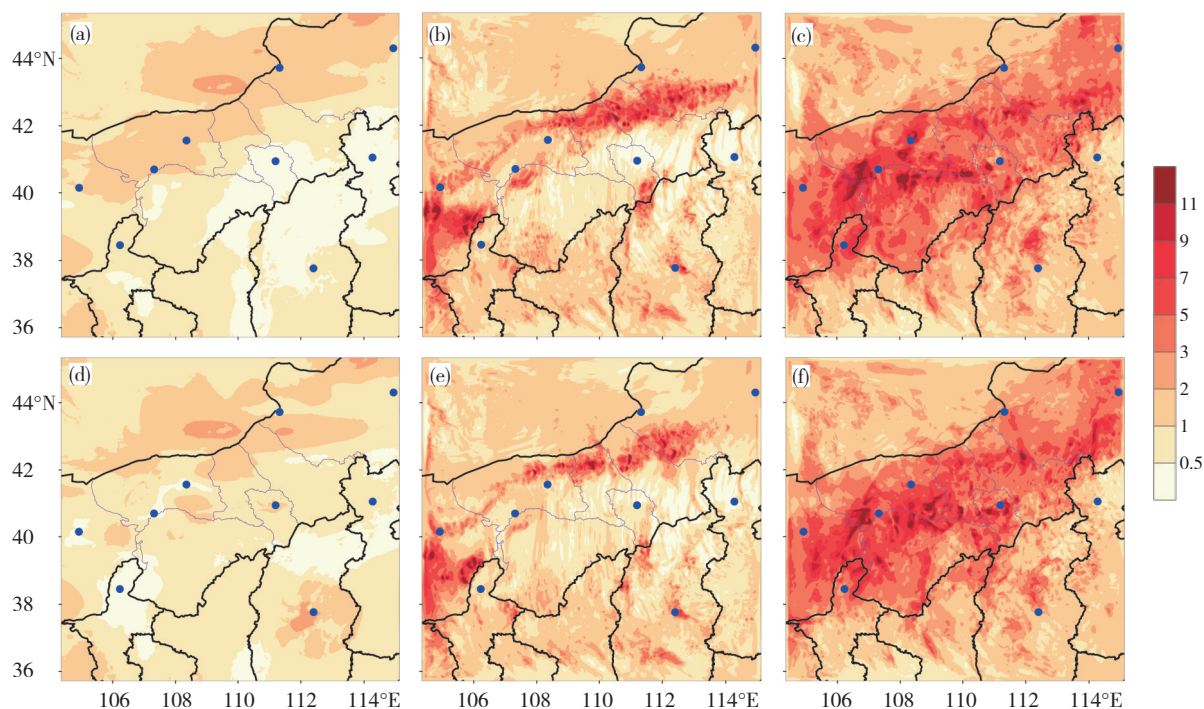


图5 2020年7月11日内蒙古对流集合DOWN方法(a、b、c)、PO方法(d、e、f)模拟的0 h(a、d)、6 h(b、e)、12 h(c、f)时效850 hPa风场离散度(填色,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (蓝点代表同化的850 hPa观测站点)

Fig.5 Spread of 850 hPa wind field at (a, d) 0 h, (b, e) 6 h and (c, f) 12 h simulated by (a, b, c) DOWN scheme and (d, e, f) PO scheme on 11 July 2020 in Inner Mongolia (color-filled, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). (The blue dots mark the 850 hPa observation stations assimilated)

