

范宇恩,李红祺,陈静,等,2022. CMA-REPS 区域集合预报随机动能后向散射方案敏感性试验[J]. 气象,48(9):1077-1089.  
Fan Y E, Li H Q, Chen J, et al., 2022. Sensitivity experiments of a stochastic kinetic energy backscatter scheme within the CMA-REPS regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 48(9): 1077-1089 (in Chinese).

# CMA-REPS 区域集合预报随机动能 后向散射方案敏感性试验\*

范宇恩<sup>1,2</sup> 李红祺<sup>3,4</sup> 陈 静<sup>3,4</sup> 徐致真<sup>5</sup> 陈法敬<sup>3,4</sup> 邓 国<sup>3,4</sup>

1 四川省气象探测数据中心,成都 610072

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

3 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

4 灾害天气国家重点实验室,北京 100081

5 复旦大学大气与海洋科学系,上海 200438

**提 要:** 模式中常应用水平扩散项以抑制非线性计算不稳定或阻尼虚假短波,但这会导致数值模式在截断尺度附近出现小尺度动能过度耗散。为了将被过度耗散的小尺度动能补偿回模式,将随机动能后向散射扰动方法(stochastic kinetic energy backscatter, SKEB)引入 CMA-REPS 区域集合预报系统。首先基于由一阶自回归随机过程在水平方向上进行球谐函数展开得到的随机型,然后计算由数值扩散方案引起的局地动能耗散率,进而构造随机流函数强迫,并将其转化为水平风速扰动,对耗散的动能进行随机补偿。开展了 2018 年 9 月、10 月(选取 1 日、7 日、13 日、19 日、25 日)的 10 d 集合预报随机型时间及空间尺度敏感性试验,并对试验结果进行评估。获得如下结论:在 CMA-REPS 区域集合预报中应用 SKEB 方案,可在一定程度上补偿过度耗散的小尺度动能,进而改善了模式对实际大气动能谱的模拟能力。就集合预报技巧改进而言,SKEB 方案可以显著改善区域模式水平风场  $U$ 、 $V$  的离散度,同时水平风场、温度等要素连续分级概率评分(CRPS)和离群值评分均获得改善。对 SKEB 方案开展的 6 个时间尺度(失相关时间尺度  $\tau$  选取 1、3、6、9、12、15 h)和 6 个空间相关尺度(最大截断波数  $L_{\max}$  选取 80、100、120、160、200、240)敏感性试验结果表明,12 h 失相关时间尺度和最大截断波数为 240 空间相关尺度的集合概率预报技巧更优。结论证明 SKEB 方案可以补偿在截断尺度耗散的小尺度动能,有效提高集合预报技巧。

**关键词:** 区域集合预报,随机动能后向散射扰动方法,失相关时间尺度,空间相关尺度

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.051201

## Sensitivity Experiments of a Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme Within the CMA-REPS Regional Ensemble Prediction System

FAN Yuen<sup>1,2</sup> LI Hongqi<sup>3,4</sup> CHEN Jing<sup>3,4</sup> XU Zhizhen<sup>5</sup> CHEN Fajing<sup>3,4</sup> DENG Guo<sup>3,4</sup>

1 Sichuan Meteorological Observation Data Centre, Chengdu 610072

2 Sichuan Key Laboratory of Rainstorm, Drought and Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072

3 Centre for Earth System Modeling and Prediction of CMA (CEMC), Beijing 100081

4 State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Beijing 100081

5 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

**Abstract:** The horizontal diffusion term is often used in the model to suppress nonlinear calculation instability or dampen of false short waves, but this will cause excessive dissipation of small-scale kinetic energy

