

GRAPES 全球集合预报系统模式扰动随机 动能补偿方案初步探究*

彭飞^{1,2} 李晓莉^{1,2} 陈静^{1,2} 李红祺^{1,2}
PENG Fei^{1,2} LI Xiaoli^{1,2} CHEN Jing^{1,2} LI Hongqi^{1,2}

1. 中国气象局数值预报中心,北京,100081
 2. 国家气象中心,北京,100081
 1. *Numerical Weather Prediction Center of CMA, Beijing 100081, China*
 2. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*
- 2017-12-11 收稿,2018-07-10 改回.

彭飞,李晓莉,陈静,李红祺. 2019. GRAPES 全球集合预报系统模式扰动随机动能补偿方案初步探究. 气象学报, 77(2): 180-195

Peng Fei, Li Xiaoli, Chen Jing, Li Hongqi. 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(2):180-195

Abstract For describing uncertainties in the subgrid-scale energy upscaling transfer, a Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB) scheme has been introduced into the Global/Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES) global ensemble prediction system (GEPS) to represent model errors more reasonably and increase the ensemble spread. In this research, the SKEB scheme employs the stochastic patterns with temporally and spatially correlated characteristics along with the estimated local kinetic energy dissipation rates caused by numerical diffusion to construct the stochastic stream function forcing. According to the relationship between the streamfunction and the rotational component of horizontal wind, the streamfunction forcing in the SKEB scheme is then transformed into horizontal wind perturbations, which are suitable for the GRAPES global model. The results indicate that, on the one hand, the application of the SKEB scheme improves the simulations of the atmospheric kinetic-energy spectra in the GRAPES model; on the other hand, it leads to a better spread-error relationship, increases the spread of the ensemble and reduces the root mean square error of the ensemble mean to some extent and the improvement is the most pronounced in the tropics. This scheme also contributes to a significant improvement of the continuous rank probability score (CRPS) in the tropics. In terms of precipitation forecast, the results from the Brier score and Area under the Relative Operating Characteristics (AROC) show that the SKEB scheme helps to improve probabilistic forecast skills of rainfall in China for light rain [0.1 mm, 10 mm), moderate rain [10 mm, 25 mm) and heavy rain [25 mm, 50 mm); however, it has little impact on the forecast of rainstorm [50 mm, ∞) (24 h precipitation). On the whole, the introduction of the SKEB scheme ameliorates the probabilistic prediction skills of the GRAPES-GEPS.

Key words GRAPES global ensemble prediction, Model perturbations, Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB) Scheme, Local kinetic energy dissipation rate

摘要 为了体现次网格尺度能量升尺度转换过程中存在的不确定性,文中将随机动能补偿(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB)方案应用于 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)全球集合预报系统(GRAPES-

* 资助课题:国家科技支撑计划项目(2015BAC03B01)、中国气象局公益性行业科研专项(GYHY201506005)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB417204)和中国气象局数值预报中心青年基金课题(400303)。

作者简介:彭飞,主要从事数值天气预报和集合预报研究。E-mail: pengf@cma.gov.cn

通信作者:李晓莉,主要从事数值天气预报和集合预报研究。E-mail: lixl@cma.gov.cn

GEPS),以更好地表征模式误差并且增大集合离散度。使用的 SKEB 方案基于具有一定时、空相关特征的随机型以及由数值扩散导致的局地动能耗散率来构造随机流函数强迫。并根据流函数与水平风速旋转分量的关系,将 SKEB 方案中的流函数强迫转化为适用于 GRAPES 全球模式的水平风速扰动。结果表明,SKEB 方案的使用一方面能够提高 GRAPES 对大气动能谱的模拟能力;另一方面能够改善 GRAPES-GEPS 的集合离散度与集合平均误差的关系,增加了集合离散度,并在一定程度上减小了集合平均误差,尤其是在热带地区这种改进更为显著。而且该方案使得热带地区连续分级概率评分(CRPS 评分)显著减小。就降水预报而言,从 Brier 评分与相对作用特征面积(AROC, Area under the Relative Operating Characteristics)的结果来看,SKEB 方案有助于改善中国地区小雨[0.1 mm,10 mm)、中雨[10 mm,25 mm)与大雨[25 mm,50 mm)量级降水的概率预报技巧,而对暴雨[50 mm,∞)量级降水预报技巧影响很小(24 h 降水量)。总体上,模式扰动随机动能补偿方案提高了 GRAPES-GEPS 的概率预报技巧。

关键词 GRAPES 全球集合预报,模式扰动,随机动能补偿方案,局地动能耗散率

中图法分类号 P456

1 引言

集合预报是数值预报的重要组成部分,根据数值预报误差来源,集合预报技术主要分为初值扰动技术和模式扰动技术。早期研究人员主要关注初值扰动技术(Toth, et al,1993; Molteni, et al,1996)。较为成功的初值扰动方法有蒙特卡罗法(Leith,1974)、滞后平均法(Hoffman, et al,1983)、增长模繁殖法(Toth, et al,1993)、奇异向量方法(Buizza, et al,1995; Molteni, et al,1996)、观测扰动法(Houtekamer, et al,1996)、集合变换卡尔曼滤波方法(Bishop, et al,2001; Wang, et al,2003; 马旭林等,2008)等。但是,仅使用初值扰动的集合预报系统存在集合成员不够发散、集合预报系统可靠性不高的缺陷(Wilks,2005; Palmer, et al,2005)。因而,模式扰动成为集合预报扰动技术的另一个研究焦点,是目前国际上各大数值预报中心集合预报技术研发和改进的重要内容。

根据数值预报模式自身误差来源,现有模式扰动技术可分为多模式组合法、多物理参数化方案组合法和随机参数化方案。其中,多模式组合法采用多个数值模式来表征模式动力框架和物理过程的误差;而后两种方法均基于单一数值模式,多物理参数化方案组合法体现不同参数化方案在描述物理过程方面的不确定性,随机参数化方案描述了次网格尺度过程参数化过程中存在的不确定性。

就随机参数化方案而言,很多研究均已强调将其应用于数值天气预报和气候预测中的必要性和重要性(Palmer, 2012; Berner, et al,2017)。一般来说,它通过引入具有一定时、空相关特征的随机扰动来表征次网格尺度过程参数化过程中存在的误差,

具有不同复杂程度的实现形式。例如,考虑物理过程参数化方案积分倾向项不确定性的随机参数化倾向扰动方案(Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT; Buizza, et al,1999; Palmer, et al,2009)、考虑次网格尺度能量升尺度转换的随机动能补偿方案(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB; Shutts, 2005; Berner, et al,2009)、考虑重要参数或者关键变量不确定性的随机参数扰动方案(Li, et al,2008; Christensen, et al,2015; Ollinaho, et al,2017)以及为描述特定参数化方案(例如对流参数化方案)中存在的确定性而专门发展起来的一些随机物理方案(Tompkin, et al,2008; Plant, et al,2008; Bengtsson, et al,2013; Kober, et al,2016)等。研究表明,这些随机方案的引入能够增大集合离散度,改善集合预报系统离散度不足的情况(Berner, et al,2009; Charron, et al,2010; Tennant, et al,2011; Sanchez, et al,2016),甚至能够减小模式的系统性偏差(Berner, et al,2015)。

SKEB 方案是集合预报业务及研究中应用较为广泛的随机参数化方案之一,其基本思想是通过描述次网格尺度上能量的升尺度转换过程以对数值模式在截断尺度附近存在的能量过度耗散进行补偿。与真实大气的能量谱特征相比,数值天气预报模式在截断尺度附近存在过度的能量耗散,这会抑制能量从次网格尺度向可分辨尺度的转换;而且,参数化的重力波拖曳以及深对流过程也影响上述的能量转换(Shutts, et al,2005; 麻巨慧等,2011)。基于此,Shutts(2005)根据应用于大涡模拟研究中的随机动能补偿思想(Mason, et al,1992),首次将 SKEB 方案应用于集合预报研究,基于元胞自动机(cellular

automaton)产生的具有一定时、空相关特征的随机型以及局地动能耗散率函数,在模式预报方程中引入随机流函数强迫和温度强迫,对由数值扩散、参数化的重力波拖曳以及深对流过程导致的能量耗散进行补偿。可见,SKEB方案体现了模式本身所不能描述的次网格尺度过程中存在的不确定性。Shutts (2005)指出,该方案的引入不仅增加了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报系统的离散度,提高了概率预报技巧,而且改进了ECMWF模式(T159)对大气动能谱的模拟能力,有助于该模式较好地再现实际观测中大气动能在中尺度区域与 $\kappa^{-5/3}$ (κ 为波数)成正比的关系(Nastrom, et al, 1985)。

在Shutts (2005)工作的基础上,Berner等(2009)对SKEB方案进行了发展和改进,主要改进了随机型的生成方案。改进后的方案与Li等(2008)研究中使用的随机型产生方案类似,均基于空间上的球谐函数展开,并使用一阶自回归过程(亦即马尔科夫随机过程)进行谱系数随时间的演变。由这种方案得到的随机型具有可任意调整的时、空相关特征,进而可实现对随机扰动场空间尺度大小以及时间相关特征的控制。目前,在ECMWF、加拿大气象中心、英国气象局、日本气象厅以及中国气象局集合预报系统的随机参数化方案中,均使用类似的随机型生成方案(Palmer, et al, 2009; Charron, et al, 2010; Yonehara, et al, 2011; 袁月等, 2016)。此外,Berner等(2009)进一步对SKEB方案进行了简化,使用常值来替代原方案中随空间、时间变化的局地动能耗散率,并评估了这种简化的SKEB方案对集合预报系统的影响。结果表明,简化的SKEB方案同样有助于增加集合离散度,改善概率预报技巧,但是效果不如使用随空间、时间变化局地动能耗散率的SKEB方案。

在不同研究工作中,SKEB方案的具体实施策略略有差异,存在不同的变化形式。例如,就局地动能耗散率的估计而言,Palmer等(2009)考虑了由数值扩散、参数化的重力波拖曳以及深对流过程导致的动能耗散率;Charron等(2010)只考虑了由数值扩散引起的动能耗散率;Tennant等(2011)和Sanchez等(2016)仅在SKEB方案中使用了与数值扩散以及对流参数化过程有关的动能耗散率;而在基于WRF(Weather Research and Forecasting)模式的