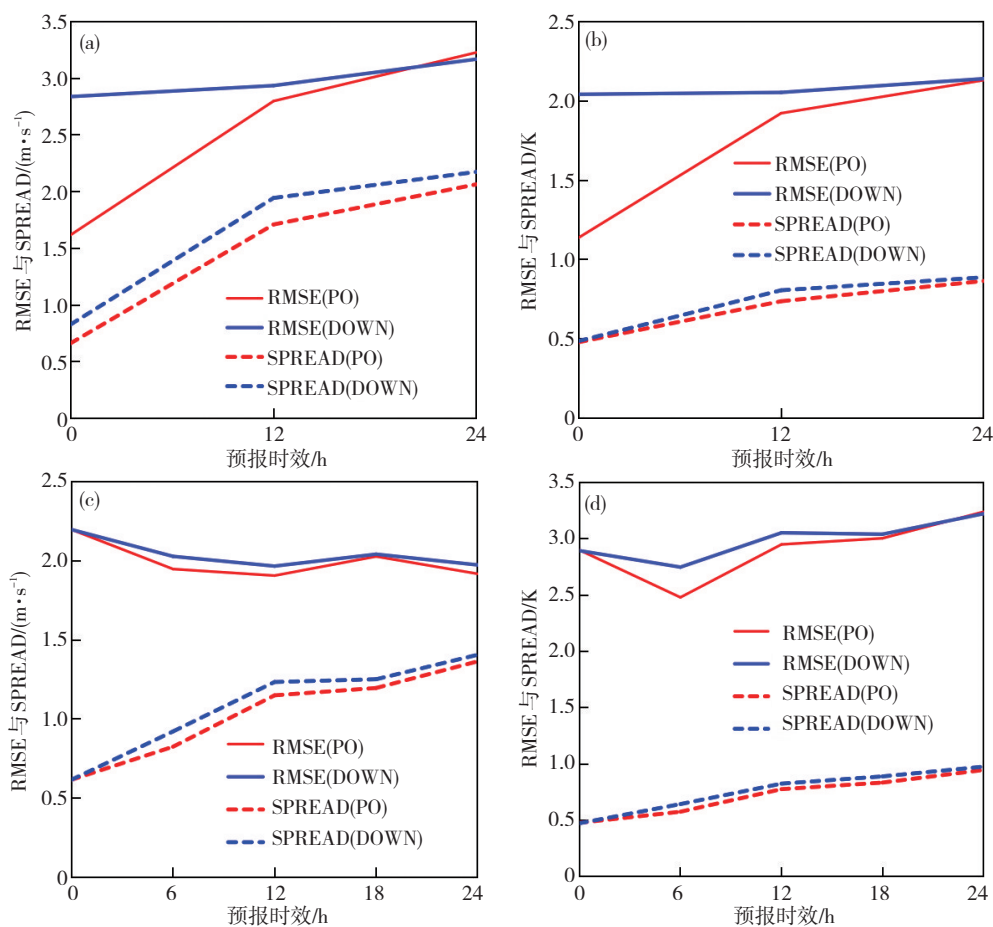


图6 2020年7月3日—12日内蒙古地区PO和DOWN方法的 U_{850} (a)、 T_{850} (b)、 U_{10} (c)和 T_2 (d)的RMSE与SPREAD随预报时效的变化

Fig.6 Evolution of RMSE and SPREAD of (a) U_{850} , (b) T_{850} , (c) U_{10} , (d) T_2 for the PO scheme and DOWN scheme over the forecast period in Inner Mongolia from 3 to 12 July in 2020

素最为明显,说明PO方法通过同化观测资料有效降低了DOWN方法的集合预报误差。而PO方法的SPREAD稍低于DOWN方法。从RMSE和SPREAD关系来看,PO方法的SPREAD和RMSE更接近,因此PO方法有效提高了CAEP质量。

2.3 批量试验检验

连续分解概率预报技巧评分(CRPS)是评价集合预

报整体质量的评分方法,CRPS值越小说明集合预报质量越好。从四个要素的CRPS评分随时间演变特征来看(图7),PO方法四个要素的CRPS评分在0~24 h整体更小,在短时效内(0~12 h)尤其是 T_{850} 和 U_{850} PO方法CRPS评分更小,高空要素的CRPS评分最大可减少53%左右,地面要素的CRPS评分平均减少6%,总体来看PO方法的集合预报质量更好。