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507405)资助

2021 年 7 月 14 日收稿; 2022 年 5 月 5 日收修定稿

作者简介:范宇恩,主要从事集合预报研究. E-mail: 465618497@qq.com

通讯作者:李红祺,主要从事集合预报研究. E-mail: lihongqi@cma.gov.cn

in the numerical model near the truncation scale. To compensate the excessively dissipated small-scale kinetic energy back to the model, a stochastic kinetic energy backscatter (SKEB) method is introduced into the CMA-REPS regional ensemble prediction system. First, based on the random field obtained in the first-order autoregressive random process in the horizontal direction expanding the spherical harmonic function we calculate the local kinetic energy dissipation rate caused by numerical diffusion scheme. Then, we construct the random flow function forcing, transform it into horizontal wind speed disturbance, and make random compensation for the dissipated kinetic energy. We carried out a 10 d ensemble prediction test and a randomized time and space scale sensitivity test in September and October 2018 (choose 1st, 7th, 13th, 19th, and 25th), and evaluated the test results here. The main conclusions of the research work are as follows. By comparing the ensemble prediction results of the test using the SKEB scheme and the test without the SKEB scheme, we see that the use of the SKEB scheme can increase the kinetic energy spectrum of the CMA-REPS regional model in the small scale region, improving the CMA-REPS ensemble prediction system to the actual atmosphere to some extent. The introduction of SKEB scheme in regional ensemble prediction can significantly improve the spread of  $U$  and  $V$  in horizontal wind field of regional model. The SKEB program has improved the forecasting skills to a certain extent, such as reducing the CRPS scores of the horizontal wind fields  $U$  and  $V$ , and also reducing the outlier scores of the horizontal wind field, temperature and 10 m wind speed. The sensitivity tests based on the SKEB method for six time scales of random pattern (1, 3, 6, 9, 12, 15 h of the time series  $\tau$ ) and five spatial correlation scales (the maximum cutoff wave number  $L_{\max}$  is selected as 80, 100, 120, 160, 200, 240) show that the ensemble prediction is sensitive to the six time scales of the stochastic model of the SKEB method. And the experiment whose time scale is set to 12 h and the maximum truncation wave number is set to 240 show the best performance. Therefore, we can draw the conclusion that the SKEB scheme can compensate for the small-scale kinetic energy dissipated at the truncated scale, and effectively improve forecasting skills.

**Key words:** regional ensemble prediction, stochastic kinetic energy backscatter (SKEB), time scale of random patten, spatial correlation scale

## 引 言

大气运动是具有混沌特性的非线性动力系统,因此初始条件或模式的微小误差会使得单一确定性数值预报模式存在不确定性(Lorenz, 1965), Epstein(1969)和 Leith(1974)为了解决这种不确定性而提出了集合预报的概念。集合预报通过一定的数学方法获得在一定初值误差范围内的初值集合,对每个初值积分得到一组预报,进而估计数值预报不确定性。这种方法使确定性预报转变为概率预报,使得天气预报更加可靠,因此它是数值预报未来演变发展的一个重要方向。

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。因为只依靠初值扰动技术会使集合预报存在一些不足:集合成员不够发散;集合预报系统可靠性不足;不能表现出在次

网格尺度物理过程参数化所造成的不确定性等,因此 Palmer et al(2005)认为模式扰动技术可以弥补现有的初值扰动技术的缺点。而现有模式扰动技术可分为多模式组合法、多物理过程组合法和随机物理扰动法。其中,随机物理扰动法是一种更为合理且复杂的模式扰动方法。随机物理扰动法在模式的某些参数值或倾向项、扩散项上引入一个随机过程或因子对其改变,以体现模式的不确定性。它是目前国际上集合预报模式扰动技术研究的重要方向(Buizza et al, 1999; Shutts, 2005; Jankov et al, 2017)。

数值模式中常应用水平扩散项以抑制非线性计算不稳定或阻尼虚假短波,但这会导致数值模式在截断尺度附近出现小尺度动能过度耗散,如果能通过一种方案将被过度耗散的小尺度动能补偿回模式,则有可能提高集合预报质量。为此,国外学者对此做出一些研究,并取得了较好的效果, Shutts (2005)首次将随机动能后向散射扰动(stochastic

kinetic energy backscatter, SKEB) 应用于集合预报, 利用具有一定时空相关特征的随机型以及局地动能耗散率, 在模式预报方程中引入随机流函数强迫和温度强迫, 对扩散过程、重力波阻和深对流等参数化方案中存在的能量耗散进行补偿, 结果表明, SKEB 不仅增加了集合预报系统的离散度, 并提高了概率预报技巧。Berner et al(2009)对 SKEB 方法中随机型进行改进, 随机型基于水平方向上的球谐函数展开, 并使用一阶自回归过程(马尔科夫随机过程)进行谱系数随时间的演变。由这种方法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。Charron et al(2010)和 Tennant et al(2011)也在其研究中加入 SKEB 方案, 引入了可调整的时空相关特征的随即型, 取得较好的效果。

但是, 目前国内应用较多的还是多物理过程组合法, 对于 SKEB 模式扰动方法的研究较少。陈静等(2003)分析了不同积云对流参数化方案对华南暖区暴雨数值预报的不确定性影响, 进行了集合预报试验, 并证明了多物理参数化方案组合法能够反映华南暴雨预报的不确定性, 具有较高应用价值。谭燕和陈德辉(2007)和张涵斌等(2014)基于 CMA-REPS 区域集合预报进行试验, 证明了多物理参数化方案组合法能够提高集合预报效果。而在随机参数化方案的研究中, 袁月等(2016)基于 CMA-REPS 区域集合预报进行试验, 引入随机扰动参数化倾向方案(stochastically perturbed parameterization tendencies, SPPT), 其研究表明 SPPT 方法能有效提高集合预报离散度和概率预报技巧。王明欢等(2021)和王婧卓等(2021)在其相关研究中, 均在区域集合预报系统中引入 SPPT 方案作为模式扰动技术。除了常见的多物理过程组合法和 SPPT 方法以外, 不少学者在区域集合预报的参数化方案中引入了随机参数扰动 SPP 方法, 也取得了较好的效果(徐致真等, 2019; 陈雨潇等, 2020; 熊洁等, 2021)。