中尺度(Berner, et al, 2011, 2015; Hacker, et al, 2011)以及对流尺度区域集合预报研究中(Duda, et al, 2016),SKEB方案则均使用了不随空间、时间变化的常值型动能耗散率。而且,并非所有形式的SKEB方案均对温度场进行强迫(Palmer, et al, 2009; Sanchez, et al, 2016)。尽管存在上述差异,这些研究结果均一致表明,SKEB方案能够有效增大集合离散度,提高集合预报系统的可靠性。

中国关于随机参数化方案的研究起步较晚。任志杰等(2011)、谭宁等(2013)、袁月等(2016)、蔡沅辰等(2017)、闵锦忠等(2018)以及刘畅等(2018)对此进行了研究,并且这些研究几乎都局限于随机倾向扰动方案。任志杰等(2011)研究了随机物理过程倾向扰动方案对T213全球集合预报系统的影响。谭宁等(2013)对比分析了随机物理和动力过程总倾向扰动方案与随机物理过程倾向扰动方案对T213全球集合预报系统的影响。这两个研究均使用满足均匀分布、不具有时空相关特征的随机型扰动倾向。袁月等(2016)基于满足高斯分布、具有时空相关特征的随机型将SPPT方案应用于GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)区域集合预报系统,提高了该系统的预报技巧。闵锦忠等(2018)与刘畅等(2018)探讨了SPPT方案对风暴尺度集合预报的影响。关于SKEB方案的研究中国很少,仅有蔡沅辰等(2017)使用SKEB方案进行了风暴尺度集合预报研究,尚未有文献专门讨论SKEB方案对全球中期集合预报的影响。

GRAPES全球集合预报系统(GRAPES-GEPS)初值扰动技术采用奇异向量(SVs)方法(刘永柱等, 2013);模式扰动技术采用SPPT方案,使用模式物理倾向与具有一定时、空相关特征的随机型的乘积来扰动模式倾向,体现了物理参数化方案中次网格物理倾向存在的不确定性(袁月等, 2016),但SPPT方案与SKEB方案所强调的模式误差来源是不同的(Shutts, 2005)。为了能够更加全面地描述GRAPES全球模式误差,更好地估计模式预报不确定性,有必要将SKEB方案应用于GRAPES-GEPS。因而,本研究将在评估GRAPES全球模式局地动能耗散率的基础上,发展GRAPES-GEPS的模式扰动SKEB方案,并进行集合预报试验,分析SKEB方案对GRAPES-GEPS的影响,以期能够增大集合离散度,提高GRAPES-GEPS的概率预报技

巧,最终为 GRAPES-GEPS 的发展提供模式扰动方法储备。

2 GRAPES-GEPS 简介

GRAPES 全球数值预报模式(薛纪善等,2008)是中国自主研发的、采用半隐式半拉格朗日动力框架的非静力数值天气预报模式。在 GRAPES 全球数值预报模式的基础上,中国气象局数值预报中心发展了 GRAPES 全球集合预报模式,其水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直为 60 层,积分步长为 600 s,预报时效为 10 d。GRAPES-GEPS 的初值扰动技术使用奇异向量(SVs)方法(刘永柱等,2013),分别以北半球热带外地区、南半球热带外地区为目标区域计算获得奇异向量,然后使用满足高斯分布的随机数对得到的奇异向量进行线性组合以产生初值扰动,并将初值扰动以正、负扰动对的形式叠加在分析场上生成初值扰动场。目前,GRAPES-GEPS 共有 41 个集合成员,包括 40 个扰动成员与 1 个对照预报。模式扰动技术方面,GRAPES-GEPS 仅使用了 SPPT 方案,该方案用于表征物理参数化方案中次网格物理倾向存在的误差。

3 SKEB 方案、试验设计与资料介绍

3.1 SKEB 方案

由于数值扩散、重力波拖曳与深对流过程的参数化处理,数值模式存在过度的能量耗散问题,这会影 响能量从次网格尺度向可分辨尺度的转换。SKEB 方案的基本原理就是通过使用具有一定时、空相关特征的随机型以及局地动能耗散率来构造随机流函数强迫的方式对上述过度耗散的能量进行补偿,该方案体现了模式中次网格尺度上能量的升尺度转换过程。为了将随机动能补偿方案 SKEB 引入 GRAPES-GEPS 中,下面将依次介绍使用的随机型生成方案、局地动能耗散率计算方案以及流函数强迫的定义形式。

3.1.1 随机型

参照 Li 等(2008)提出的随机型产生方案,使用三角截断的球谐函数展开式定义随机型 $\psi(\lambda, \phi, t)$

$$\psi(\lambda, \phi, t) = \mu + \sum_{l=L_{\min}}^{L_{\max}} \sum_{m=-l}^l a_{l,m}(t) Y_l^m(\lambda, \phi) \quad (1)$$

式中, λ, ϕ, t 分别为经度、纬度、时间, μ 为平均值。 $Y_l^m(\lambda, \phi)$ 为球谐函数,并构成了球面上的一组正交

函数基。在球谐函数空间中, m, l 分别表示纬向波数和总波数, L_{\min}, L_{\max} 分别为随机型的最小、最大截断波数。如果至少存在一个谱系数 $a_{l,m}(t)$ 是非零的且不服从白噪声谱,那么由式(1)表示的随机型即为空间上相关的随机扰动。而随机型时间维上的相关特征通过引入谱系数 $a_{l,m}(t)$ 随时间演变的一阶自回归随机过程(即马尔科夫随机过程)来实现。

$$a_{l,m}(t + \Delta t) = e^{-\Delta t/\tau} a_{l,m}(t) + \sqrt{\frac{4\pi\sigma^2(1 - e^{-2\Delta t/\tau})}{L_{\max}(L_{\max} + 2)}} R_{l,m}(t) \quad (2)$$

式中, Δt 是特定的时间间隔,在这里选取为 GRAPES 模式的积分步长,即 600 s; τ 是随机型的失相关时间尺度; $R_{l,m}(t)$ 是满足方差为 1、均值为 0 的高斯分布的随机数。因而,基于式(1)、(2)的随机型 $\psi(\lambda, \phi, t)$ 也具有高斯分布特征,且均值为 μ 。另外,式(2)中的 σ 即为随机型 $\psi(\lambda, \phi, t)$ 的指定标准差。

为了方便用户能够根据需要设定随机型的变化范围(即给定上、下边界),并且能够通过改变随机型的概率密度函数分布使得随机型在指定范围内变化更均匀,在式(1)、(2)的基础上,继续引入拉伸函数 $S(\psi, \mu)$,得到拉伸后的随机型 $\Psi(\lambda, \phi, t)$

$$\Psi(\lambda, \phi, t) = \mu + S(\psi, \mu)(\psi(\lambda, \phi, t) - \mu) \quad (3)$$

式(3)中,拉伸函数 $S(\psi, \mu)$ 与 Li 等(2008)的研究相同

$$S(\psi, \mu) = 2 - \frac{1 - e^{\beta(\frac{\psi - \mu}{\Psi_{\max} - \mu})^2}}{1 - e^{\beta}} \quad (4)$$

式中, β 是常数,取值为 -1.27 , $\mu = (\Psi_{\max} + \Psi_{\min})/2$, Ψ_{\max}, Ψ_{\min} 分别为随机型 $\Psi(\lambda, \phi, t)$ 的最大、最小值。拉伸函数 $S(\psi, \mu)$ 的应用使得随机型的概率密度函数分布变得更宽,进而在指定范围内变化的更均匀。

3.1.2 局地动能耗散率计算

与 Charron 等(2010)的方法类似, SKEB 方案仅考虑了 GRAPES 全球模式中由数值扩散方案导致的动能耗散率。参照 Berner 等(2009)和 Charron 等(2010)的研究,使用如下的局地动能耗散率 $D_N(\lambda, \phi, \eta, t)$ 计算方案

$$D_N = -d \times \mathbf{u} \times \mathbf{u}' \quad (5)$$

式中, d 是大于 1 的常数因子, \mathbf{u} 表示不同模式层高度 η 上的水平风速, \mathbf{u}' 表示应用水平扩散方案前、后水平风速的变化。

图 1 与 2 分别为 GRAPES 模式 2013 年 5 月 13 日 00 时(世界时,下同)起报的 1—10 d 平均的整层

局地动能耗散率的空间分布以及局地动能耗散率的纬向平均剖面。可以看到,耗散率的大值区主要位于40°N与40°S附近的急流区域以及高地形地区,例如南极洲、安第斯山脉、青藏高原地区以及格林兰

岛等(图1),这与 Berner 等(2009)描述的数值耗散率大值区一致。此外,在热带地区的对流层上层以及平流层低层,也存在耗散率的大值中心(图2)。

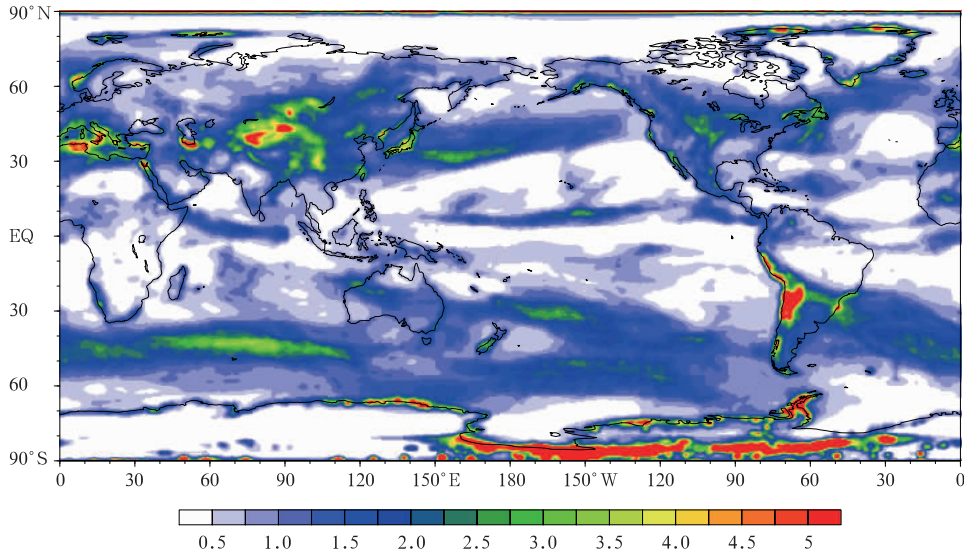


图1 1—10 d 平均整层局地动能耗散率的空间分布
(单位: W/m²; 起报时间: 2013年5月13日00时)

