

陈良吕,陈静,霍振华,等,2019.两种确定性初值形成方案对集合预报技巧的影响研究[J].气象,45(6):745-755. Chen L L, Chen J, Huo Z H, et al, 2019. Impact of two different deterministic initial condition formation schemes on ensemble forecast skills[J]. Meteor Mon, 45(6):745-755(in Chinese).

两种确定性初值形成方案对集合预报技巧的影响研究^{*}

陈良吕¹ 陈 静² 霍振华² 夏 宇³ 陈法敬²

¹ 重庆市气象科学研究所,重庆 401147

² 中国气象局数值预报中心,北京 100081

³ 南京信息工程大学,南京 210044

提 要: 为了进一步提高 GRAPES-REPS 的降水预报性能,将 GRAPES-Meso 业务模式的高分辨率同化分析初值通过动力升尺度方法(简称 GRAPES-M-US 方案)产生 GRAPES-REPS 确定性初值,在此基础上进行了连续 10 d 的集合预报试验,并与基于 T639 全球模式同化分析初值动力降尺度方案(简称 T639-G-DS 方案)得到的确定性初值以及相应的集合预报结果进行了对比分析及预报检验,重点关注了降水预报的检验结果。结果表明:基于 GRAPES-M-US 方案得到的确定性初值相对于 T639-G-DS 方案得到的确定性初值而言,在低层具备更多的中小尺度信息;低层连续性变量预报表现较好,850 hPa 的位势高度和温度的均方根误差以及概率预报评分(CRPS)均表现出了一定的改进效果,而中层和高层要素改进不显著,10 m 风速均方根误差和 CRPS 均有较明显的改进效果,2 m 温度均方根误差和 CRPS 则基本相当;对降水预报而言,24 h 预报时效的小雨、中雨和大雨量级的 TS 评分、Brier 评分和相对作用特征面积(AROC)均有一定的改进,其余预报时效总体而言基本相当或略有负效果;在 2017 年 8 月 7 日的强降水个例中,对强降水落区和强度的预报表现出了一定的“细化”和“纠偏”效果;总体而言,GRAPES-M-US 方案较 T639-G-DS 方案表现出了一定的优势,特别是在短期降水预报方面。

关键词: 集合预报,确定性初值,动力升尺度,动力降尺度

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.001

Impact of Two Different Deterministic Initial Condition Formation Schemes on Ensemble Forecast Skills

CHEN Lianglü¹ CHEN Jing² HUO Zhenhua² XIA Yu³ CHEN Fajing²

¹ Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

² CMA Numerical Prediction Centre, Beijing 100081

³ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: In order to further improve the precipitation forecast skill of the GRAPES Regional Ensemble Prediction System (GRAPES-REPS), this paper uses the high resolution assimilation analysis field of GRAPES-Meso model to generate the deterministic initial condition of GRAPES-REPS by dynamic up-scaling scheme (hereinafter referred to as the GRAPES-M-US scheme). On this basis, a series of 10 d ensemble prediction experiments were carried out. Then the results were compared with the deterministic initial

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507200)、重庆市气象局业务技术攻关团队项目(YWGGTD-201715)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506005)和国家科技支撑计划项目(2015BAC03B01)共同资助

2018年1月30日收稿; 2018年9月28日收修定稿

第一作者:陈良吕,主要从事集合预报技术研究. Email: chenllv214@163.com

通信作者:陈静,主要从事集合预报技术研究. Email: chenjing@cma.gov.cn

condition which was generated by dynamic down-scaling scheme from the T639 global model assimilation analysis initial field (hereinafter referred to as T639-G-DS scheme) and the corresponding ensemble forecast results. The test results of the precipitation forecasts were more focused on. The results show that the deterministic initial condition based on the GRAPES-M-US scheme has more small- and mesoscale information at lower levels compared with deterministic initial condition based on the T639-G-DS scheme. Low-level continuous variable forecast skill is better, the root mean square error (RMSE) and continuous ranked probability score (CRPS) of 850 hPa geopotential height and temperature show some improvements, but the improvement of middle- and high-level elements is not significant. The RMSE and CRPS of 10 m wind speed have obvious improvement, and the RMSE and CRPS of 2 m temperature are basically equal. For the precipitation forecast, the TS score, Brier score and AROC of the 24 h forecast are improved to some extent for light rain, moderate rain and heavy rain, and the rest of the forecast lead time is generally equivalent or slightly negative. In the case of severe rainfall on 7 August 2017, the forecast of rainfall area and intensity of severe precipitation show a certain “refinement” and “corrective” effect. In general, the GRAPES-M-US scheme shows a certain advantage over the T639-G-DS scheme, especially in the short-range precipitation forecast.

Key words: ensemble prediction, deterministic initial condition, dynamic up-scaling, dynamic down-scaling

引 言

二十一世纪以来,集合预报的研究和应用越来越成熟,目前已成为日常天气预报业务中必不可少的工具,为解决单一的确性预报存在的不确定性问题提供了一条可靠的科学途径(陈静等,2002;杜均和陈静,2010a;2010b;杜均和邓国,2010;李泽椿和陈德辉,2002;王东海等,2011;陈博宇等,2016;董全等,2017;李勇,2016;张涵斌等,2017; Bowler et al, 2008; Denis et al, 2002; Marsigli et al, 2005; Saito et al, 2011; Weidle et al, 2016)。在集合预报系统中,通常会通过一定的初值扰动方法(陈静等,2005;马旭林等,2008;田伟红和庄世宇,2008)获得一组扰动初值,将扰动初值叠加到该系统未扰动的确定性初值上,得到一组集合成员的初值,并由这一组初值进行数值积分获得各个集合成员的预报,由此推断大气运动的可能状态,可见,未扰动的确定性初值质量的优劣对集合预报质量有重要影响。在区域集合预报系统中,确定性初值的获得通常有以下三种方法:第一种方法是将更低分辨率的全球模式初值通过动力降尺度方法(dynamic down-scaling scheme, DS)产生;第二种方法是由更高分辨率的区域模式初值通过动力升尺度方法(dynamic up-scaling scheme, US)产生;第三种方法是为区域集合预报系统单独建立一套同化系统,通过集合预

报自身的同化系统产生相应的确定性初值,但由于计算机资源的限制以及维护同化系统需要耗费较大的人力和物力,这种方法实际业务应用较少。目前国际上大部分区域集合预报业务系统采用第一种方法来产生区域集合预报系统的确定性初值,即全球模式同化分析初值动力降尺度方法。