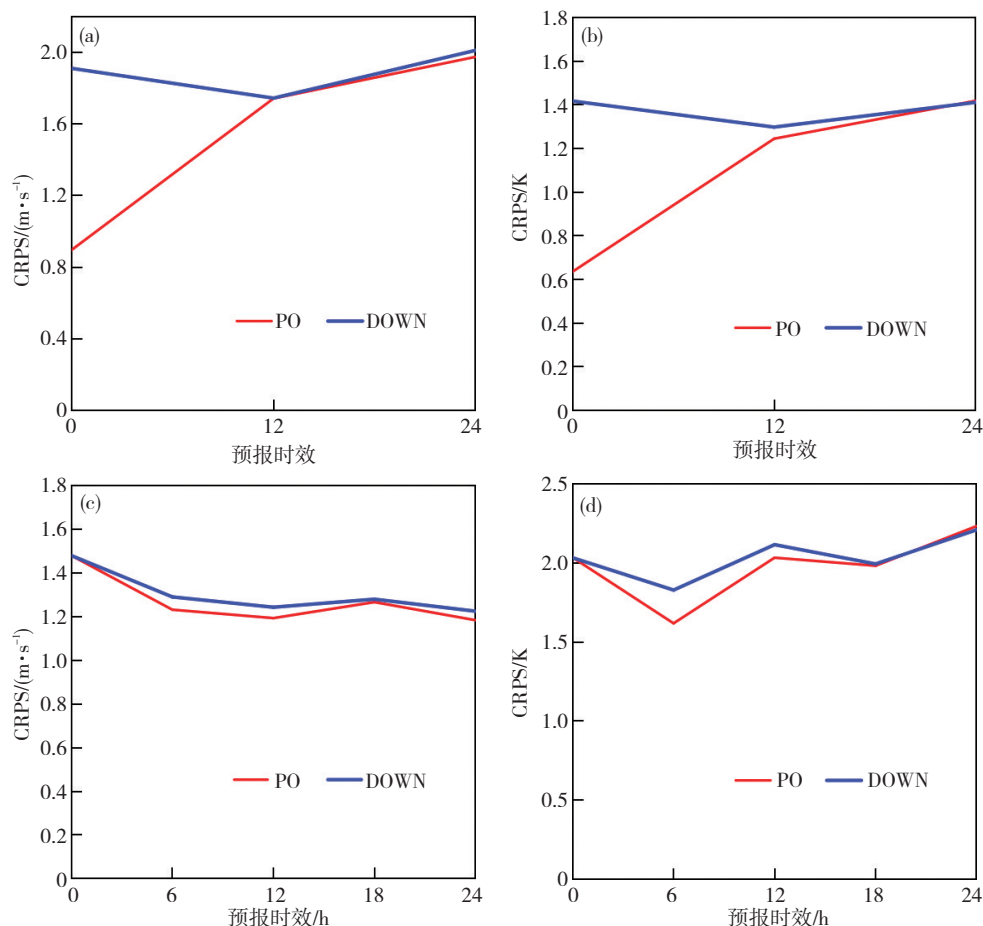


图7 2020年7月3日—12日内蒙古地区PO和DOWN方法的 U_{850} (a)、 T_{850} (b)、 U_{10} (c)、 T_2 (d)的CRPS评分随预报时效演变特征

Fig.7 Evolution of CRPS of (a) U_{850} , (b) T_{850} , (c) U_{10} , (d) T_2 for the PO scheme and DOWN scheme

over the forecast period in Inner Mongolia from 3 to 12 July in 2020

采用集合平均的技巧评分(TS)来定量评估PO和DOWN方法的降水预报效果,TS值越高预报准确率越高。图8为0.1mm、4 mm、13 mm三个降水量级的逐

6 h降水TS评分随时间变化。可见PO方法的TS评分在前12 h均高于DOWN方法,0.1 mm、4 mm、13 mm三个量级的TS评分分别提升0.015、0.003、0.0015,说明

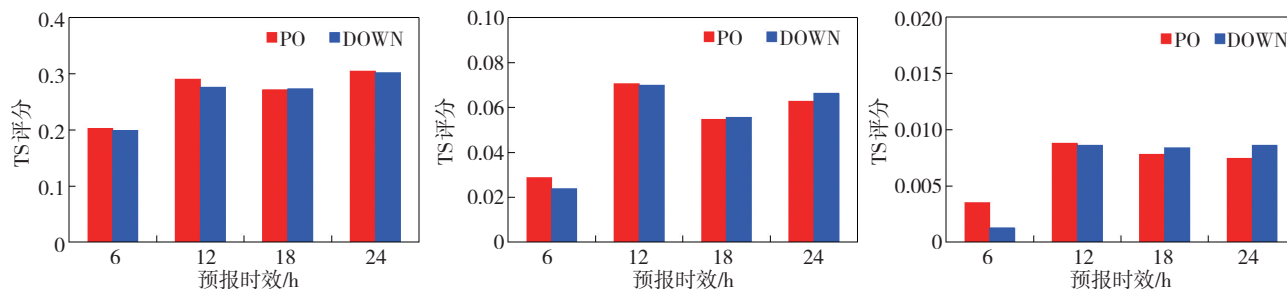


图8 2020年7月3日—12日内蒙古地区PO和DOWN方法的逐6 h降水量大于0.1 mm (a)、4 mm (b)、13 mm (c)的TS评分

Fig.8 Evolution of the TS scores for the PO scheme and DOWN scheme at different precipitation levels of