Fig. 1 Vertically integrated local kinetic energy dissipation rate averaged for the 1–10 d forecast initialized at 00:00 UTC 13 May 2013 (unit: W/m²)

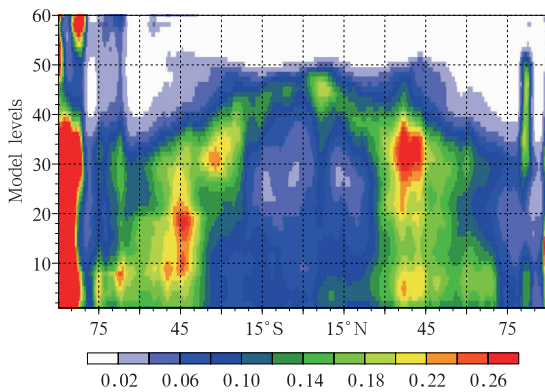


图2 1—10 d 平均局地动能耗散率的纬向平均剖面
(单位: 10⁻³ m²/s³; 起报时间:

2013年5月13日00时; 垂直高度以模式面形式给出, 模式面13、25、40、49层分别近似等同于等压面850、500、200、100 hPa)

Fig. 2 Zonally averaged local kinetic energy dissipation rate averaged for the 1–10 d forecast initialized at 00:00 UTC 13 May 2013

(units: 10⁻³ m²/s³; the height is given in model levels, where levels 13, 25, 40 and 49 correspond approximately to 850, 500, 200 and 100 hPa, respectively)

3.1.3 流函数强迫

基于式(1)–(5), 定义如下形式的流函数强迫 F_Ψ (Shutts, 2005; Charron, et al, 2010)

$$F_\Psi = \frac{\alpha \Delta x}{\Delta t} \Psi(\lambda, \phi, t) \sqrt{\Delta t D_N(\lambda, \phi, \eta, t)} \quad (6)$$

参考 Charron 等(2010)的研究, 把上述流函数强迫转化为适合 GRAPES 模式的水平风场扰动, 即在模式预报方程中引入由 S_u 、 S_v 表示的纬向风(u)、经向风(v)的倾向项, 如式(7)、(8)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{SKEB}} = S_u \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{SKEB}} = S_v \quad (8)$$

在这里, 如果加入旋转风分量扰动, 那么基于流函数与水平风场的旋转分量的关系选取 S_u 、 S_v 如式(9)、(10)

$$S_u = -\frac{1}{a} \frac{\partial F_\Psi}{\partial \phi} \quad (9)$$

$$S_v = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial F_\Psi}{\partial \lambda} \quad (10)$$

此外, 如果加入辐散风分量扰动, 那么选取 S_u 、

S_v 如式(11)、(12)

$$S_u = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial F_\Psi}{\partial \lambda} \quad (11)$$

$$S_v = \frac{1}{a} \frac{\partial F_\Psi}{\partial \phi} \quad (12)$$

本研究中,使用式(9)、(10)的旋转风分量扰动。此外,式(6)中, $\Delta x (= 50 \text{ km})$ 、 $\Delta t (= 600 \text{ s})$ 分别为模式网格长度和积分步长; α 为可调常数,用于控制扰动大小,它的取值通过一系列的敏感试验进行估计,以确保在水平风场扰动大小相对合理的情况下 SKEB 方案能够最大程度的改善集合离散度; Ψ 为由式(1)–(4)产生的随机型,并选取其最小截断波数(L_{\min})为 10、最大截断波数(L_{\max})为 80、失相关时间尺度 τ 为 6 h、均值 μ 为 0、标准差 σ 为 0.27、 Ψ_{\min} 为 -0.8 、 Ψ_{\max} 为 0.8; D_N 为局地动能耗散率,如式(5);式(9)–(12)中 a 是常数,为地球半径。

采用 6 h 的失相关时间尺度是基于 Berner 等(2009)与 Tennant 等(2011)的研究成果(SKEB 方案采用 6 h 失相关时间尺度的随机型适用于全球中期集合预报系统)。需要说明的是:不同研究中 SKEB 方案采用的随机型最小、最大截断波数有所不同。例如,Tennant 等(2011)选取随机型的最小、最大截断波数分别是 5 和 60;而 Charron 等(2010)

设置随机型的最小、最大截断波数分别是 40 和 128。文中为了不引入行星尺度扰动,并避免扰动尺度过小,选取适合 GRAPES-GEPS SKEB 方案的随机型最小、最大截断波数分别是 10 和 80。在确定随机型的最大截断波数时,固定随机型的最小截断波数为 10(以避免引入行星尺度扰动),分别选取最大截断波数为 20、40、60 与 80 进行了 4 组仅使用模式扰动 SKEB 方案的集合预报试验,考察 SKEB 方案的效果对随机型空间尺度大小的依赖性,发现最大截断波数的取值对集合平均误差的影响很小,但对集合离散度的影响较大,最大截断波数越大,集合离散度越大。所以,最终选取的适合 GRAPES-GEPS SKEB 方案的最大截断波数为 80。另外,由于 GRAPES 全球模式在极区(尤其是南极地区)附近动能耗散情况较为严重,再加上 SKEB 方案中的随机型在全球使用统一的最大截断波数(在极区因纬圈收缩,较大截断波数展开不能保证与中低纬度相同截断波数展开后的一致性),这两者均会引起极区附近计算得到的水平风场扰动很大。因此,为了保持 GRAPES 模式数值积分的稳定性,对 SKEB 方案采取了如下约束:在极区附近,不加入 u 、 v 风场扰动。

图 3 给出了在 GRPAES 模式积分第 5 天随机

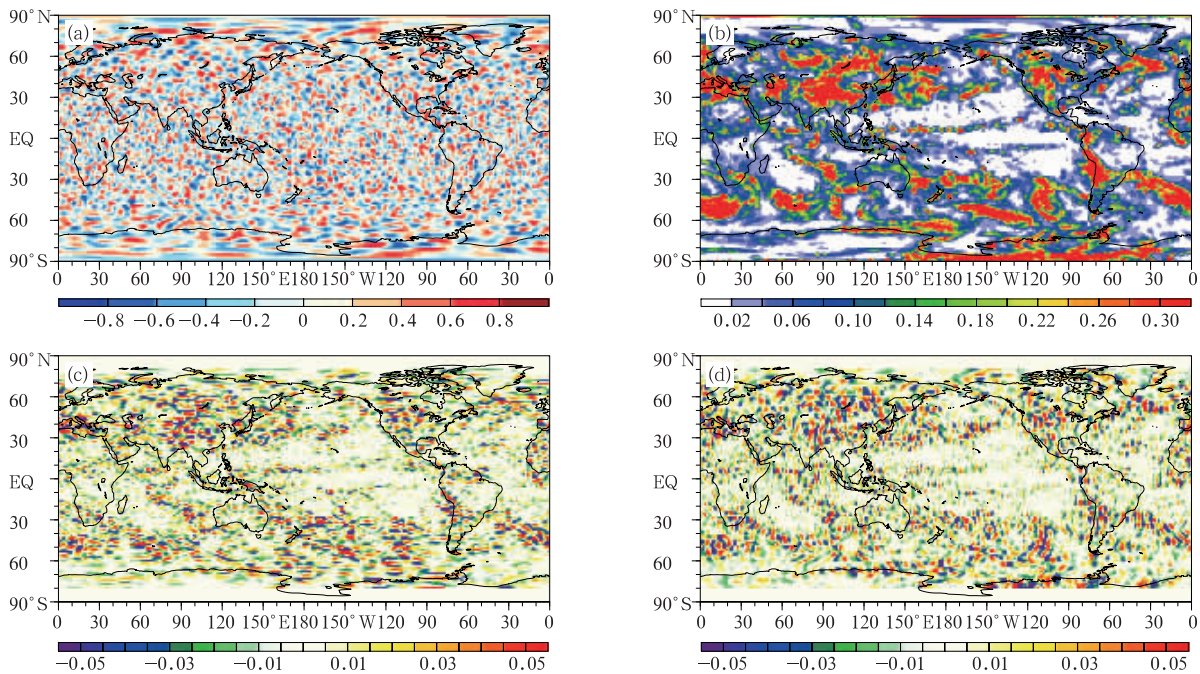


图 3 模式积分第 5 天, SKEB 方案中 500 hPa 随机型(a)、局地动能耗散率(单位: $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$; b)以及 SKEB u (c)、 v (d)风场扰动(单位: m/s)的空间分布(起报时间: 2013 年 5 月 13 日 00 时)

Fig. 3 Instantaneous stochastic pattern (a), local kinetic energy dissipation rate (unit: $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^3$; b), u (c) and v (d) wind perturbations (units: m/s) at 500 hPa in the SKEB scheme on the 5th day of the forecast (The forecast is initialized at 00:00 UTC 13 May 2013)

型、局地动能耗散率以及基于二者得到的 SKEB u 、 v 风场扰动的空间结构。可以看到, u 、 v 风场扰动的空间分布与局地动能耗散率的空间分布较为一致, 在动能耗散率大的区域, 风场扰动往往较大。

3.2 试验设计

为系统考察 SKEB 方案对 GRAPES-GEPS 的影响, 开展了 2013 年 5 月 5 日 00 时—14 日 00 时起报的每天一次连续 10 d 的集合预报试验, 预报时效为 10 d。对于每个起报时间, 进行了如下两组对比试验(表 1): (1) 仅使用初值扰动奇异向量方法的试验, 简记为 SV; (2) 使用初值扰动奇异向量方法与模式扰动 SKEB 方案的试验, 简记为 SV_SKEB。

表 1 集合预报试验方案

Table 1 The setup for different ensemble forecast experiments

试验名	初值扰动方法	模式扰动方案
SV	SV 方法	无
SV_SKEB	SV 方法	SKEB 方案

3.3 检验资料介绍

对 GRAPES-GEPS 进行集合预报检验评估时, 使用了 GRAPES 全球模式同化分析场对等压面预报要素进行检验。对于降水预报检验, 采用了中国国家气象信息中心 2400 多个国家级自动观测站点的降水观测资料。

需要指出的是, 检验评估中提到的北半球为 20° — 80° N 的北半球热带外地区, 南半球为 20° — 80° S 的南半球热带外地区, 热带地区为 20° S— 20° N。