中国气象局数值预报中心发展的 GRAPES 区域集合预报系统 (GRAPES Regional Ensemble Prediction System, GRAPES-REPS) 分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ (袁月等, 2016; 张涵斌等, 2014), 确定性预报模式采用 GRAPES-Meso 业务版本 V4.0 (黄丽萍等, 2017; 徐枝芳等, 2013; 薛纪善等, 2008), 确定性初值由数值预报中心 T639 全球模式的同化分析初值通过动力降尺度方法 (简称 T639-G-DS 方案) 获得, 集合预报成员扰动初值采用基于集合变换卡尔曼滤波 (ensemble transfer Kalman filter, ETKF) 扰动循环的多尺度混合初值扰动方法生成, 将扰动初值叠加到确定性初值上得到各个集合成员的初值。在实际业务中时常发现, 对于一些突发性强降水过程, GRAPES-Meso 业务模式 (分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) 的表现优于 GRAPES-REPS 的确定性预报, 初步考虑是两套业务系统初值的差异造成的, GRAPES-Meso 业务模式由于同化了大量的常规资料和非常规资料并进行了初始场三维云分析 (屈右铭等, 2010; 薛湛彬等, 2011; 王金成等, 2014; 朱立娟等, 2017), 其初值中可能包含了更丰富的中小尺度

信息以及更为准确的湿度场信息,因此降水预报较初值中未包含云分析和雷达资料同化的 GRAPES-REPS 更为准确。

为了进一步提高 GRAPES-REPS 的降水预报性能,本文将 GRAPES-Meso 业务模式的高分辨率初值通过动力升尺度方法(简称 GRAPES-M-US)产生 GRAPES-REPS 确定性初值,在此基础上进行集合预报试验,并与 T639-G-DS 方案得到的确定性初值以及相应的集合预报结果进行了对比分析及预报检验,重点关注降水预报的检验结果,由此探讨两种确定性初值形成方案对集合预报技巧的影响,为 GRAPES-REPS 的进一步发展提供参考。

1 资料与方法

1.1 GRAPES-REPS 简介

中国气象局数值预报中心目前业务运行的 GRAPES-REPS 确定性预报模式为 GRAPES-Meso 业务版本 V4.0,模式水平分辨率为 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$,垂直方向为 50 层,预报区域为 $15^\circ \sim 64.35^\circ \text{N}$ 、 $70^\circ \sim 145.15^\circ \text{E}$,范围覆盖了中国,确定性初值和边界条件采用 T639-G-US 方法产生,初值扰动方法为基于集合变换卡尔曼滤波(ETKF)扰动循环的多尺度混合初值扰动方法,模式扰动方法为随机物理过程扰动方法(stochastic perturbation of physical tendency, SPPT)和多物理过程组合法,集合预报成员侧边界扰动场来自 T639 全球集合预报成员,系统由未扰动的确定性预报和 14 个集合预报成员预报组成,ETKF 扰动循环时间为 12 h,分别为 00 UTC、12 UTC,积分预报时效为 72 h。

1.2 GRAPES-REPS 初值动力升尺度方案

GRAPES-Meso 模式水平方向为 Arakawa-C 格点分布,垂直方向采用高度地形追随坐标,模式预报变量的设置采用 Charney-Phillips 跳层(薛纪善等,2008),模式初始场信息主要包含纬向风速(u)、经向风速(v)、垂直风速(w)、比湿(q)、无量纲气压(Π)和位温(θ)等 6 个三维变量以及地表温度(t_{sk})、2 m 温度(t_2)、2 m 比湿(q_2)、地表气压(p_s)、海平面气压(p_{sea})、10 m 纬向风速(u_{10})和 10 m 经向风速(v_{10})等 7 个二维变量,GRAPES-Meso 业务模式水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,同化了大量的常规资料和

非常规资料并进行了初始场三维云分析,其初值中可能包含了更丰富的中小尺度信息以及更为准确的湿度场信息。GRAPES-M-US 方案即期望将水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 GRAPES-Meso 业务模式的初始场插值生成水平分辨率为 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ 的 GRAPES-REPS 确定性预报初始场。

霍振华等(2018)设计了 GRAPES 全球集合预报系统确定性初值动力升尺度方案,该方案有效地规避了仅仅对高分辨率无量纲气压场和位温场进行水平插值得到的低分辨率无量纲气压场和位温场存在较明显的噪音和小扰动的问题,本文参照该方案设计了 GRAPES-REPS 的确定性初值动力升尺度方案,具体实现方案如下:

(1) 对于纬向风速(u)、经向风速(v)、垂直风速(w)、比湿(q)、地表温度(t_{sk})、2 m 温度(t_2)、2 m 比湿(q_2)、地表气压(p_s)、海平面气压(p_{sea})、10 m 纬向风速(u_{10})和 10 m 经向风速(v_{10})等变量进行传统的水平双线性插值,具体做法如下:

如图 1 所示,假定低分辨率网格点 o 位于高分辨网格点 (i, j) 、 $(i+1, j)$ 、 $(i, j+1)$ 、 $(i+1, j+1)$ 等四个网格点构成的网格中间,点 o 距离网格点 (i, j) 和网格点 $(i+1, j+1)$ 的经向距离分别为 a 和 c 、纬向距离分别为 b 和 d ,以距离为权重进行加权可求得 o 处的变量值,具体计算如式(1)所示:

$$y_o = \frac{cd}{(a+c)(b+d)}y_{i,j} + \frac{ad}{(a+c)(b+d)}y_{i+1,j} + \frac{ab}{(a+c)(b+d)}y_{i+1,j+1} + \frac{bc}{(a+c)(b+d)}y_{i,j+1} \quad (1)$$

(2) 根据静力学方程,间接实现对无量纲气压(Π)的三维插值,具体做法如下:

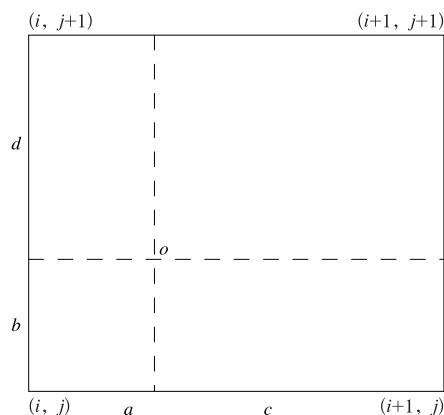


图 1 二维水平双线性插值方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional horizontal bilinear interpolation scheme