国内针对 SKEB 方案也展开了研究, 彭飞等(2019)将 SKEB 方案引入 CMA 的全球集合预报, 结果表明 SKEB 方案提高了全球集合预报的概率预报技巧。彭飞等(2020)发现联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时, 扰动对误差的描述能力最好。张涵斌等(2019)发展了一种多物理过程组合与 SKEB 相结合的混合模式扰动方法, 结果表明 SKEB 方法及其基础上建立的混合模式扰动方法具有较好的应用前景。

为了探究 SKEB 方案是否能提高 CMA-REPS 区域集合预报的质量, 本文将过度耗散的小尺度动能补偿回模式, 研究 SKEB 模式扰动方法对 CMA-REPS 区域集合预报扰动质量和整体预报性能的影响, 并开展随机型时间及空间尺度敏感性试验, 为改进 CMA-REPS 区域集合预报的预报质量提供依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 CMA-REPS 区域集合预报模式简介

本文采用 CMA-REPS 区域集合预报系统, 系统的参数配置如表 1 所示。模式的水平分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 模式积分步长为 60 s, 水平格点数  $751 \times 501$ , 垂直坐标采用地形追随高度坐标, 垂直层次为 51 层, 集合预报成员数为 14 个集合扰动成员和 1 个控制预报成员, 共 15 个集合成员, 模式的初值扰动采用动力降尺度方法, 初值扰动和侧边界扰动由中国气象局数值预报中心 T639 全球集合预报提供。集合预报试验检验所需要的等压面要素纬向风  $U$ 、经向风  $V$ 、温度  $T$ 、高度  $H$  来自区域模式的同化分析场。

表 1 CMA-REPS 区域集合预报系统参数配置

Table 1 Parameter configuration of CMA-REPS

regional ensemble prediction system	
参数项	参数配置
模式	CMA-REPS 4.3
水平分辨率	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$
垂直层次	51 层
初值扰动	T639 全球集合预报动力降尺度
侧边界扰动	T639 全球集合预报动力降尺度
模式区域	$15^\circ \sim 65^\circ \text{N}, 70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$
集合成员数	14 个+1 个
预报时效	72 h

### 1.2 SKEB 方法原理及算法设计

#### 1.2.1 随机型计算方法

本文的 SKEB 方法的随机型是参照 Li et al (2008)提出的随机型产生方案, 其理论基础是对基于一阶自回归随机过程(即一阶马尔科夫链随机过程)在水平方向上进行球谐函数展开, 并定义随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$ , 如式(1)所示:

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

式中: 变量  $\lambda, \phi, t$  分别表示经度、纬度、时间,  $\mu$  表示

平均值。 $Y_l^m(\lambda, \phi)$  表示球谐函数,  $a_{l,m}(t)$  是时间相关的谱系数,  $m, l$  分别表示纬向波数和总波数,  $L_{\min}, L_{\max}$  分别表示随机型的最小、最大截断波数。谱系数  $a_{l,m}(t)$  的演变是通过一阶自回归随机过程(即马尔科夫随机过程)来实现时间相关, 如式(2)所示:

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

式中:  $\Delta t$  为 CMA-REPS 模式的积分步长, 即 60 s;  $\tau$  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。因此, 式(1)中的随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$  也具有高斯分布特征,  $\sigma$  是随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$  的标准差。

为了控制随机型的变化范围, 在式(1)和式(2)中引入拉伸函数  $S(\psi, \mu)$ , 得到随机型  $\Psi(\lambda, \phi, t)$ , 如式(3)所示:

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

本文采用的拉伸函数  $S(\psi, \mu)$  参考了 Li et al(2008) 和袁月等(2016)使用的拉伸函数:

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

式中:  $\beta$  是常数, 这里取经验值 1.37。  $\mu = (\Psi_{\min} + \Psi_{\max})/2$ , 其中  $\Psi_{\min}, \Psi_{\max}$  分别随机型  $\Psi(\lambda, \phi, t)$  的最小值、最大值。引入拉伸函数是为了能设定变化范围, 拉伸后的随机型  $\Psi(\lambda, \phi, t)$  相比于未拉伸前的随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$  在指定范围内变化更为均匀。

### 1.2.2 局地动能耗散率计算方法

Berner et al(2009) 研究认为数值扩散方案导致的动能耗散足以表示动能总耗散, 因此本文参照 Charron et al(2010) 的研究, 只考虑 CMA-REPS 区域模式中由数值扩散方案导致的动能耗散, 动能耗散率的计算公式为:

$$D = \sqrt{(u\Delta u)^2 + (v\Delta v)^2} \quad (5)$$

式中:  $D$  为动能耗散率,  $u, v$  为数值扩散方案前的风场,  $\Delta u, \Delta v$  为数值扩散方案前后风场的差值。图 1 展示了 CMA-REPS 区域模式 2018 年 10 月 25 日预报 72 h 的局地动能耗散率的空间分布以及纬向平均剖面。