4 SKEB 方案对 GRAPES-GEPS 的影响

下面通过对比 SV 与 SV_SKEB 两组试验的结果, 分析 SKEB 方案对 GRAPES-GEPS 的影响。主要关注 SKEB 方案对 GRAPES 全球模式大气动能谱结构的影响, 以及对 GRAPES-GEPS 预报性能的影响。着重分析以下集合预报检验指标: 集合平均误差与集合离散度关系; Talagrand 分布; 连续分级概率评分 (Continuous Rank Probability Score, CPRS); Brier 评分 (Brier Score, BS) 以及相对作用特征曲线面积 (Area under the Relative Operating Characteristics, AROC)。

4.1 大气动能谱

实际观测中, 大气动能谱的分布特征如下: 在大

尺度区域, 动能 (E) 与 κ^{-3} 成正比; 过渡到中小尺度区域, E 与 $\kappa^{-5/3}$ 成正比 (Nastrom, et al, 1985)。图 4 给出了 SV 与 SV_SKEB 两组试验中 GRAPES 模拟的 200 hPa 大气动能谱。可以看到, 尽管不使用 SKEB 方案的 GRAPES 能够较好地模拟出在大尺度区域 E 与 κ^{-3} 成正比的关系 (黑色实线), 但是过渡到中小尺度区域模式动能随波数下降过快, 动能谱的斜率较观测结果 ($-5/3$) 偏小, 对中小尺度区域动能模拟不足, 故不能体现出 E 与 $\kappa^{-5/3}$ 成正比的关系, 这一缺陷在高分辨率 GRAPES 全球模式 (0.25°) 动能谱分布中也有体现 (王亚华等, 2015)。而 SKEB 方案的使用增加了模式大气在中小尺度区域的动能 (红色实线), 在一定程度上提高了 GRAPES 对实际大气动能谱的模拟能力。

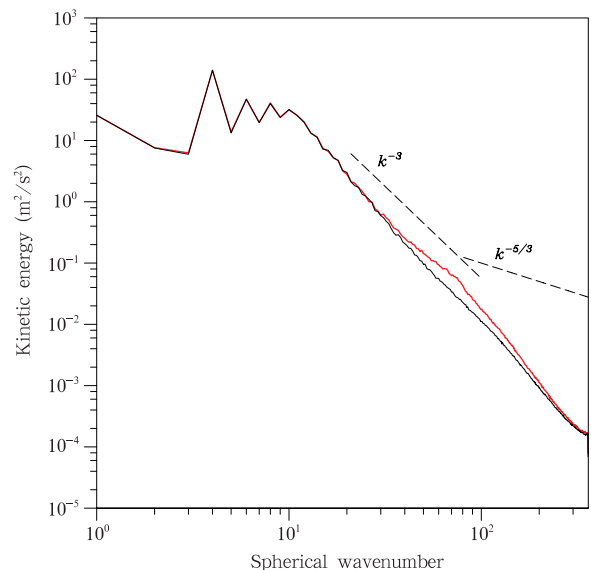


图 4 SV (黑色实线) 与 SV_SKEB (红色实线) 试验中 GRAPES 积分第 5 天 200 hPa 大气动能谱分布 (黑色虚线分别代表斜率为 -3 与 $-5/3$ 的直线)

Fig. 4 Kinetic energy spectra at 200 hPa on the 5th day of the GRAPES integration in the SV (black solid line) and SV_SKEB (red solid line) experiments (Black dashed lines denote power-law behavior with slopes of -3 and $-5/3$)

4.2 等压面要素统计检验

4.2.1 集合离散度与集合平均误差关系

对于一个可靠的集合预报系统而言, 集合离散度与集合平均误差应近似相等。图 5 给出了 SV 与 SV_SKEB 试验中北半球 850 hPa u 、 v 、温度 (T) 以

及 500 hPa 位势高度(h)的集合离散度与集合平均误差随预报时效的演变情况。可以看到,仅使用初值扰动的 GRAPES-GEPS 存在集合离散度偏小的问题(图 5 蓝线),然而 SKEB 方案的使用增加了不同变量的集合离散度,其中 u 、 v 风场预报集合离散度的增加最为明显(图 5 红线),这可能与 SKEB 方案直接对 u 、 v 风场进行扰动有关。进一步使用 t 检验法对两组试验中集合离散度的差异进行了显著性水平为 0.1 的检验。在整个预报时效内 SV_SKEB 试验中 u 、 v 风场集合离散度的增大均通过了 90% 的显著性检验(图 5a、b 中圆圈);对于温度预报而言,集合离散度仅在预报的前期与中期显著增大(图 5c 中圆圈)。两组试验中所有要素集合平均误差的差异很小,没有通过显著性检验。此外,SKEB 方案也增加了北半球地区其他等压面要素的集合离散度(图略)。因而,SKEB 方案的引入缓解了 GRAPES-GEPS 北半球地区集合离散度偏小的不合理问题,

改善了集合离散度与集合平均误差关系,提高了系统的可靠性。南半球,SKEB 方案的影响与北半球类似,这里不再赘述。由于在热带地区(图 6)没有初值扰动,SV 试验中该地区的集合离散度存在严重不足的缺陷(图 6 蓝线)。使用 SKEB 方案表征模式误差后,在整个预报时效内,该地区集合离散度显著增大(均通过了 90% 的显著性检验;图 6 圆圈);集合平均误差明显减小,而且除了位势高度之外其他变量集合平均误差的减小在大部分预报时效上均通过了 90% 的显著性检验(图 6a、b、c 中三角),热带地区集合离散度过度偏小的不合理情况得到显著改善。对于热带地区 500 hPa 以及 200 hPa 各个等压面要素而言,SKEB 方案的影响类似(图略)。SKEB 方案对 GRAPES-GEPS 集合平均误差与集合离散度关系的改进,与 Berner 等(2009)、Charron 等(2010)及 Tennant 等(2011)研究结果中 SKEB 方案的作用是类似的。

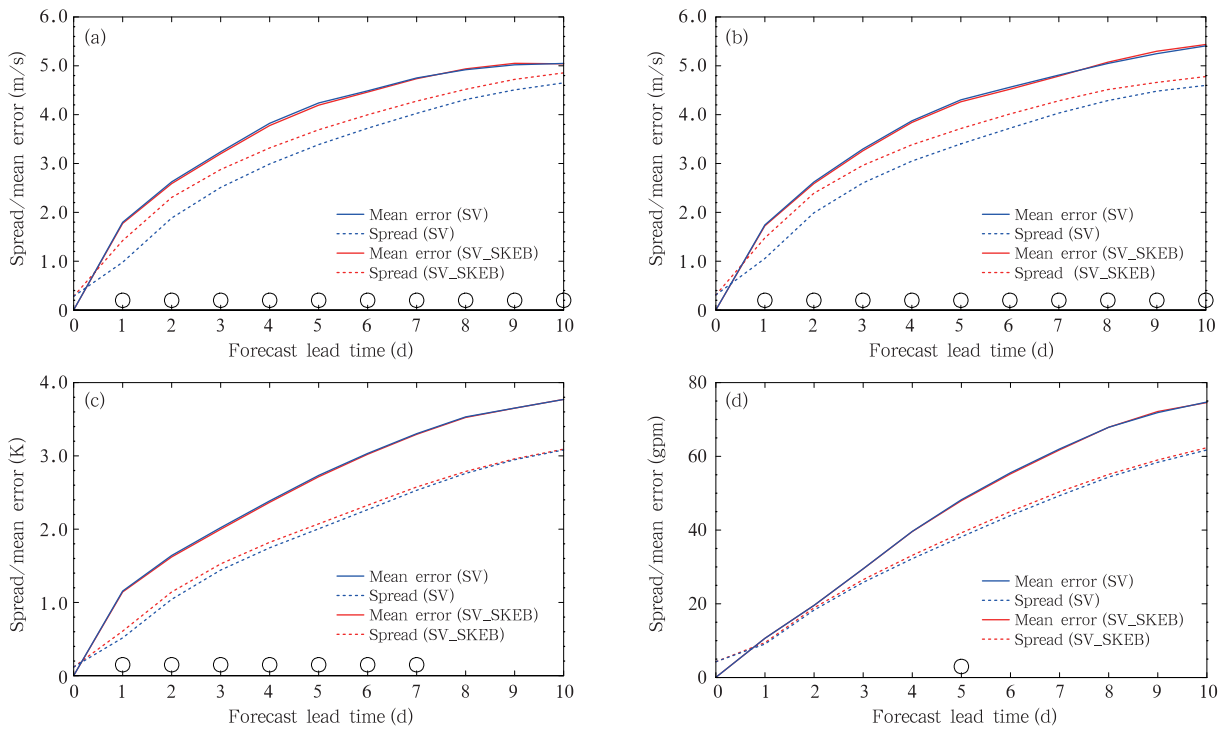


图 5 SV 与 SV_SKEB 试验中北半球 850 hPa 纬向风场(a)、经向风场(b)、温度(c)以及 500 hPa 位势高度(d)的集合离散度与集合平均误差随预报时效的演变
(底部圆圈表示 SV_SKEB 试验集合离散度显著大于 SV 试验的预报时效;
SV 与 SV_SKEB 两组试验中集合平均误差之间的差异未通过显著性检验)

Fig. 5 Spreads around the ensemble mean and root-mean-square errors of the ensemble mean averaged in the northern hemispheric extratropics for 850 hPa zonal wind (a), meridional wind (b), temperature (c), and 500 hPa geopotential height (d) in the SV and SV_SKEB experiments at different forecast lead time
(Circles across the bottom indicate forecast lead time at which the spread of the SV_SKEB experiment is statistically significantly higher than that of the SV experiment and the difference between the root-mean-square errors of the ensemble means for the SV and SV_SKEB experiments is not significant)