在 GRAPES 区域模式中,无量纲气压(Π)的定义如式(2)所示(薛纪善和陈德辉,2008),式中 p 为气压场, p_0 是模式大气的参考气压, R 是干空气气体常数, c_p 是空气定压比热。

$$\Pi = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{R/c_p} \quad (2)$$

对式(2)两端同时取对数,可得:

$$\ln p = \frac{c_p}{R} \ln \Pi + \ln p_0 \quad (3)$$

在高度坐标系中,气压 p 近似满足式(4)所示的静力学方程。

$$\frac{\partial \ln p}{\partial z} = -\frac{g}{RT} \quad (4)$$

式中, z 是高度, g 为重力加速度常数, R 是干空气气体常数, T 是温度。

由于 T 在各模式层间变化较小, $\ln p$ 在垂直方向上近似满足分段线性分布。因此,可以通过对 $\ln p$ 进行垂直线性插值间接地实现对无量纲气压 Π 的三维插值。

如图 2 所示,假定低分辨率格点 o 位于高分辨率格点 (i, j, k) 、 $(i+1, j, k)$ 、 $(i, j+1, k)$ 、 $(i+1, j+1, k)$ 、 $(i, j, k+1)$ 、 $(i+1, j, k+1)$ 、 $(i, j+1, k+1)$ 、 $(i+1, j+1, k+1)$ 构成的立方体网格中。

假定以 o 点为中心的水平截面与立方体相交于 $A_{i,j}$ 、 $A_{i+1,j}$ 、 $A_{i,j+1}$ 和 $A_{i+1,j+1}$ 等四个点。点 o 与点 $A_{i,j}$ 和点 $A_{i+1,j+1}$ 的经向距离分别为 a 和 c 、纬向距离分别为 b 和 d 。

首先,根据式(3)由 Π 求得各个高分辨率格点处的 $\ln p$ 值,在此基础上根据式(5)求解各交点处的 $\ln p$ 值(式(5)中的 e 和 f 分别表示各个交点与位于其下方和上方的高分辨率格点的距离),并由此得到各个交点处的气压值(p);然后,根据二维水平双线性插值式(6)求解点 o 处的气压值 p ;最后,根据

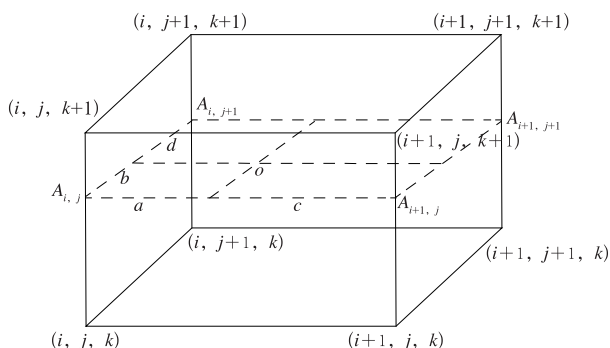


图 2 高低分辨率三维网格点示意图

Fig. 2 High and low resolution three-dimensional mesh point diagram

式(7)得到 Π 变量的值。

$$\ln p_A = \frac{f}{e+f} \ln p_k + \frac{e}{e+f} \ln p_{k+1} \quad (5)$$

$$p_o = \frac{cd}{(a+c)(b+d)} p_{A_{i,j}} + \frac{ad}{(a+c)(b+d)} p_{A_{i+1,j}} + \frac{ab}{(a+c)(b+d)} p_{A_{i,j+1}} + \frac{bc}{(a+c)(b+d)} p_{A_{i+1,j+1}} \quad (6)$$

$$\Pi_o = (p_o/p_0)^{R/c_p} \quad (7)$$

(3) 根据静力平衡关系,由比湿场(q)和无量纲气压场(Π)导出位温,具体做法如下:

在 GRAPES 模式中,静力平衡关系由式(8)给出。通过静力平衡关系,可以根据 Π 和 q 变量的值,得到位温 θ 的值,具体计算如式(9)所示。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = -\frac{g}{c_p(1+0.608q)\theta} \quad (8)$$

$$\theta = -\frac{g}{c_p(1+0.608q)} \frac{\partial \Pi}{\partial z} \quad (9)$$

1.3 试验设计及检验方法

选取 2017 年 8 月 1 日 00 时至 10 日 00 时(世界时,下同)连续 10 天进行集合预报试验:第一组试验(简称 exp0)采用 T639-G-DS 方案获得确定性初值,第二组试验(简称 exp1)采用 GRAPES-M-US 方案获得确定性初值,并分别将集合预报扰动场叠加到这两种确定性初值上,产生两组集合成员的初始场,在此基础上数值积分 72 h,并进行两种确定性初值的对比分析及预报结果的对比检验,重点关注降水预报的检验结果。

检验区域为 $15^\circ \sim 54.9^\circ \text{N}$ 、 $70^\circ \sim 134.95^\circ \text{E}$,检验要素为 250、500、850 hPa 的位势高度、温度、 U 风场和 V 风场等高空要素以及 2 m 温度、10 m 经向风速、10 m 纬向风速和 24 h 累计降水。等压面要素检验采用各自分析场作为实况参考场,计算 0~72 h 逐 12 h 的均方根误差和连续分级概率评分(CRPS)(矫梅燕等,2010)。降水检验采用全国 2500 个国家基本站的观测资料为实况资料,计算 TS 评分、Brier 评分和相对作用特征面积(AROC)。

2 试验及检验结果

2.1 确定性初值分布特征对比分析

2.1.1 平均绝对偏差

为全面了解 exp0 和 exp1 的确定性初值之间的

差异,计算了两种集合预报确定性初值各要素在各层次上的平均绝对偏差,具体计算方法如式(10)所示。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{\text{expl}} - A_{\text{exp0}}| \quad (10)$$

式中, A_{expl} 表示 expl 的确定性初值场, A_{exp0} 表示 exp0 的确定性初值场, N 为二维场总的格点数, MAE 为两种确定性初值的平均绝对偏差。平均绝对偏差的值越大,说明两种确定性初值的差异越大。

图3给出了两种初值的各个要素平均绝对偏差的垂直分布廓线,从图中可以看出:对于位势高度场而言,700 hPa以下,平均绝对偏差随着层次的增高略微减小,最高为3.7 gpm,最低为2.9 gpm。700 hPa以上,平均绝对偏差随着层次的增高而逐渐增大,最低为2.9 gpm,最高为13.2 gpm。对于温度场而言,300 hPa以下,平均绝对偏差随着层次的增高而逐渐减小,最高为0.78 K,最低为0.27 K;300 hPa以上,平均绝对偏差随着层次的增高呈现出一定的波动,总体而言表现出逐渐增大的趋势,最低为0.28 K,最高为0.59 K。纬向风速和经向风速的平均绝对偏差的分布特征基本一致,150 hPa以下,平均绝对偏差随着层次的增高而逐渐增大,纬向风速最低为0.72 m·s⁻¹,最高为1.13 m·s⁻¹,经向风速最低为0.71 m·s⁻¹,最高为1.10 m·s⁻¹;150 hPa以上,平均绝对偏差随着层次的增高先减小后增大,纬向风速最低为0.8 m·s⁻¹,最高为1.59 m·s⁻¹,经向风速最低为0.81 m·s⁻¹,最高为1.37 m·s⁻¹。