由图 1a 可见, 在水平方向上, 300 hPa 的动能耗散率的大值区主要分布于青藏高原南部、四川西部地区, 而在 500 hPa(图 1b), 大值区主要分布于青藏高原南部; 在垂直方向上(图 1c), 动能耗散率大值区主要在 30°N 的 300~200 hPa, 对流层低层的 50°N 附近同样存在明显大值区。

### 1.2.3 流函数强迫扰动设计

参照 Shutts(2005) 与 Charron et al(2010) 的研究, 本文将流函数强迫  $F_{\Psi}$  定义为:

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

式中:  $\Delta x$  代表网格距, 取为模式的水平分辨率 10 km,  $\Delta t$  取值为 CMA-REPS 模式的积分步长, 即 60 s。  $\alpha$  为可调常数, 用于控制扰动大小,  $\eta$  为表示为高度。

为了将流函数强迫转化为适合 CMA-REPS 区域集合预报模式的水平风场扰动, 即在模式的预报方程中引入由  $S_u, S_v$  表示的倾向项:

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

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

如果加入旋转风分量扰动, 基于流函数与水平风场的旋转分量之间的关系, 由式(7)和式(8)演变得到的旋转风分量扰动:

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

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

此外, 如果加入辐散风分量扰动,  $S_u, S_v$  表示为:

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

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

式中  $a$  为地球半径。在本文中, 采用的是式(9)和式(10)的旋转风分量扰动。

## 2 SKEB 随机型时间尺度敏感性试验

### 2.1 试验方案设计

根据国外学者研究进展可知: 不同学者引入的 SKEB 方案采用的随机型有所差异。例如, Charron et al(2010) 使用的失相关时间尺度  $\tau$  为 3 h; Tennant et al(2011) 使用 SKEB 方案的随机型的失相关时间尺度  $\tau$  为 6 h; 不同的  $\tau$  值会对集合预报系统性能的影响是不同的,  $\tau$  值越大, 意味两个时次之间随机场相关性就大, 随时间变化频率就越低。因此, 本文将对 SKEB 方案的随机型  $\Psi(\lambda, \phi, t)$  的失相关时间尺度  $\tau$  进行敏感性试验, 选取最适用于 CMA-REPS 的 SKEB 方案的参数, 并为 CMA-REPS 的模式扰动技术升级提供科学依据。

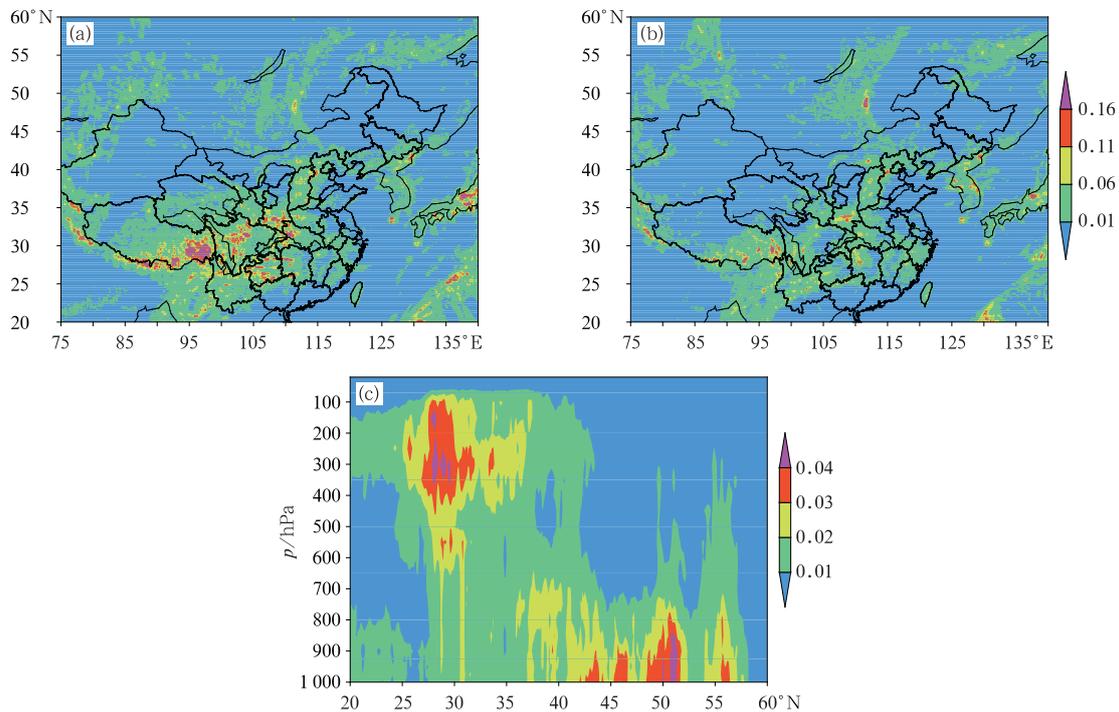


图 1 CMA-REPS 区域模式 2018 年 10 月 25 日预报 72 h 的局地动能耗散率分布  
(a)300 hPa,(b)500 hPa,(c)纬向平均剖面