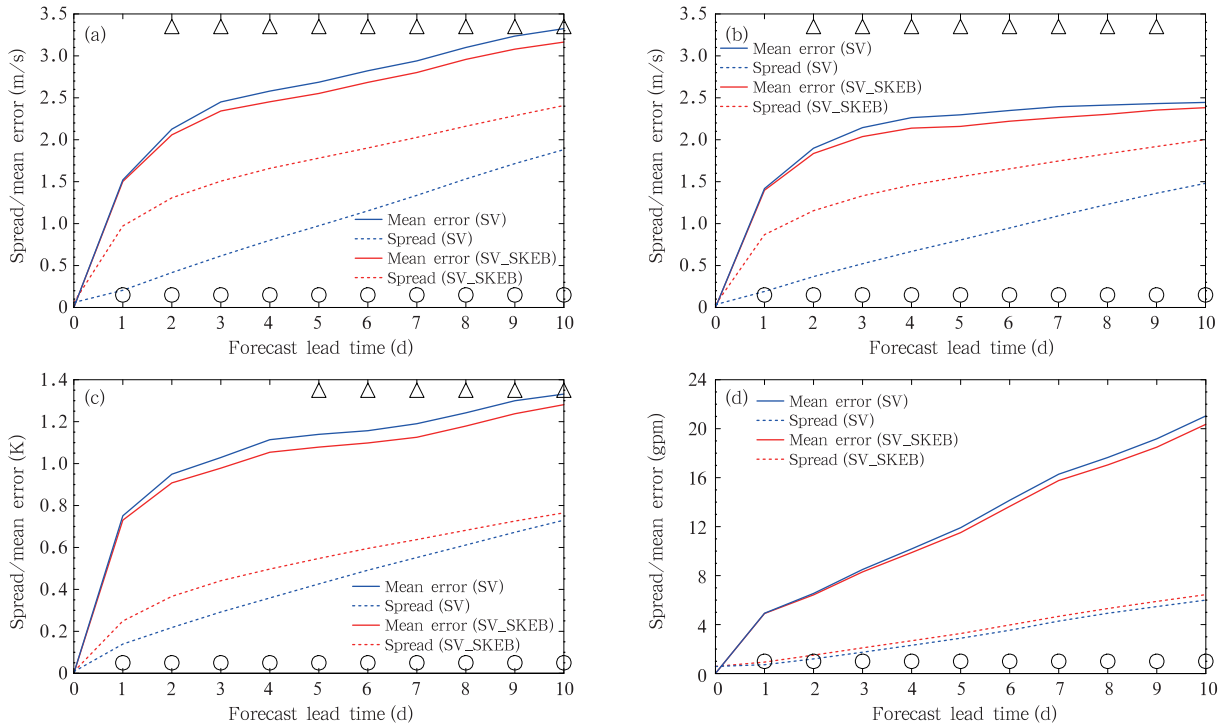


图 6 SV 与 SV_SKEB 试验中热带地区 850 hPa 纬向风场(a)、经向风场(b)、温度(c)以及位势高度(d)的集合离散度与集合平均误差随预报时效的演变
(顶部三角形表示 SV_SKEB 试验集合平均误差显著小于 SV 试验的预报时效;
底部圆圈表示 SV_SKEB 试验集合离散度显著大于 SV 试验的预报时效)

Fig. 6 Spreads around the ensemble mean and root-mean-square errors of the ensemble mean averaged in the tropics for 850 hPa zonal wind (a), meridional wind (b), temperature (c) and geopotential height (d) in the SV and SV_SKEB experiments at different forecast lead time
(Triangles across the top indicate forecast lead time at which the root-mean-square error of the ensemble mean for the SV_SKEB experiment is statistically significantly lower than that of the SV experiment. Circles across the bottom indicate forecast lead time at which the spread of the SV_SKEB experiment is statistically significantly higher than that of the SV experiment)

本研究中 GRAPES-GEPS 使用目标区域为热带外地区的 SVs 方法产生初值扰动,初值扰动主要集中在热带外地区,在热带地区无初值扰动,因而 SKEB 方案对热带地区的改进效果最为明显。Berner 等(2009)使用基于 SVs 方法产生初值扰动的 ECMWF 全球集合预报系统研究 SKEB 方案的影响时,也指出 SKEB 方案对热带地区的改进效果最为显著,与本研究得到的结论一致。

综上所述,SKEB 方案有助于增加不同地区的集合离散度,并在一定程度上减小集合平均误差,提高了 GRAPES-GEPS 的可靠性,尤其是在热带地区这种改进最为显著,使得仅使用初值扰动 SVs 方法的 GRAPES-GEPS 集合离散度偏小的问题得到明显改善。

4.2.2 Talagrand 直方图

SKEB 方案对集合离散度与集合平均误差关系的改进可从 Talagrand 直方图得到进一步地体现(图 7)。Talagrand 直方图用于评估集合成员的等同性和离散度(Talagrand, et al, 1997)。对于一个好的集合预报系统, Talagrand 直方图应服从均匀分布,也就是说观测值或者分析值应该以同样概率落在各预报成员的附近(图 7 虚线)。在 SV 试验中,北半球 850 hPa u 、 v 与温度的 Talagrand 分布呈“U”型,这表明仅使用初值扰动的 GRAPES-GEPS 存在集合离散度不足的问题(图 7a、b、c 蓝色柱)。而 500 hPa 位势高度的 Talagrand 分布呈“J”型(图 7d 蓝色柱),这说明位势高度场的预报存在系统性负偏差。使用 SKEB 方案后,不同等压面要素的

Talagrand 分布得到一定的改善, u 、 v 与温度的集合离散度有所增加(图 7a、b、c 红色柱),而且位势高度的系统性负偏差得到一定程度的改善。对于 u 、 v 与温度的 Talagrand 分布而言,在大部分集合成员盒子中两组试验之间的频率百分比差异是显著的(通过了 90% 的显著性检验,图 7a、b、c 圆圈);而位势高度的 Talagrand 分布的差异没有通过显著性检验(图 7d)。南半球,SKEB 方案对 Talagrand 分布的影响与北半球类似,这里不再赘述。热带地区,

SKEB 方案的引入明显改善了 u 、 v 与温度的 Talagrand 直方图离散度严重不足的“U”型分布特征,增大了 u 、 v 与温度的集合离散度,并且在一定程度上减小了位势高度场的系统性负偏差(图 8)。就 u 、 v 与温度的 Talagrand 分布来说,在几乎所有集合成员盒子中不同试验的频率百分比差异是显著的(通过了 90% 的显著性检验,图 8a、b、c 圆圈);而位势高度的 Talagrand 分布之间的差异仅在近一半的盒子中是显著的(图 8d)。

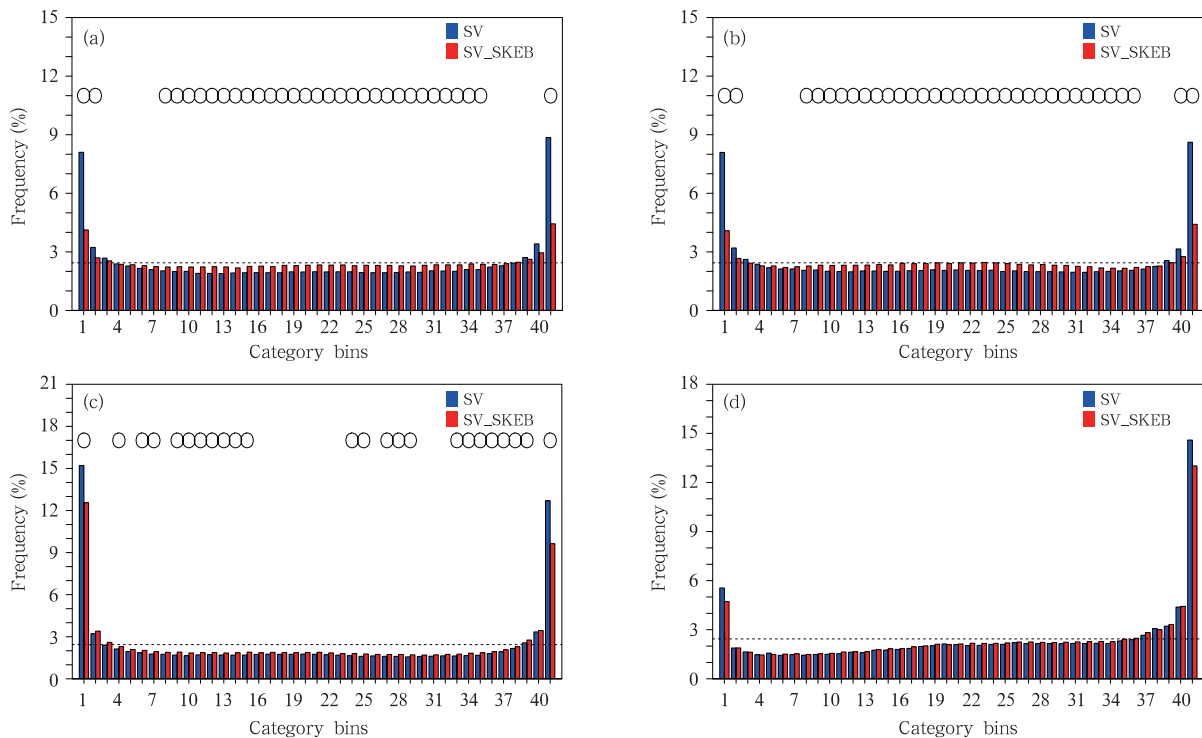


图 7 SV 与 SV_SKEB 试验中北半球 850 hPa 纬向风场(a)、经向风场(b)、
温度(c)以及 500 hPa 位势高度(d)的 Talagrand 分布

(第 3 天的预报时效;圆圈表示 SV 与 SV_SKEB 两组试验中频率百分比具有显著差异的集合成员盒子)

Fig. 7 Talagrand diagrams for 850 hPa zonal wind (a), meridional wind (b), temperature (c),
and 500 hPa geopotential height (d) in the northern hemispheric extratropics of the
3rd day forecast in the SV and SV_SKEB experiments

(Circles in the figure indicate category bins within which the frequencies of occurrences for observations
or analyses in the SV_SKEB experiment are statistically significantly different from that of the SV experiment)

4.2.3 CRPS 评分

CRPS 评分描述了观测和预报的累积概率分布函数的差异,其数值越小表明集合预报系统的概率预报技巧越高(Candille, et al, 2007)。通过对比 SV 与 SV_SKEB 两组试验在北半球、南半球以及热带地区的 CRPS 评分结果,发现在北半球和南半球区域两组试验对于不同的等压面要素的 CRPS 评分相

当,部分要素 SV_SKEB 试验的 CRPS 评分较低。对于热带地区,SV_SKEB 试验 CRPS 评分提高效果非常明显,改进效果持续在 1 d 之后的整个预报时效内,与 4.2.1 节中得到的结果类似。这里,仅以不同地区 850 hPa 温度为例对结果进行说明(图 9),SKEB 方案对于热带地区概率预报技巧的提高最为显著。