(a) 0.1 mm, (b) 4 mm, (c) 13 mm in Inner Mongolia from 3 to 12 July in 2020

PO方法在短时效内的降水预报效果更好。

2.4 降水预报个例检验

对2020年7月11日06:00—12:00发生在内蒙古中部的降水进行检验。由图9可见,内蒙古中部多个站点6 h累积降水量局地可达60 mm以上。从DOWN方法和PO方法的集合平均降水量预报(图10)可以看出,DOWN方法对乌兰察布东部降水空报更严重(图10a),PO方法在乌兰察布中部和包头中部的集合平均降水范围更大(图10b),且更接近实况(图9)。从PO方法与DOWN方法集合平均降水量差值表明(图10c),在乌兰察布东部DOWN方法相比实况出现了严重的空报,比PO方法多报10 mm以上。而在乌兰察布中部和包头中部PO方法预报的降水量级要大于DOWN方法,这进一步说明PO方法的CAEP对此次降水预报的更准确。

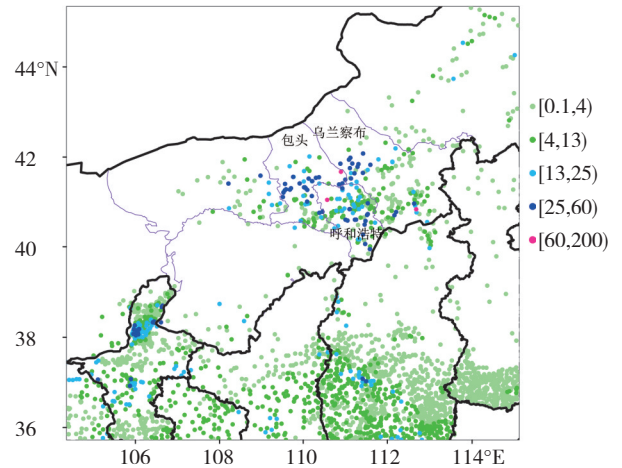


图9 2020年7月11日06:00—12:00的6 h观测

累积降水量(单位: mm)分布

Fig.9 Distribution of 6-h cumulative precipitation (unit: mm) observed from 06:00 to 12:00 UTC on 11 July 2020

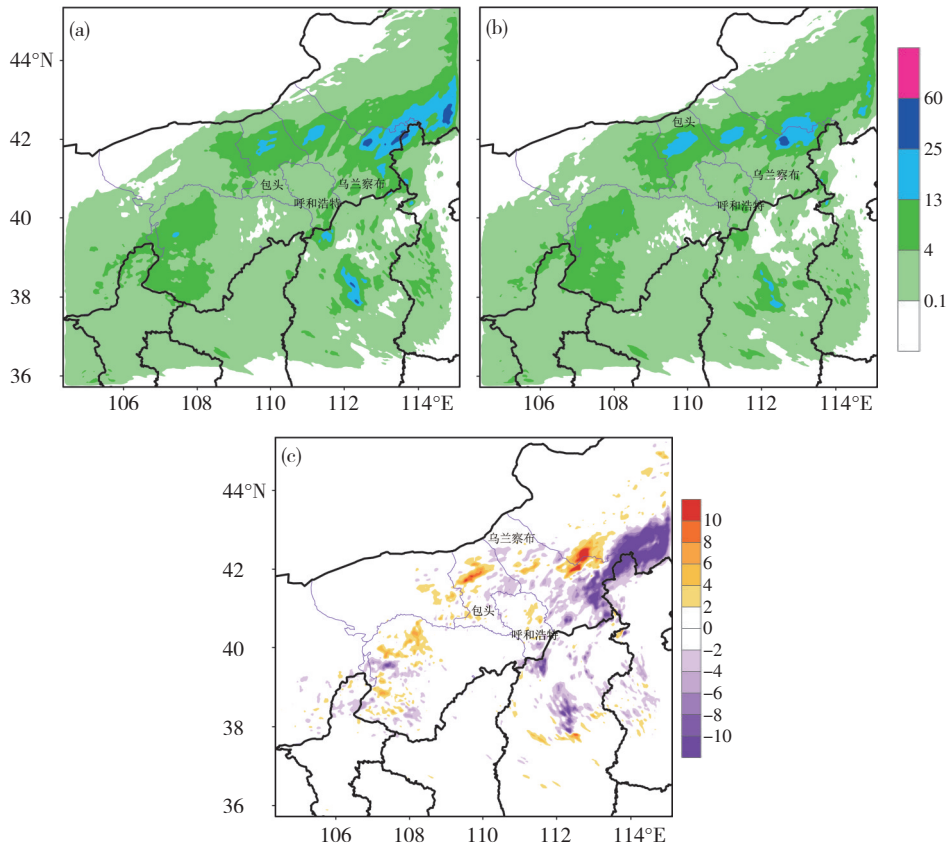


图10 2020年7月11日06:00—12:00 DOWN方法的集合平均降水量(a, 单位: mm)、PO方法集合平均降水量(b, 单位: mm)和6 h PO方法与DOWN方法集合平均降水量差值(单位: mm) (c)