2.1.2 动能谱特征分析

动能谱分析可以有效地描述数值模式所能识别的尺度信息,本文采用二维离散余弦变换(Denis et al, 2002)对两种确定性初值场进行谱分解,得到了两种确定性初值的动能谱分布特征。为了便于比较,定义了 expl 的动能谱能量 E_{expl} 相对于 exp0 的动能谱能量 E_{exp0} 的提高比例 RA_E ,如式(11)所示,即各个波长对应的 expl 的动能谱能量与 exp0 的动能谱能量的差值除以 exp0 的动能谱能量,再乘以100%, RA_E 为正,说明 expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言有所增大, RA_E 为负则说明 expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言有所减小。

$$RA_E = 100\% \times (E_{\text{expl}} - E_{\text{exp0}}) / E_{\text{exp0}} \quad (11)$$

图4给出了1000、850、500和250 hPa的 expl 的动能谱能量(E)相对于 exp0 的动能谱能量的提高比例随波长的变化,从图中可以看出:1000和850 hPa的10~50 km波长范围内,expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言明显增大,50 km以上波长范围内,expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言基本相当或者略有减小;500和250 hPa的10~15 km和300~1000 km波长范围内,expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言明显增大,15~300 km波长范围内,expl 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量而言有所减小。上述结果表明,总体而言,通过GRAPES-M-US方案得到的确定性初值相对于通过T639-G-DS方案得到的确定性初值而言,可以获

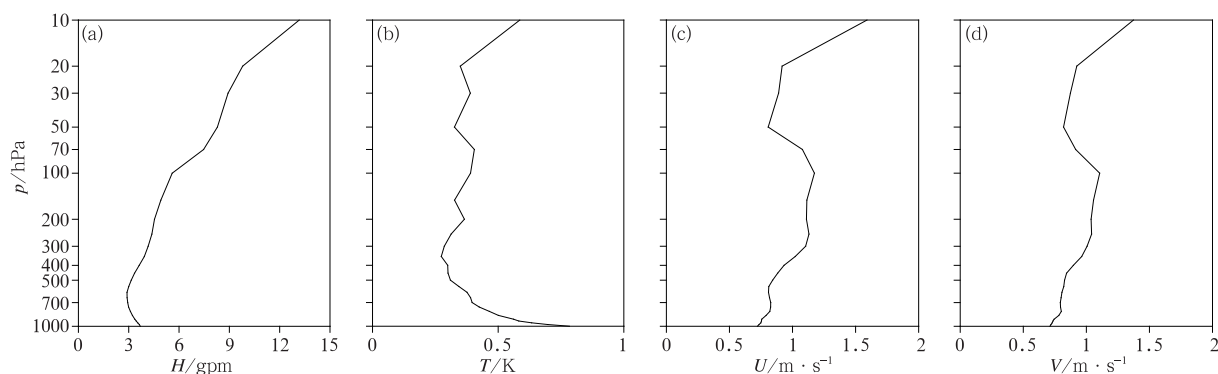


图3 两种确定性初值的平均绝对偏差的垂直分布

(a)位势高度场,(b)温度场,(c)纬向风速,(d)经向风速

Fig. 3 Vertical distribution of the mean absolute error of two schemes

(a) geopotential height field, (b) temperature field, (c) zonal wind speed,

(d) meridional wind speed

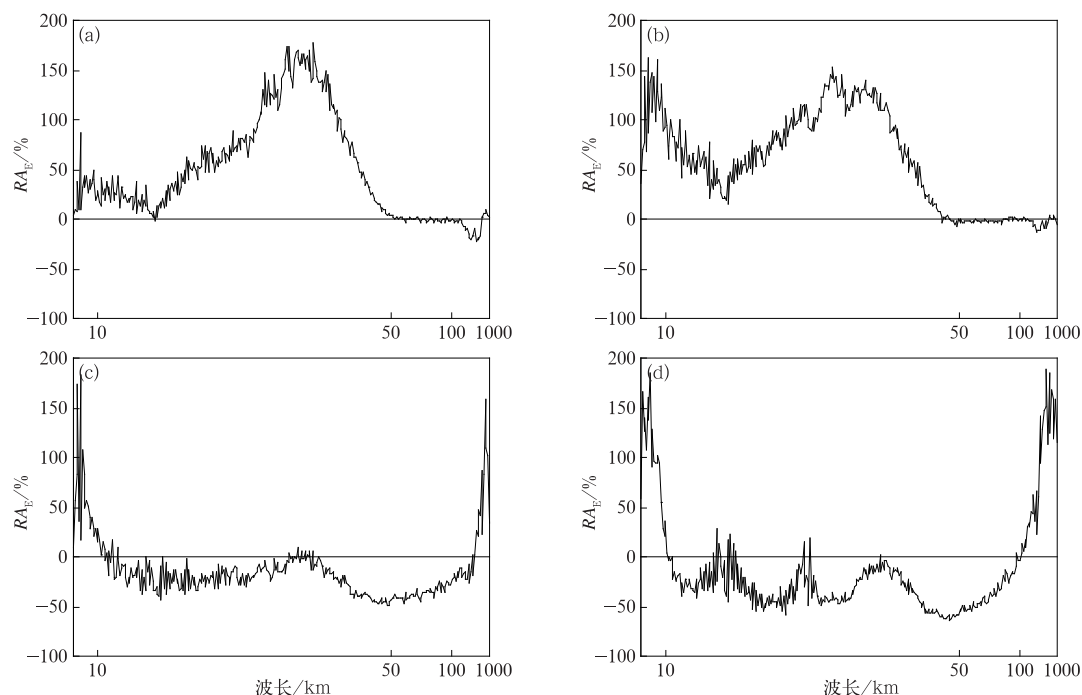


图 4 exp1 的动能谱能量相对于 exp0 的动能谱能量的改进比例

(a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa

Fig. 4 Improvement ratio of the kinetic energy spectrum energy of exp1 relative to the kinetic energy spectrum of exp0