Fig. 1 Distribution of 72 h local kinetic energy dissipation rate predicted by CMA-RPES regional model on 25 October 2018  
(a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) zonal average profile

本文随机动能后向散射随机型敏感性试验中,首先对随机型  $\Psi(\lambda, \phi, t)$  的失相关时间尺度  $\tau$  选取六组不同的取值,以此开展包括控制试验共七组集合预报试验,以期找出最适用于 CMA-REPS 的参数, SKEB 方案差异的具体细节详见表 2。控制试验不采用 SKEB 方案,试验名为 NOSKEB。七组试验的初值扰动和侧边界扰动均来自中国气象局数值预报中心 T639 全球集合预报统。试验时段为 2018 年 9 月、10 月分别选取 1 日、7 日、13 日、19 日、25 日的总计 10 d 集合预报试验,预报时效为 72 h。

表 2 SKEB 方案随机型时间尺度参数敏感性试验设计  
Table 2 Sensitivity test design of stochastic time-scale parameters for SKEB scheme

试验名	SKEB 方案试验描述
NOSKEB	无
SKEB_1 h	$\tau=1$ h
SKEB_3 h	$\tau=3$ h
SKEB_6 h	$\tau=6$ h
SKEB_9 h	$\tau=9$ h
SKEB_12 h	$\tau=12$ h
SKEB_15 h	$\tau=15$ h

## 2.2 检验结果

### 2.2.1 大气动能谱

大量观测事实分析表明在对流层和平流层底部,大气动能谱具有如下的分布特征:在大尺度区域动能谱与波数的关系满足  $E \propto k^{-3}$  关系,过度到中小尺度区域表现为  $E \propto k^{-5/3}$ ,且这种特征不随纬度、高度和季节变化(Nastrom et al, 1984)。因此,将模式的动能谱分析特征与实际大气动能谱分布规律进行定量分析比较,可以有效地评估预报模式的预报性能。图 2 给出了 SKEB\_12 h 与 NOSKEB 两组方案分别在 24、48、72 h 预报时效的 10 d 试验平均的大气动能谱分布。

图 2a 中,横轴底部是使用了归一化波数,顶部是波长,纵轴是动能谱,在大尺度区域中, SKEB\_12 h 和 NOSKEB 较为重合,但是过渡到中小尺度动能谱随波数下降过快,动能谱的斜率较观测结果 ( $k^{-5/3}$ ) 偏小,对中小尺度区域动能谱模拟不足,故不能体现出动能谱与波数  $k^{-5/3}$  成正比的关系。而 SKEB\_12 h 方案的动能谱在中小尺度区域都明显高于 NOSKEB 方案,且更加靠近观测结果 ( $k^{-5/3}$ )。这表明 SKEB\_12 h 方案能够在一定程度上改善了 CMA-REPS 区域模

式在中小尺度区域对实际大气动能谱的模拟能力。

### 2.2.2 集合离散度和 RMSE

对于一个可靠的集合预报系统而言,理论上集合离散度与均方根误差(RMSE)保持一致,但在实

际的集合预报系统中,离散度不够发散。因此,离散度应该保证足够的大,以至于预报集合能包含大气真值。

图 3a~3c 是各个层次的纬向风的离散度和均

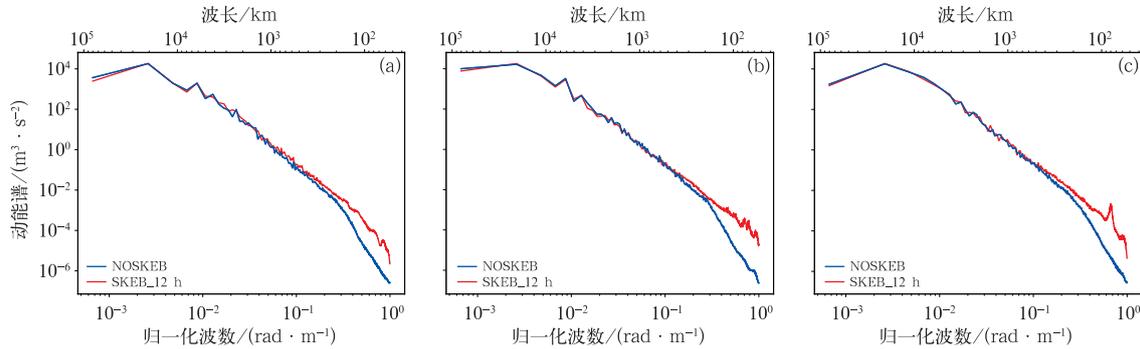


图 2 SKEB\_12 h 方案与 NOSKEB 方案的 2018 年 9 月和 10 月的 1 日、7 日、13 日、19 日、25 日(共 10 d)平均的大气动能谱分布 (a)24 h, (b)48 h, (c)72 h