Fig.10 Ensemble mean precipitation (unit: mm) of (a) DOWN scheme, (b) PO scheme, and (c) the difference between ensemble mean of DOWN and PO scheme from 06:00 to 12:00 UTC on 11 July 2020

3 结论与讨论

利用WRF v3.8模式使用动力降尺度方法和观测扰动初值法探究了基于观测扰动初值法的CAEP在内蒙古地区的预报效果,从扰动发展、集合离散度、降水

预报性能等方面做了对比分析,主要得到如下结论:

(1) PO方法构造的初始扰动能够有效引入观测资料信息,提高了集合扰动表征模式初始场不确定性的能力;集合扰动具有更合理的结构与振幅以及合理的增长特点。

(2) PO方法的CAEP具有更高的预报能力。虽然其集合离散度略微减小,但从整体来看,集合离散度与预报误差更加一致,且CRPS评分更优。

(3) PO方法可以提高短时降水预报准确率。从降水个例来看,PO的集合概率预报对乌兰察布北部、包头市中部的降水提供了更高的概率指示,对乌兰察布市东部的降水漏报更小。同样地,PO方法的集合平均对对乌兰察布北部、包头市中部的降水范围更接近实况。

相比于动力降尺度方法,CAEP PO方法的集合预报整体质量更好,降水预报效果更好。但是PO方法对12 h以后降水效果还有待提高,未来还需要通过同化雷达等观测资料和加入模式物理扰动等方法进一步提高其在内蒙古强天气中的应用效果。

参考文献 (References)