(a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa

得更多的中小尺度信息。

2.2 确定性预报检验评分比较

图 5 为 exp1 和 exp0 的控制预报的各个要素 0~72 h 逐 12 h 的均方根误差,从图中可以看出,exp1 相对于 exp0 而言:250 hPa 的位势高度场略有负效果,温度场基本相当;500 hPa 位势高度场和温度场略有负效果;850 hPa 位势高度场和温度场有一定的改进;各个层次经向风速和纬向风速的均方根误差基本没有差别;2 m 温度的均方根误差基本相当,10 m 经向风速和 10 m 纬向风速的均方根误差有较明显的改进效果。

图 6 为 exp1 和 exp0 的控制预报的 0~72 h 逐 24 h 累计降水的 TS 评分,从图中可以看出:exp1 的 TS 评分相对于 exp0 的 TS 评分而言:0~24 h 累计降水小雨、中雨和大雨量级的 TS 评分均有较明显的改进,暴雨量级基本相当;24~48 h 累计降水小雨量级的 TS 评分略有改进,其余量级略有负效果;48~72 h 累计降水小雨、中雨和大雨量级的 TS 评分均有略有改进,暴雨量级略有负效果。

图 7 为 exp0 和 exp1 的 2017 年 8 月 7 日 00 时起报的控制预报的 24 h 累计降水预报及相应的降水实况,从图中可以看出:此次强降水过程主要发生在四川东南部偏东地区、四川东北部偏北地区及其邻近的陕西和甘肃的部分地区以及重庆的东北部地区。仔细对比后可发现,对于四川东南部偏东地区的大暴雨量级降水落区的预报,exp1 的预报与实况更为接近;对于四川东北部偏北地区及其邻近的陕西和甘肃的部分地区出现的暴雨和大暴雨量级的降水,exp0 几乎完全漏报,但 exp1 预报出了暴雨量级的降水,且雨带的分布与实况的对应较好;陕西东南部偏南地区实况并没有出现暴雨量级的降水,exp0 存在较明显的暴雨量级降水的空报,而 exp1 在这一地区的暴雨量级降水空报现象并不明显。综上所述,总体而言,exp1 对强降水落区和强度的预报相对于 exp0 而言表现出了一定的“细化”和“纠偏”的效果。

2.3 集合预报检验评分比较

图 8 为 exp1 和 exp0 的各个要素 0~72 h 逐

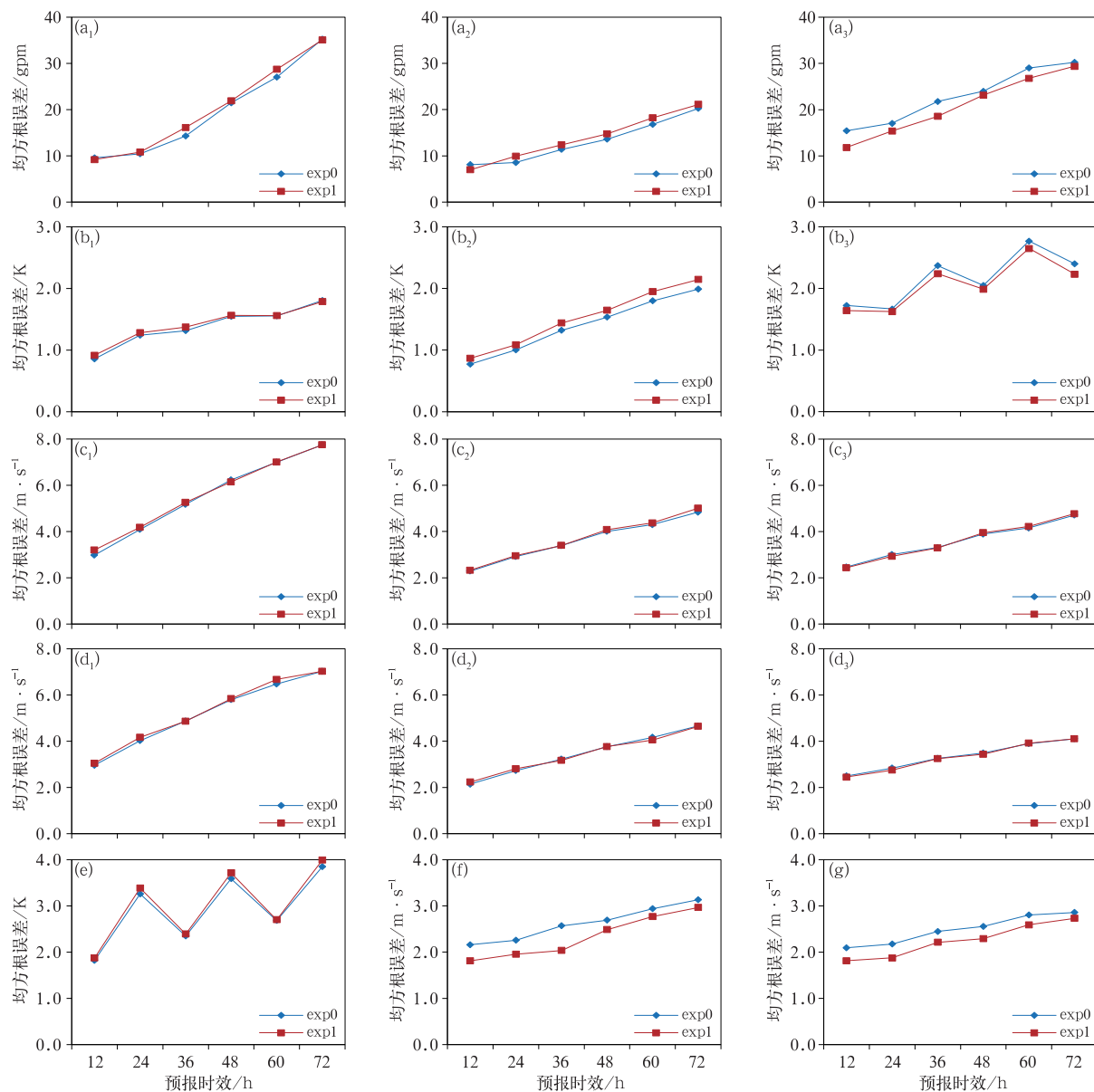


图5 位势高度(a)、温度(b)、纬向风速(c)、经向风速(d)、2 m 温度(e)、10 m 纬向风速(f)、10 m 经向风速(g)0~72 h 逐 12 h 的均方根误差