Fig. 2 The 10 d average atmosphere dynamic energy spectral distribution of the entire layer in September and October 2018 in SKEB\_12 h test and NOSKEB test (a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h

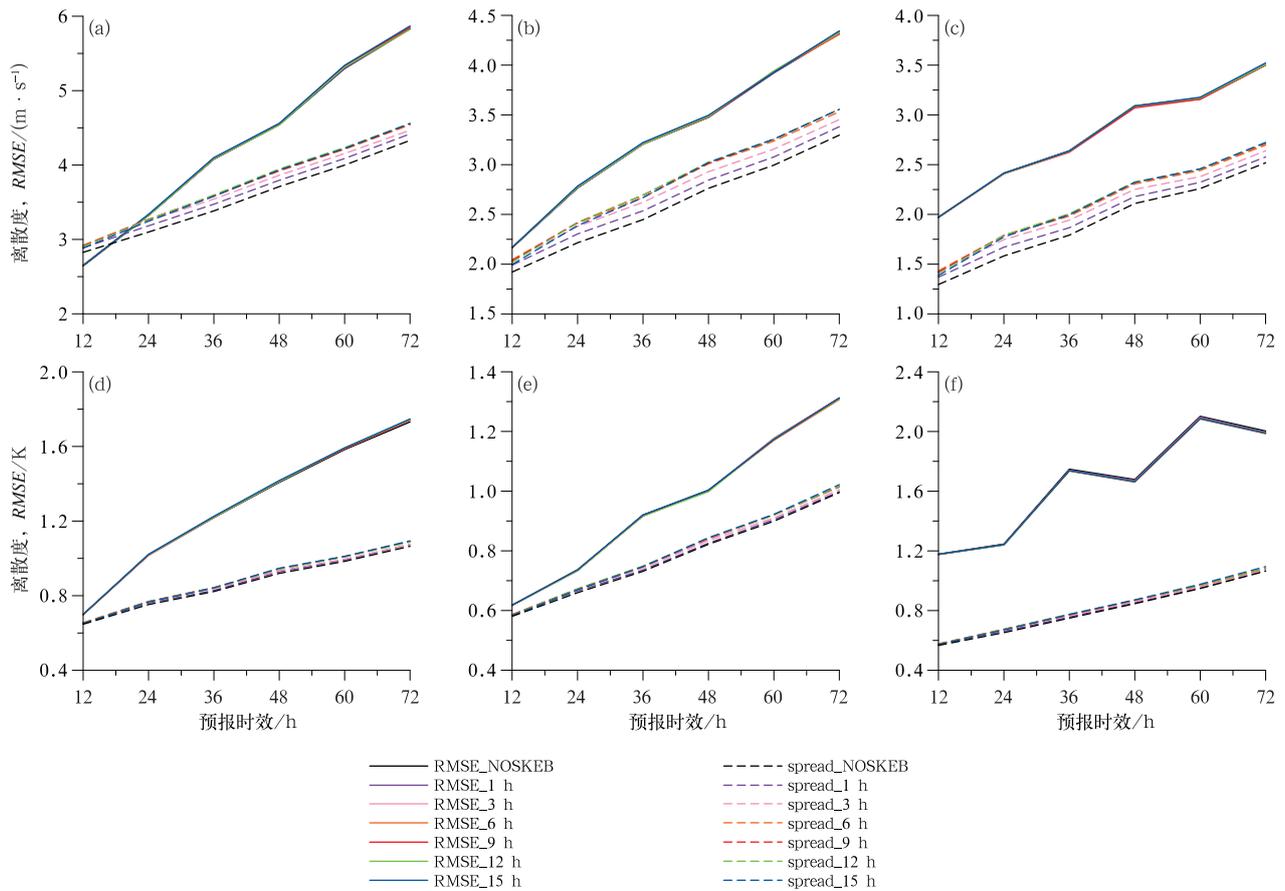


图 3 时间尺度敏感性试验结果(a,b,c)U, (d,e,f)T 的离散度和均方根误差变化特征随预报时效演变 (a,d)250 hPa, (b,e)500 hPa, (c,f)850 hPa

Fig. 3 The spread and root mean square error of (a, b, c) U and (d, e, f) T of the time-scale sensitivity test result as a function of forecast lead time (a, d) 250 hPa, (b, e) 500 hPa, (c, f) 850 hPa