- 蔡瑾婕.2018.风暴尺度集合预报中ETKF初始扰动方法研究[D].南京:南京信息工程大学. Cai J J. 2018. Study on ETKF initial condition perturbation in storm-allowing ensemble forecast [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 陈良吕,高松.2023.基于对流尺度集合预报方法对一次暴雨过程预报的分析[J].暴雨灾害,42(2):160–169. Chen L L, Gao S. 2023. Analysis of the forecast performance of a rainstorm process based on a convective scale ensemble prediction system [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(2):160–169 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–05
- 陈良吕,吴钰,高松.2017.重庆中尺度集合预报系统预报性能分析[J].高原山地气象研究,37(4):21–27. Chen L L, Wu Z, Gao S. 2017. Prediction performance analysis of Chongqing mesoscale ensemble prediction system [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 37(4):21–27 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2017.04.004
- 杜钧.2002.集合预报的现状和前景[J].应用气象学报,13(1):16–28. Du J. 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 13(1):16–28 (in Chinese)
- 胡婧婷,陈良吕,夏宇.2022.对流尺度集合预报系统中地面要素释用产品的预报性能分析[J].暴雨灾害,41(2):204–214. Hu J T, Chen L L, Xia Y. 2022. Research on the application of surface elements ensemble forecast products of a convective scale ensemble prediction system [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(2):204–214 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.02.011
- 黄晓璐,荀学义,赵斐.2017.内蒙古强对流天气时空演变特征分析[J].暴雨灾害,36(3):287–291. Huang X L, Xun X Y, Zhao F. 2017. Spatial and temporal distribution characteristics of severe convection weather in Inner Mongolia [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 36(3):287–291 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.03.013
- 江崑,陈训来,朱江山,等.2019.深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨中的应用研究[J].气象科技进展,9(3):124–131. Jiang Y, Chen X L, Zhu J S, et al. 2019. Application of Shenzhen storm-scale ensemble forecast system in heavy rainfall of South China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 9(3):124–131 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2019.03.017
- 李俊,杜钧,许建玉,等.2020.一次特大暴雨过程高分辨率集合预报试验的检验和评估[J].暴雨灾害,39(2):176–184. Li J, Du J, Xu J Y, et al. 2020. The assessment and verification of high-resolution ensemble forecast for a heavy rainstorm [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 39(2):176–184 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.02.008
- 李坤,陈超辉,何宏让,等.2021.新型局地增长模培育法对两次飑线个例的对流尺度集合预报试验[J].大气科学学报,44(4):518–528. Li K, Chen C H, He H R, et al. 2021. Convection-allowing ensemble forecasts of two squall line cases using a novel local breeding growth mode method [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 44(4):518–528 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200420001
- 李湘.2020.增长模培育法在对流尺度集合预报中的初步应用与改进[D].长沙:国防科技大学. Li X. 2020. The initial application and advancement of the breeding growth mode method in the convective-permitting ensemble forecast [D]. Changsha: National University of Defense Technology (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,2018,37(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 Meteorology*, 37(2):495–504 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2017.00073
- 马旭林,计燕霞,周勃阳,等.2018. GRAPES区域集合预报尺度混合初始扰动构造的新方案[J].大气科学学报,41(2):248–257. Ma X L, Ji Y X, Zhou B Y, et al. 2018. A new scheme of blending initial perturbation of the GRAPES regional ensemble prediction system [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 41(2):248–257 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160104001
- 马雅楠.2022.对流尺度集合预报初值误差多尺度演变过程及初值扰动方法研究[D].北京:中国气象科学研究院. Ma Y N. 2022. Research on multiscale evolution characteristics and method of initial perturbation in convection-permitting ensemble prediction [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2202.21242
- 王德立,黄辉军,陈训来,等.2020.深圳对流尺度集合预报系统对台风降水预报的检验评估[J].热带气象学报,36(6):759–771. Wang D L, Huang H J, Chen X L, et al. 2020. Verification and evaluation of typhoon precipitation forecast by Shenzhen storm-scale ensemble forecast system [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 36(6):759–771 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2020.068
- 王璐,沈学顺.2019.对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J].气象,45(8):1158–1168. Wang L, Shen X S. 2019. Review on the representation of model uncertainty in convection-allowing ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly*, 45(8):1158–1168 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.08.012
- 谢坤,王德立,陈训来.2016.雷暴尺度集合预报对华南前汛期暴雨降水预报的检验[C].西安:中国气象学会年会. Xie K, Wang D L, Chen X L. 2016. Verification of heavy rainfall of south China forecast by Shenzhen storm-scale ensemble forecast system [C]. Xian: Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 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]. *Meteorological Monthly*, 48(4):406–417 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–

- 0526.2021.102301
- 朱科锋,张晨悦,薛明,等.2022.对流可分辨尺度集合预报对河南“21.7”极端降水事件可预报性研究[J].中国科学:地球科学,52(10):1905–1928. Zhu K F, Zhang C Y, Xue M, et al. 2022. Predictability and skill of convection-permitting ensemble forecast systems in predicting the record-breaking “21·7” extreme rainfall event in Henan Province, China [J]. Science China Earth Sciences,52(10):1905–1928 (in Chinese). doi:10.1007/s11430-022-9961-7
- 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]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences,41(1):30–42 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1605.15233
- Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al. 2005. A comparison of the ECMWF, MCS, and NCEP global ensemble prediction systems [J]. Monthly Weather Review,133(5):1076–1097. doi:10.1175/MWR2905.1
- Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L. 2008. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF ensemble prediction system [J]. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society,134(637):2051–2066. doi:10.1002/qj.346
- Hagelin S, Son J, Swinbank R, et al. 2017. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK [J]. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society,143(708):2846–2861. doi:10.1002/qj.3135
- 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. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<0.CO;2
- 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]. Monthly Weather Review,142(3):1053–1073. doi:10.1175/MWR-D-13-00204.1
- Kong F Y, Droegemeier K, Hickmon N L. 2006. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part I: comparison of coarse and fine-grid experiments [J]. Monthly Weather Review, 134(3):807–833. doi:10.1175/mwr3097.1
- 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]. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society, 140(682):1552–1562. doi:10.1002/qj.2238
- Ma X L, Xue J S, Lu W S. 2009. Study on ETKF-based initial perturbation scheme for GRAPES global ensemble prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica,23(5):562–574. doi: 10.1029/2009JD012351
- 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]. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society,142(S1):404–418. doi:10.1002/qj.2859
- Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al. 2011. The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF [J]. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society,137(655):483–502. doi: 10.1002/qj.751
- Wilks D S. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences (Second Edition) [M]. San Diego: Academic Press of Elsevier

(责任编辑 唐国瑛)