(a₁, b₁, c₁, d₁) 250 hPa, (a₂, b₂, c₂, d₂) 500 hPa, (a₃, b₃, c₃, d₃) 850 hPa

Fig. 5 Root mean square errors of (a) geopotential height, (b) temperature, (c) zonal wind speed, (d) meridional wind speed, (e) 2 m temperature, (f) 10 m zonal wind speed, (g) 10 m meridional wind speed for 0~72 h forecast

(a₁, b₁, c₁, d₁) 250 hPa, (a₂, b₂, c₂, d₂) 500 hPa, (a₃, b₃, c₃, d₃) 850 hPa

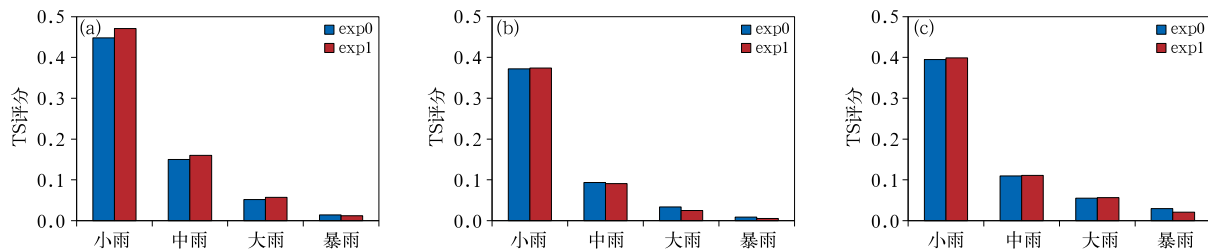


图6 0~24 h(a), 24~48 h(b), 48~72 h(c) 逐 24 h 累计降水的 TS 评分

Fig. 6 (a) 0~24 h, (b) 24~48 h, (c) 48~72 h TS score of 24 h accumulated precipitation

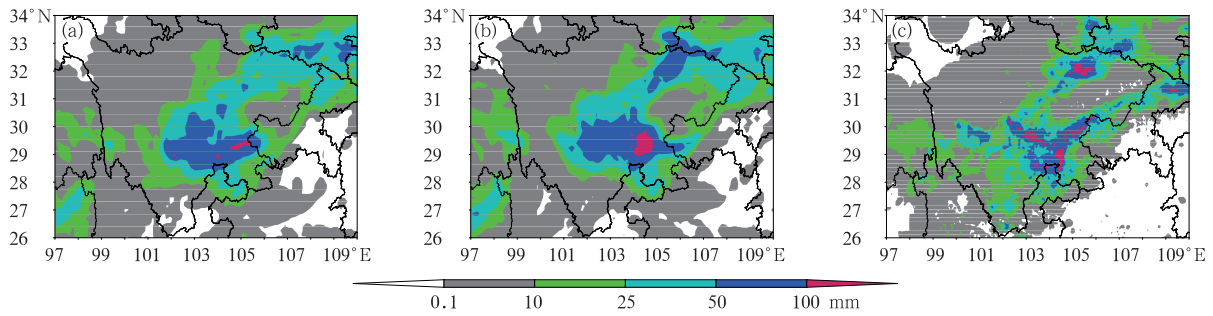


图 7 2017 年 8 月 7 日 00 UTC 时起报的(a)exp0 的 24 h 累计降水预报,

(b)exp1 的 24 h 累计降水预报和(c)降水实况

Fig. 7 24 h accumulated precipitation forecast of exp0 (a) and exp1 (b) and the observation (c) at 00 UTC 7 August 2017