方根误差变化特征随预报时效的演变,由图可见,七组试验的 RMSE 随着预报时效的演变基本保持一致,但是 250 hPa 和 500 hPa 的 SKEB\_12 h 方案的 RMSE 略低于 NOSKEB 控制预报,低层 850 hPa 中, SKEB\_9 h 方案的 RMSE 较低。与此同时,引入 SKEB 方案的试验组都提高了离散度,其中 SKEB\_12 h 方案的离散度是七组试验中最高的;综上所述,失相关时间尺度  $\tau$  取值为 12 h 时, SKEB\_12 h 方案构造的模式扰动相较于 NOSKEB 方案能提高集合预报质量;对于温度(图 3d~3f),在 250 hPa 和 500 hPa 的,七组试验的 RMSE 随着预报时效的演变基本保持一致,在低层 850 hPa,引入 SKEB 方案的 RMSE 低于控制预报,其中 SKEB\_9 h 的效果较好, SKEB\_12 h 和 SKEB\_15 h 次之。离散度方面,所有引入 SKEB 方案的试验组都提高了离散度,且 SKEB\_12 h 方案和 SKEB\_15 h 方案的离散度是七组试验中较高的,但是对温度的离散度改进没有纬向风的离散度提升明显,这与 SKEB 方案没有对温度的耗散量进行补偿有关。

综上所述,引入 SKEB 方法能够有效提高离散

度,提高集合预报质量,在时间尺度敏感性试验中,且 SKEB\_12 h 方案的对集合预报技巧的改善效果最好。

图 4a 和 4b 分别给出 NOSKEB 和 SKEB\_12 h 方案 10 d 试验结果在 72 h 的 500 hPa 纬向风离散度水平分布,为了比较两者的差异,从图 4c 可知, SKEB\_12 h 方案提升离散度的主要区域为深红区域,降低离散度的区域为蓝色区域,而图 4c 中大部分区域都为红色区域,这说明 SKEB\_12 h 方案能对 CMA-REPS 区域模式提升较多离散度。

### 2.2.3 连续分级概率评分

连续分级概率评分(CRPS)能够定量比较预报累计分布概率与观测累计分布概率差异,能够衡量概率预报性能,CRPS 值越小表示集合预报系统的概率预报性能越好。图 5 是控制试验七组试验的纬向风和温度的 CRPS 评分随预报时效演变,对于纬向风(图 5a~5c),七组试验的 CRPS 值在高层 250 hPa 和 500 hPa 中, SKEB\_12 h 的值较低且低于控制预报 NOSKEB;而在低层 850 hPa 纬向风, SKEB\_9 h 的 CRPS 评分较低。而对于温度

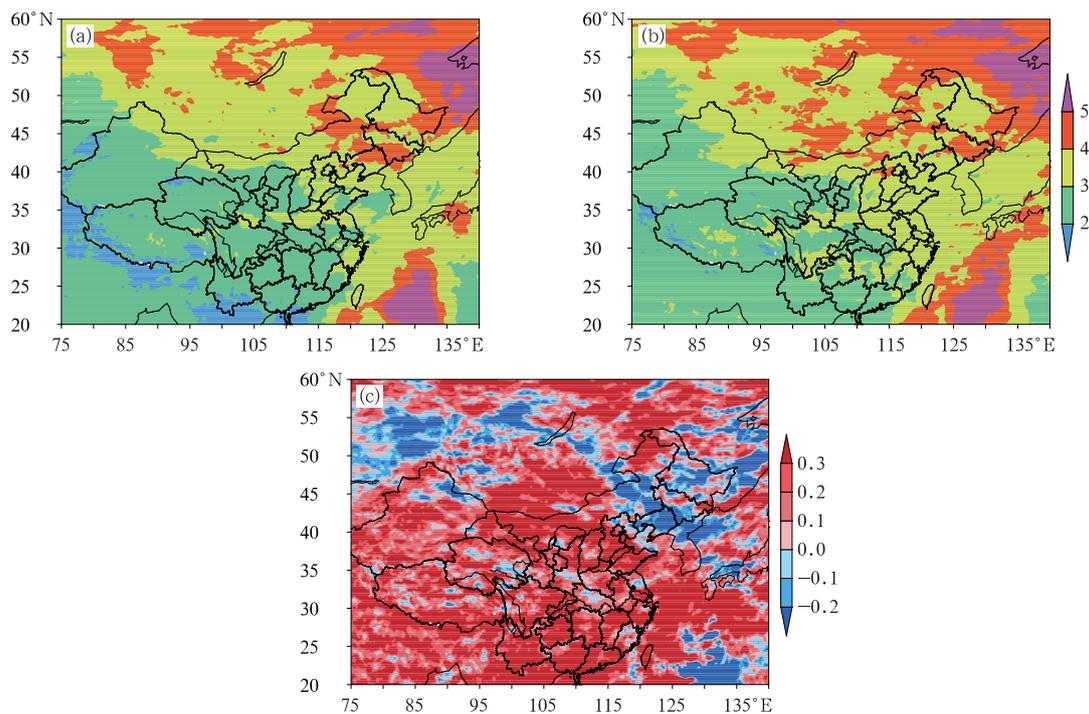


图 4 (a)NOSKEB 方案和(b)SKEB\_12 h 方案的 10 d 平均的 72 h 预报的 500 hPa 纬向风离散度及(c)两个方案的差值

Fig. 4 The  $U$  spread at 500 hPa of the 10 d average forecast for 72 h of (a) NOSKEB test and (b) SKEB\_12 h test and (c) the difference between them