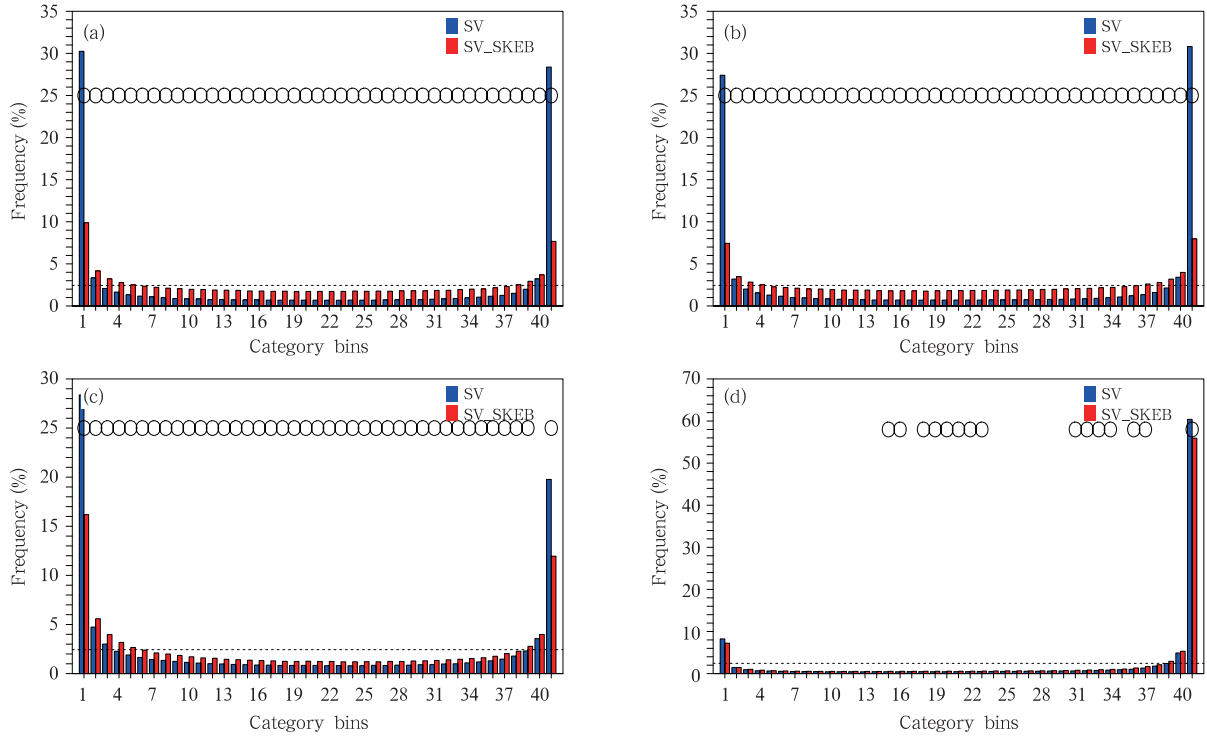


图8 SV与SV_SKEB试验中热带地区850 hPa纬向风场(a)、经向风场(b)、温度(c)及位势高度(d)的Talagrand分布

(第3天的预报时效;圆圈表示SV与SV_SKEB两组试验中频率百分比具有显著差异的集合成员盒子)

Fig. 8 Talagrand diagrams for 850 hPa zonal wind (a), meridional wind (b), temperature (c), and geopotential height (d) in the tropics of the 3rd day forecast in the SV and SV_SKEB experiments

(Circles in the figure indicate category bins within which the frequencies of occurrences for observations or analyses in the SV_SKEB experiment are statistically significantly different from that of the SV experiment)

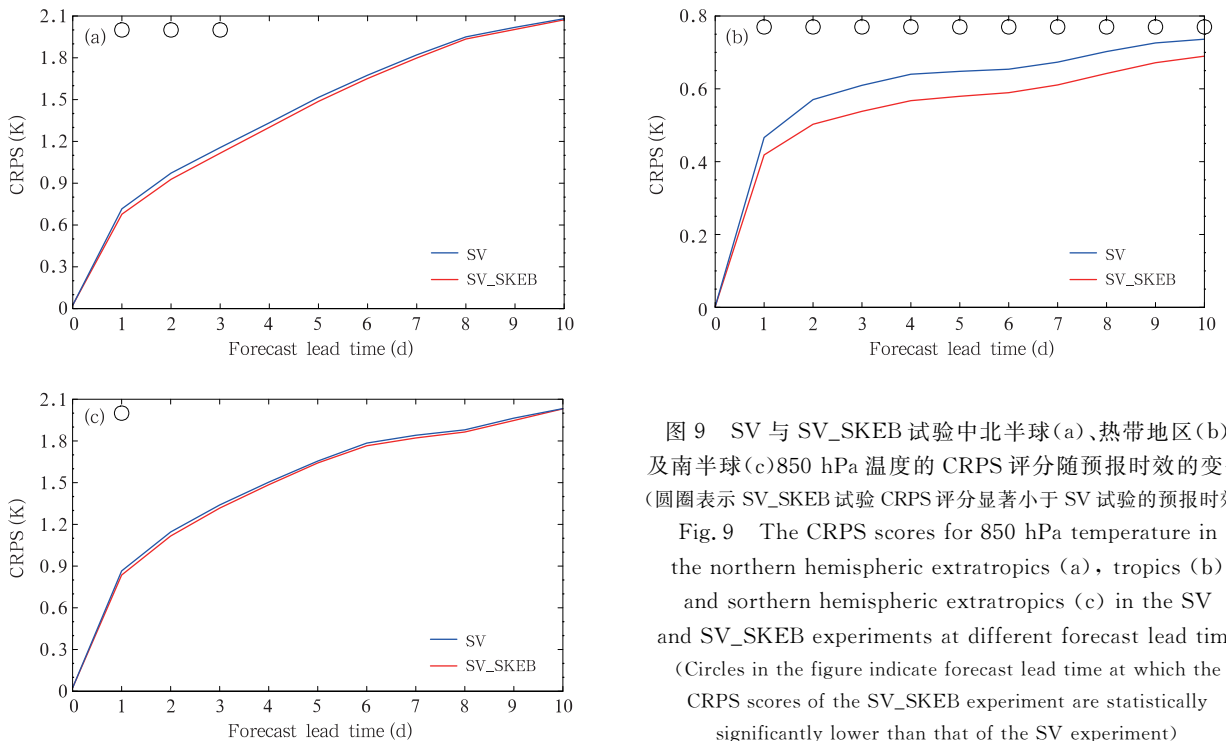


图9 SV与SV_SKEB试验中北半球(a)、热带地区(b)及南半球(c)850 hPa温度的CRPS评分随预报时效的变化(圆圈表示SV_SKEB试验CRPS评分显著小于SV试验的预报时效)

Fig. 9 The CRPS scores for 850 hPa temperature in the northern hemispheric extratropics (a), tropics (b) and southern hemispheric extratropics (c) in the SV and SV_SKEB experiments at different forecast lead time (Circles in the figure indicate forecast lead time at which the CRPS scores of the SV_SKEB experiment are statistically significantly lower than that of the SV experiment)

4.3 地面降水概率预报

在计算降水概率预报技巧评分时,使用邻近点方法将模式降水数据插值至观测站点。图 10 与 11 分别给出了两种试验方案下中国地区不同量级降水的 Brier 评分(BS)和 AROC 随预报时效的演变特征。Brier 评分是针对某种二分类事件,通过计算观测发生频率和预报概率的差异来表示集合概率预报的技巧,其数值越小表明预报技巧越高(Brier, 1950)。AROC 用于评估集合预报系统区分事件发生和不发生的能力,其数值越大说明预报技巧越高(Atger, 1999; Richardson, 2000)。可以看到,在 8 d 的预报时效内,对小雨、中雨和大雨而言,SV_SKEB

试验的 Brier 评分(AROC)小于(大于)SV 试验;对暴雨而言,两组试验的降水评分几乎一样。这说明 SKEB 方案能够改善小雨、中雨以及大雨量级降水的预报技巧,对暴雨量级降水预报几乎没有影响。其中,降水预报得到改善的可能原因是 SKEB 方案的使用改进了 GRAPES 模式对中小尺度范围大气运动的描述,有利于提高降水强度的预报。然而,SV 与 SV_SKEB 两组试验之间的降水预报技巧的差异未通过显著性检验,这可能是由于受试验时间长度所限降水事件样本较少。在今后的研究中,如果计算与存储资源允许,可通过进行更长时间的集合预报试验来进一步验证降水评分差异的显著性。

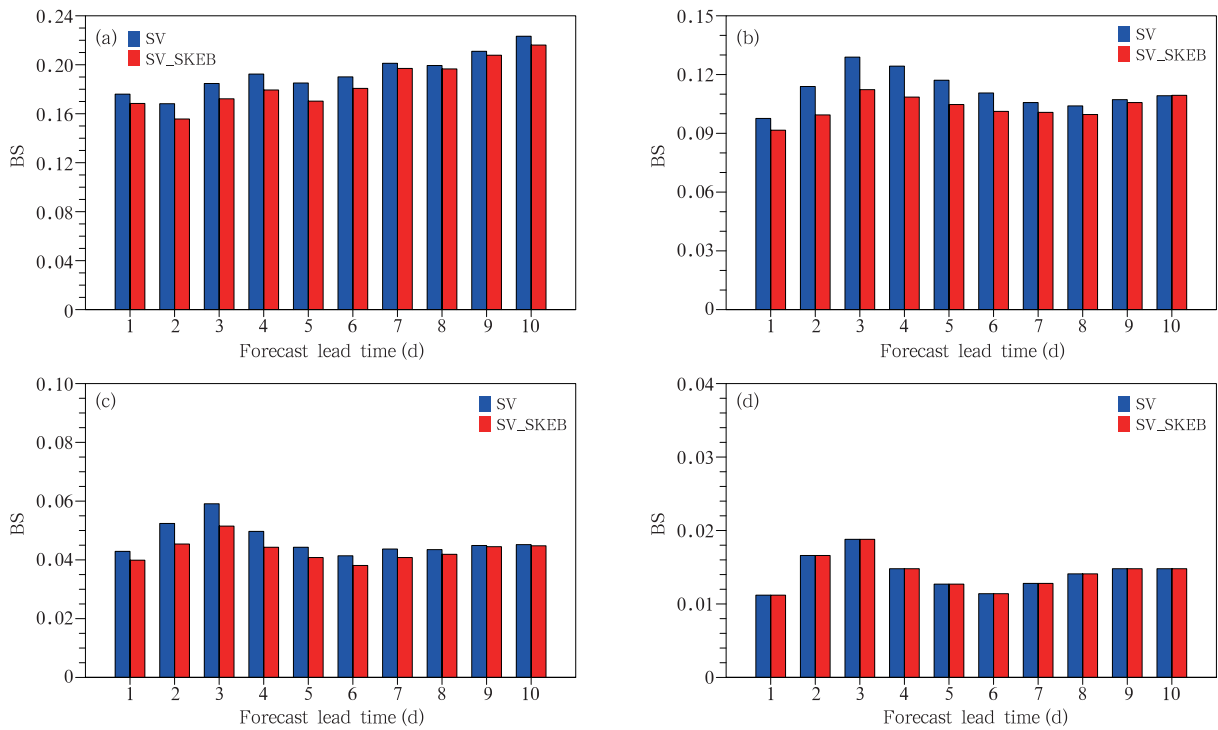


图 10 中国地区不同量级 24 h 累计降水的 Brier 评分随预报时效的演变
(a. [0.1 mm, 10 mm), b. [10 mm, 25 mm), c. [25 mm, 50 mm), d. [50 mm, ∞))