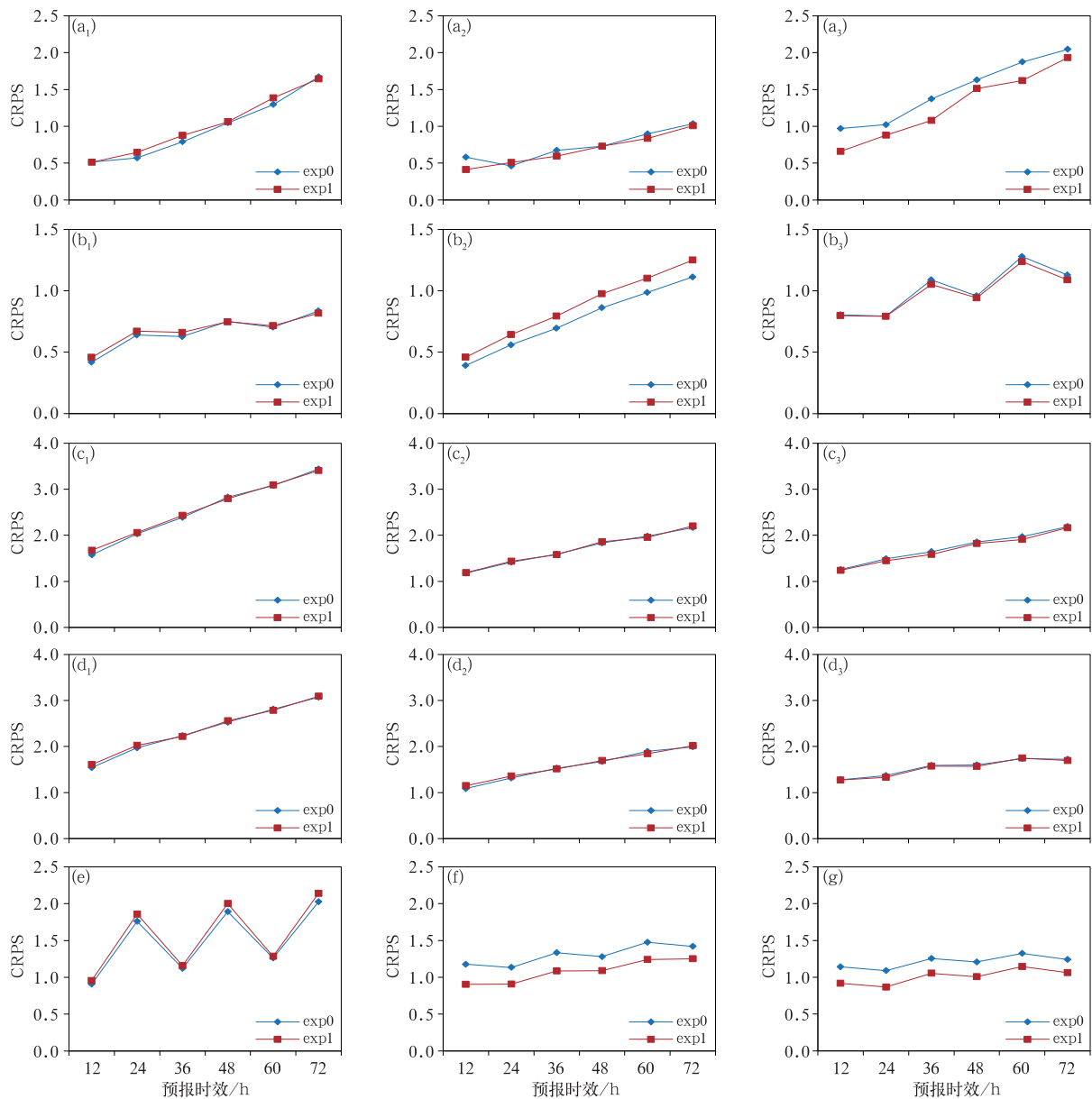


图 8 同图 5, 但为 CRPS

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for CRPS

12 h 的 CRPS,从图中可以看出,exp1 相对于 exp0 而言:250 hPa 位势高度和温度略有负效果;500 hPa 位势高度略有改进,温度有较明显的负效果;850 hPa 位势高度和温度均有一定的改进,各个层次经向风速和纬向风速的 CRPS 基本没有差别;2 m 温度的 CRPS 的基本相当;10 m 经向风速和 10 m 纬向风速的 CRPS 均有较明显的改进效果。

图 9 为 exp1 和 exp0 的 0~72 h 逐 24 h 累计降水的 Brier 评分和相对作用特征面积 AROC,从图中可以看出,exp1 的 Brier 评分相对于 exp0 的 Brier 评分而言:0~24 h 累计降水小雨、中雨和大雨量级的 Brier 评分均略有改进,暴雨量级差别不大;24~48 h 累计降水各个量级的 Brier 评分基本无差别;48~72 h 累计降水除小雨量级的 Brier 评分略有改进外其余量级的基本无差别。exp1 的 AROC 相对于 exp0 的 AROC 而言:0~24 h 累计降水各个降水量级的 AROC 均略有改进;24~48 h 累计降水小雨、中雨和大雨量级的 AROC 均略有改进,暴雨量级的 AROC 略有负效果;48~72 h 累计降水除小雨量级的 AROC 略有负效果外其余量级均略有改进。

3 结论和讨论

为了进一步提高 GRAPES-REPS 的降水预报

性能,本文将 GRAPES-Meso 业务模式的高分辨率初值通过动力升尺度方案 (GRAPES-M-US) 产生 GRAPES-REPS 确定性初值,在此基础上进行集合预报试验,并与 T639-G-DS 方案得到的确定性初值以及相应的集合预报结果进行了对比分析及预报检验,由此探究两种确定性初值形成方案对集合预报技巧的影响,得到结论如下:

(1) 设计了 GRAPES-REPS 确定性初值动力升尺度方案:根据静力学方程,间接实现对无量纲气压(Π)的三维插值;根据静力平衡关系,由比湿场(q)和无量纲气压场(Π)导出位温;其余变量进行传统的水平双线性插值。

(2) 对比了两种方案得到的确定性初值的差异,总体而言:位势高度场在 700 hPa 以下差异较小。700 hPa 以上两者的差异随着层次的增高而逐渐增大;温度场在 300 hPa 以下两者的差异随着层次的增高而逐渐减小,300 hPa 以上随着层次的增高总体而言表现出逐渐增大的趋势;经向风速和纬向风速在 150 hPa 以下两者的差异随着层次的增高而逐渐增大,150 hPa 以上随着层次的增高总体而言表现出逐渐增大的趋势。

(3) 对比了两种方案得到的确定性初值的动能谱分布特征:总体而言,通过 GRAPES-M-US 方案得到的确定性初值相对于通过 T639-G-DS 方案得到的确定性初值而言,可以获得更多的中小尺度信息。

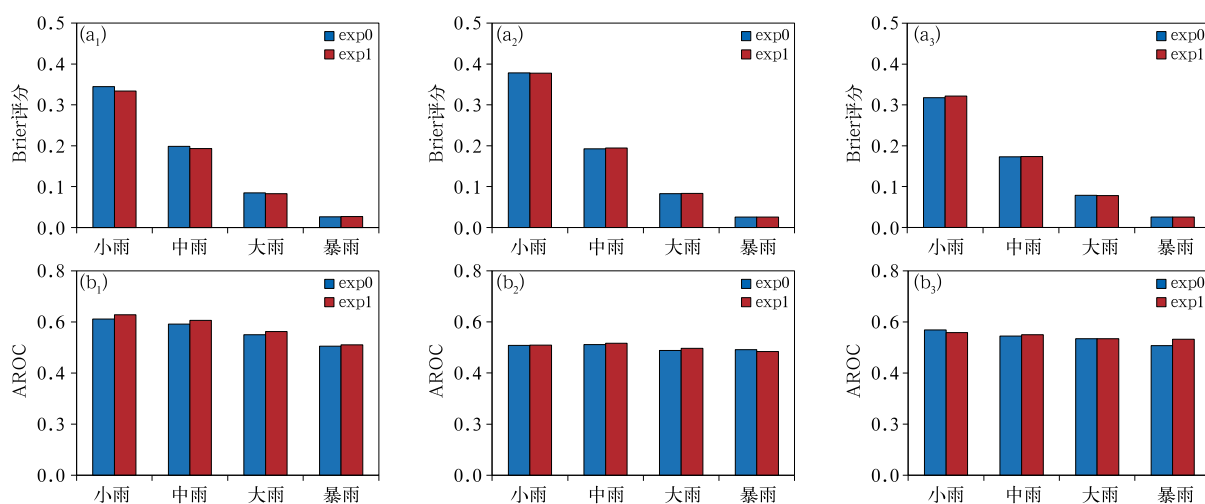


图 9 0~24 h (a_1, b_1), 24~48 h (a_2, b_2), 48~72 h (a_3, b_3)

逐 24 h 累计降水的 Brier 评分(a)和 AROC(b)

Fig. 9 Brier score (a) and AROC (b) for 24 h accumulated precipitation in 0-24 h (a_1, b_1), 24-48 h (a_2, b_2), 48-72 h (a_3, b_3)

(4) 对比了基于两种确定性初值进行数值积分得到的确定性预报和集合预报的检验结果, GRAPES-M-US 方案相对于 T639-G-DS 方案而言:高空要素中 850 hPa 位势高度和温度的均方根误差和 CRPS 表现出了一定的改进效果,其余要素基本相当或略有负效果;10 m 经向风速和纬向风速的均方根误差和 CRPS 均有较明显的改进效果;2m 温度的均方根误差和 CRPS 基本相当;0~24 h 累计降水的小雨、中雨和大雨量级的 TS 评分、Brier 评分和 AROC 均有一定的改进,其余预报时效基本相当或略有负效果;在 2017 年 8 月 7 日的强降水个例中,对强降水落区和强度的预报表现出了一定的“细化”和“纠偏”的效果;总体而言,表现出了一定的优势,特别是在短期降水预报方面。

由于计算资源有限,本文仅进行了 10 d 的集合预报批量试验,有待进行更长时间的平行试验及诊断分析。

参考文献

- 陈博宇,郭云谦,代刊,等,2016.面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验[J].气象,42(12):1465-1475. Chen B Y, Guo Y Q, Dai K, et al, 2016. Research for the ensemble member optimization correction technique on typhoon rainstorm forecast and its application experiment [J]. Meteor Mon, 42(12):1465-1475(in Chinese).
- 陈静,陈德辉,颜宏,2002.集合数值预报发展与研究进展[J].应用气象学报,13(4):497-507. Chen J, Chen D H, Yan H, 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system [J]. J Appl Meteor Sci, 13(4):497-507(in Chinese).
- 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).
- 董全,代刊,陶亦为,等,2017.基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报产品应用和检验[J].气象,43(9):1095-1109. Dong Q, Dai K, Tao Y W, et al, 2017. Application and verification of extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 43(9):1095-1109(in Chinese).
- 杜均,陈静,2010a.天气预报的公众评价与发布形式的变革[J].气象,36(1):1-6. Du J, Chen J, 2010a. Necessity of communicating uncertainty in weather forecasts in view of public criticism[J]. Meteor Mon, 36(1):1-6(in Chinese).
- 杜均,陈静,2010b.单一值预报向概率预报转变的基础:谈谈集合预报及其带来的变革[J].气象,36(11):1-11. Du J, Chen J, 2010b. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction[J]. Meteor Mon, 36(11):1-11(in Chinese).
- 杜均,邓国,2010.单一值预报向概率预报转变的价值:谈谈概率预报的检验和应用[J].气象,36(12):10-18. Du J, Deng G, 2010. The utility of the transition from deterministic to probabilistic weather forecasts-verification and application of probabilistic forecasts[J]. Meteor Mon, 36(12):10-18(in Chinese).
- 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J].应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):25-37(in Chinese).
- 霍振华,陈静,李晓莉,等,2018. GRAPES 业务全球集合控制预报初值的动力升尺度方法研究[J].气象科技,46(4):707-717. Huo Z H, Chen J, Li X L, et al, 2018. Dynamical upscaling technique for initial fields of GRAPES operational global ensemble control forecast[J]. Meteor Sci Technol, 46(4):707-717(in Chinese).
- 矫梅燕,龚建东,沈学顺,等,2011.现代数值预报业务[M].北京:气象出版社:127-140. Jiao M Y, Gong J D, Shen X S, et al, 2011. Modern Numerical Weather Prediction Operation[M]. Beijing: China Meteorological Press:127-140(in Chinese).
- 李勇,2016.2011 年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探[J].气象,42(9):1114-1123. Li Y, 2016. Performance analysis on extended range ensemble prediction over middle and lower reaches of Yangtze River in Meiyu period of 2011[J]. Meteor Mon, 42(9):1114-1123(in Chinese).
- 李泽椿,陈德辉,2002.国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用[J].应用气象学报,13(1):1-15. Li Z C, Chen D H, 2002. The development and application of the operational ensemble prediction system at National Meteorological Center[J]. J Appl Meteor Sci, 13(1):1-15(in Chinese).
- 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 X L, Xue J S, Lu W S, 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):526-536(in Chinese).
- 屈右铭,陆维松,蔡荣辉,等,2010. GRAPES-Meso 云分析系统的设计与试验[J].气象,36(10):37-45. Qu Y M, Lu W S, Cai R H, et al, 2010. Design and experiment of GRAPES-Meso cloud analysis system[J]. Meteor Mon, 36(10):37-45(in Chinese).
- 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 W H, Zhuang S Y, 2008. Application of ETKF method to regional ensemble forecasts[J]. Meteor Mon, 34(8):35-39(in Chinese).
- 王东海,杜均,柳崇健,2011.正确认识和对待天气气候预报的不确定性[J].气象,37(4):385-391. Wang D H, Du J, Liu C J, 2011. Recognizing and dealing with the uncertainty in weather and climate forecasts[J]. Meteor Mon, 37(4):385-391(in Chinese).
- 王金成,龚建东,邓莲堂,2014. GNSS 反演资料在 GRAPES_Meso 三维变分中的应用[J].应用气象学报,25(6):654-668. Wang J C,

- Gong J D, Deng L T, 2014. Operational assimilation of data retrieved by GNSS observations into GRAPES_Meso 3DVar system[J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(6): 654-668 (in Chinese).
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等, 2013. GRAPES_RAFS 系统研发[J]. *气象*, 39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al, 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS[J]. *Meteor Mon*, 39(4): 466-477 (in Chinese).
- 薛湛彬, 龚建东, 薛纪善, 等, 2011. FY-2E 卫星云导风定高误差及在同化中的应用[J]. *应用气象学报*, 22(6): 681-690. Xue C B, Gong J D, Xue J S, et al, 2011. Height assignment error of FY-2E atmospheric motion vectors and its application to data assimilation[J]. *J Appl Meteor Sci*, 22(6): 681-690 (in Chinese).
- 薛纪善, 陈德辉, 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京: 科学出版社: 1-54. Xue J S, Chen D H, 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction System GRAPES[M]. Beijing: Science Press: 1-54 (in Chinese).
- 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等, 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究[J]. *科学通报*, 53(20): 2408-2417. Xue J S, Zhuang S Y, Zhu G F, et al, 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES[J]. *Chin Sci Bull*, 53(22): 3446-3457 (in Chinese).
- 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 Y, Li X L, Chen J, et al, 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system[J]. *Meteor Mon*, 42(10): 1161-1175 (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).
- 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese).
- 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.
- Denis B, Côté J, Laprise R, 2002. Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limited-area domains using the discrete cosine transform (DCT)[J]. *Mon Wea Rev*, 130(7): 1812-1829.
- Marsigli C, Boccanera F, Montani A, et al, 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification[J]. *Nonlin Processes Geophys*, 12(4): 527-536.
- Saito K, Hara M, Kunii M, et al, 2011. Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the Meteorological Research Institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP)[J]. *Tellus A*, 63(3): 445-467.
- Weidle F, Wang Yong, Smet G, 2016. On the impact of the choice of global ensemble in forcing a regional ensemble system[J]. *Wea Forecasting*, 31(2): 515-530.