Fig. 10 The Brier scores for 24-h accumulated precipitation over China in the SV and SV_SKEB experiments at different forecast lead time for different thresholds
(a. [0.1 mm, 10 mm), b. [10 mm, 25 mm), c. [25 mm, 50 mm), d. [50 mm, ∞))

5 典型降水个例分析

由 Brier 评分与 AROC 的结果可知,SKEB 方案能够提高 GRAPES-GEPS 对中国地区小雨、中雨以及大雨量级降水的预报技巧。以 2013 年 5 月 14 日 00 时—15 日 00 时一次强降水过程为例分析

SKEB 方案对此次降水事件预报效果的影响。图 12a 是此次强降水过程观测的 24 h 累计降水分布。可以看到,强降水主要出现在湖南、江西以及湖北南部地区,最大降水量超过 100 mm。

图 12b、c 分别给出了 SV 和 SV_SKEB 两组试验预报的 24 h 最大累计降水量。可以看到,两组试

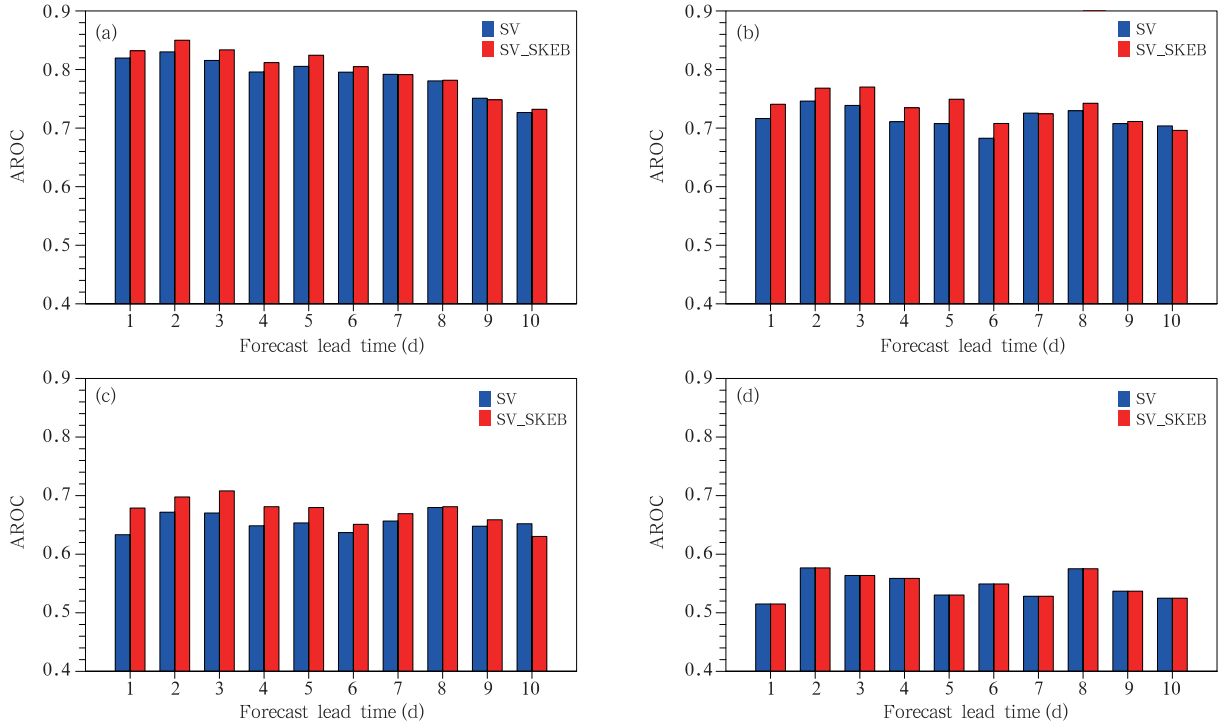


图 11 中国地区不同量级 24 h 累计降水的 AROC 随预报时效的演变
 (a. [0.1 mm, 10 mm), b. [10 mm, 25 mm), c. [25 mm, 50 mm), d. [50 mm, ∞))
 Fig. 11 AROC for 24-h accumulated precipitation over China in the SV and SV_SKEB experiments at different forecast lead time for different thresholds
 (a. [0.1 mm, 10 mm), b. [10 mm, 25 mm), c. [25 mm, 50 mm), d. [50 mm, ∞))

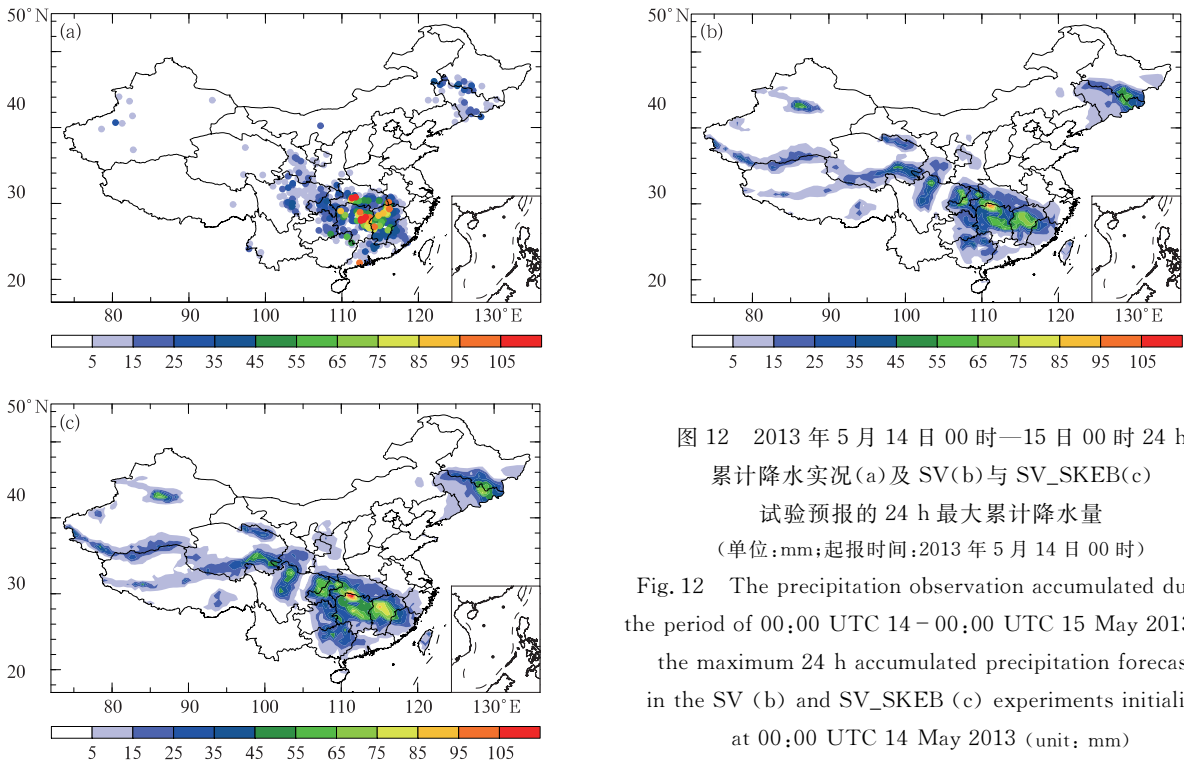


图 12 2013 年 5 月 14 日 00 时—15 日 00 时 24 h 累计降水实况(a)及 SV(b)与 SV_SKEB(c) 试验预报的 24 h 最大累计降水量 (单位: mm; 起报时间: 2013 年 5 月 14 日 00 时)
 Fig. 12 The precipitation observation accumulated during the period of 00:00 UTC 14–00:00 UTC 15 May 2013(a), the maximum 24 h accumulated precipitation forecasts in the SV (b) and SV_SKEB (c) experiments initialized at 00:00 UTC 14 May 2013 (unit: mm)

验预报的强降水落区基本一致,与观测较为接近,但是强降水落区内的降水量预报明显低于观测。然而,与 SV 试验相比,SV_SKEB 试验预报的强降水落区降水量有所增大,与观测更为接近。这说明 SKEB 方案增加了部分集合成员预报的降水量,有助于改善对强降水事件的预报。

6 总结和讨论

为了表征 GRAPES 全球模式在次网格尺度能量描述上存在的不确定性,将 SKEB 方案引入 GRAPES-GEPS 中以体现次网格尺度能量升尺度转换过程中存在的模式误差,进一步增加集合离散度,提高概率预报技巧。在使用 SVs 方法产生初值扰动的 GRAPES-GEPS 基础之上,采用具有一定时、空相关特征的随机型以及由 GRAPES 数值扩散方案引起的局地动能耗散率构造随机流函数强迫。并根据流函数与水平风速旋转分量的关系,将 SKEB 方案中的随机流函数强迫转化为适用于 GRAPE-GEPS 的水平风速扰动。通过对比使用与不使用 SKEB 方案的两组集合预报试验,从大气动能谱、集合离散度与集合平均误差关系、概率预报技巧(Talagrand 直方图、CRPS 评分)以及中国地区降水预报(Brier 评分、AROC)等客观分析评估方面,并针对一次强降水过程的个例分析,较为系统地考察了 SKEB 方案对 GRAPES-GEPS 的影响。研究结果表明:

(1)SKEB 方案的使用增加了 GRAPES 全球模式在中小尺度区域的大气动能,在一定程度上改善了 GRAPES 对实际大气动能谱的模拟能力。

(2)在 GRAPES-GEPS 中引入 SKEB 方案能够增加北半球、南半球及热带地区的位势高度、温度以及水平风场预报的集合离散度,并在一定程度上减小了集合平均误差,尤其是在热带地区这种改进最为明显,进而使得仅使用初值扰动 SVs 方法的 GRAPES-GEPS 集合离散度不足的问题得到明显改善。此外,也显著提高了 GRAPES-GEPS 对热带地区的概率预报技巧(小的 CRPS 评分)。

(3)SKEB 方案能够改善中国地区小雨、中雨及大雨量级降水的预报技巧,对暴雨量级降水预报影响较小。其中,降水预报技巧得到提高的可能原因是 SKEB 方案的使用改善了 GRAPES 对中小尺度大气运动的描绘,进而改进了降水强度的预报。

(4)针对中国地区一次强降水过程,分析了 SKEB 方案对此次降水事件预报的影响。结果表明,SKEB 方案有助于改进此次降水事件的预报,尽管对强降水落区基本没有影响,但是可以增加部分成员预报的降水量,进而提高了对强降水事件的预报能力。

值得一提的是,文中采用的 SKEB 方案仅对 GRAPES 全球模式的旋转风分量进行了强迫,实际上,还可对辐散风分量进行扰动或者同时对旋转风分量与辐散风分量进行扰动,这部分内容将在进一步的研究中加以考虑。

参考文献

- 蔡沅辰, 闵锦忠, 庄潇然. 2017. 不同随机物理扰动方案在一次暴雨集合预报中的对比研究. 高原气象, 36(2): 407-423. Cai Y C, Min J Z, Zhuang X R. 2017. Comparison of different stochastic physics perturbation schemes on a storm-scale ensemble forecast in a heavy rain event. Plateau Meteor, 36(2): 407-423 (in Chinese)
- 刘畅, 闵锦忠, 冯宇轩等. 2018. 不同模式扰动方案在风暴尺度集合预报中的对比试验研究. 气象学报, 76(4): 605-619. Liu C, Min J Z, Feng Y X, et al. 2018. Comparison of different model perturbation schemes on storm-scale ensemble forecast. Acta Meteor Sinica, 76(4): 605-619 (in Chinese)
- 刘永柱, 沈学顺, 李晓莉. 2013. 基于总能量模的 GRAPES 全球模式奇异向量扰动研究. 气象学报, 71(3): 517-526. Liu Y Z, Shen X S, Li X L. 2013. Research on the singular vector perturbation of the GRAPES global model based on the total energy norm. Acta Meteor Sinica, 71(3): 517-526 (in Chinese)
- 麻巨慧, 朱跃建, 王盘兴等. 2011. NCEP、ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报, 34(3): 370-380. Ma J H, Zhu Y J, Wang P X, et al. 2011. A review on the developments of NCEP, ECMWF and CMC global ensemble forecast system. Trans Atmos Sci, 34(3): 370-380 (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. 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 perturbationscheme in GRAPES global ensemble prediction. Acta Meteor Sinica, 66(4): 526-536 (in Chinese)
- 闵锦忠, 刘畅, 王世璋等. 2018. 随机物理倾向扰动(SPPT)在风暴尺度集合预报中的影响研究. 气象学报, 76(4): 590-604. Min J Z, Liu C, Wang S Z, et al. 2018. Impact of stochastically perturbed parameterization tendencies (SPPT) on storm-scale ensemble forecast. Acta Meteor Sinica, 76(4): 590-604 (in Chinese)
- 任志杰, 陈静, 田华. 2011. T213 全球集合预报系统物理过程随机

- 扰动方法研究. 气象, 37(9): 1049-1059. Ren Z J, Chen J, Tian H. 2011. Research on T213 ensemble prediction system stochastic physics perturbation. Meteor Mon, 37(9): 1049-1059 (in Chinese)
- 谭宁, 陈静, 田华. 2013. 两种模式随机扰动方案比较及扰动传播分析. 气象, 39(5): 543-555. Tan N, Chen J, Tian H. 2013. Comparison between two global model stochastic perturbation schemes and analysis of perturbation propagation. Meteor Mon, 39(5): 543-555 (in Chinese)
- 王亚华, 臧增亮, 潘晓滨等. 2015. 高分辨率 GRAPES-GFS 的动能谱及其转折特征分析. 气象学报, 73(5): 965-974. Wang Y H, Zang Z L, Pan X B, et al. 2015. The kinetic energy spectrum and its transition characteristics analysis of the high-resolution GRAPES-GFS. Acta Meteor Sinica, 73(5): 965-974 (in Chinese)
- 薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 383pp. Xue J S, Chen D H. 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction System GRAPES. Beijing: Science Press, 383pp (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. 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. Meteor Mon, 42(10): 1161-1175 (in Chinese)
- Atger F. 1999. The skill of ensemble prediction systems. Mon Wea Rev, 127(9): 1941-1953
- Bengtsson L, Steinheimer M, Bechtold P, et al. 2013. A stochastic parametrization for deep convection using cellular automata. Quart J Roy Meteor Soc, 139(675): 1533-1543
- Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. 2009. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system. J Atmos Sci, 66(3): 603-626
- Berner J, Ha S Y, Hacker J P, et al. 2011. Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: Stochastic versus multiphysics representations. Mon Wea Rev, 139(6): 1972-1995
- Berner J, Fossell K R, Ha S Y, et al. 2015. Increasing the skill of probabilistic forecasts: Understanding performance improvements from model-error representations. Mon Wea Rev, 143(4): 1295-1320
- Berner J, Achatz U, Batté L, et al. 2017. Stochastic parameterization: Toward a new view of weather and climate models. Bull Amer Meteor Soc, 98(3): 565-588
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. Mon Wea Rev, 129(3): 420-436
- Brier G W. 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability. Mon Wea Rev, 78(1): 1-3
- Buizza R, Palmer T N. 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. J Atmos Sci, 52(9): 1434-1456
- Buizza R, Milleer M, Palmer T N. 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 125(560): 2887-2908
- Candille G, Côté C, Houtekamer P L, et al. 2007. Verification of an ensemble prediction system against observations. Mon Wea Rev, 135(7): 2688-2699
- Charron M, Pellerin G, Spacek L, et al. 2010. Toward random sampling of model error in the Canadian ensemble prediction system. Mon Wea Rev, 138(5): 1877-1901
- Christensen H M, Moroz I M, Palmer T N. 2015. Stochastic and perturbed parameter representations of model uncertainty in convection parameterization. J Atmos Sci, 72(6): 2525-2544
- Duda J D, Wang X G, Kong F Y, et al. 2016. Impact of a stochastic kinetic energy backscatter scheme on warm season convection-allowing ensemble forecasts. Mon Wea Rev, 144(5): 1887-1908
- Hacker J P, Ha S Y, Snyder C, et al. 2011. The U. S. Air Force Weather Agency's mesoscale ensemble: Scientific description and performance results. Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr, 63(3): 625-641
- Hoffman R N, Kalnay E. 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr, 35(2): 100-118
- Houtekamer P L, Lefavre L, Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction. Mon Wea Rev, 124(6): 1225-1242
- Kober K, Craig G C. 2016. Physically based stochastic perturbations (PSP) in the boundary layer to represent uncertainty in convective initiation. J Atmos Sci, 73(7): 2893-2911
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 102(6): 409-418
- Li X L, Charron M, Spacek L, et al. 2008. A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations. Mon Wea Rev, 136(2): 443-462
- Mason P J, Thomson D J. 1992. Stochastic backscatter in large-eddy simulations of boundary layers. J Fluid Mech, 242: 51-78
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. Quart J Roy Meteor Soc, 122(529): 73-119
- Nastrom G D, Gage K S. 1985. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft. J Atmos Sci, 42(9): 950-960
- Ollinaho P, Lock S J, Leutbecher M, et al. 2017. Towards process-level representation of model uncertainties: Stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble. Quart J Roy Meteor Soc, 143(702): 408-422
- Palmer T N, Shutts G J, Hagedorn R, et al. 2005. Representing model uncertainty in weather and climate prediction. Annu Rev

- Earth Planet Sci, 33: 163-193
- Palmer T N, Buizza R, Doblas-Reyes F, et al. 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty. ECMWF Technical Memoranda, 598. Shinfield Park, Reading: ECMWF, 42pp
- Palmer T N. 2012. Towards the probabilistic Earth-system simulator: A vision for the future of climate and weather prediction. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(665): 841-861
- Plant R S, Craig G C. 2008. A stochastic parameterization for deep convection based on equilibrium statistics. *J Atmos Sci*, 65(1): 87-105
- Richardson D S. 2000. Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(563): 649-667
- Sanchez C, Williams K D, Collins M. 2016. Improved stochastic physics schemes for global weather and climate models. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(694): 147-159
- Shutts G. 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612): 3079-3102
- Talagrand O, Vautard R, Strauss B. 1997. Evaluation of probabilistic prediction Systems // Proceedings of ECMWF Workshop on Predictability. Reading, United Kingdom: ECMWF, 20-22
- Tennant W J, Shutts G J, Arribas A, et al. 2011. Using a stochastic kinetic energy backscatter scheme to improve MOGREPS probabilistic forecast skill. *Mon Wea Rev*, 139(4): 1190-1206
- Tompkins A M, Berner J. 2008. A stochastic convective approach to account for model uncertainty due to unresolved humidity variability. *J Geophys Res*, 113(D18): D18101, doi: 10.1029/2007JD009284
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(12): 2317-2330
- Wang X G, Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble Transform Kalman Filter ensemble forecast schemes. *J Atmos Sci*, 60(9): 1140-1158
- Wilks D S. 2005. Effects of stochastic parametrizations in the Lorenz '96 system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(606): 389-407
- Yonehara H, Ujiie M. 2011. A stochastic physics scheme for model uncertainties in the JMA one-week ensemble prediction system. *CAS/JSC WGNE Res Activit Atmos Ocean Modell*, 41(6): 9-10