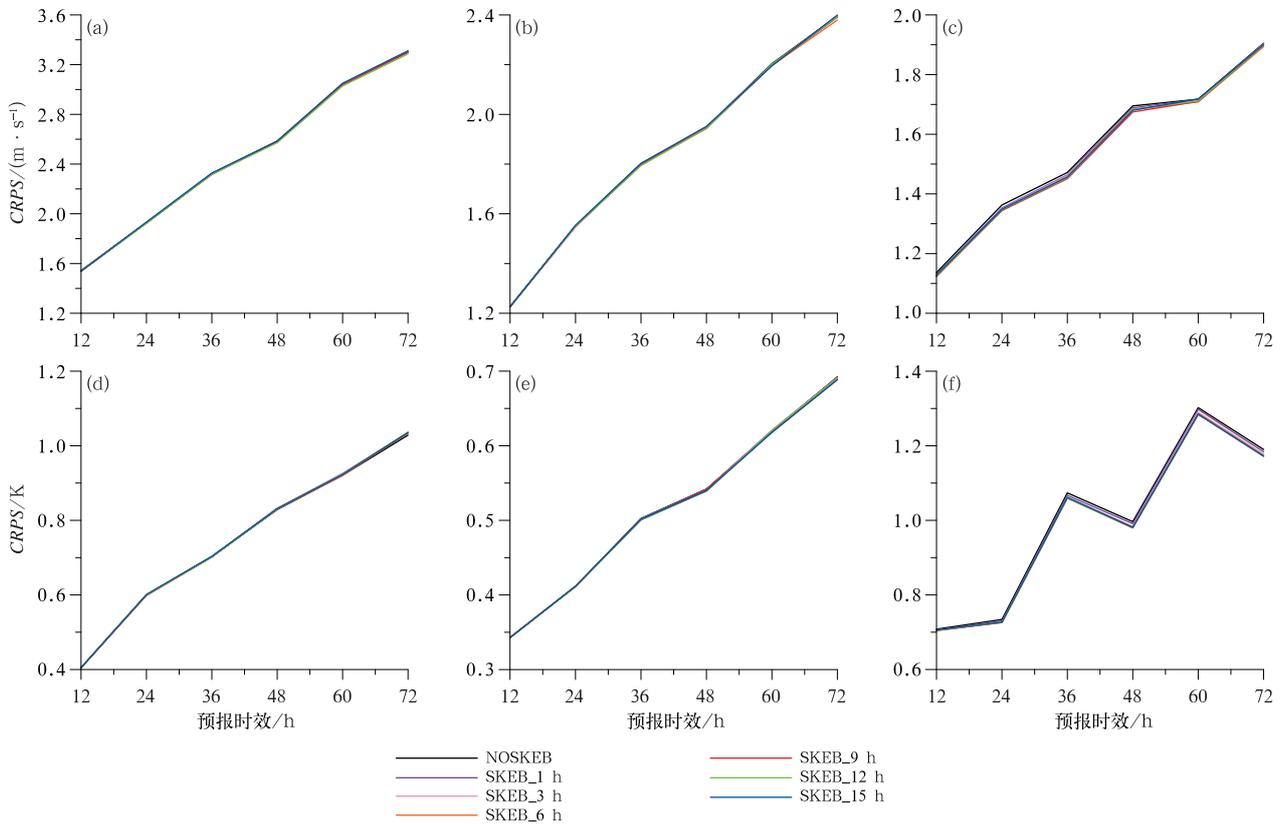


图 5 同图 3, 但为 CRPS 评分

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the CRPS

(图 5d~5f), 在高层 250 hPa 和 中层 500 hPa 中, SKEB\_12 h 和 SKEB\_15 h 略低于控制预报 NOSKEB, 而在低层 850 hPa, CRPS 评分的改进效果优于中高层, 其中 SKEB\_9 h 和 SKEB\_12 h 的 CRPS 评分较低。

综上所述, SKEB 方案对 CRPS 评分的改进效果有限, SKEB\_12 h 方案对 CRPS 评分的改进效果最好。

#### 2.2.4 离群值

离群值(outlier)指观测落在集合预报成员之外的频率, 是衡量集合预报可靠性的一种评分, 其值越低, 说明集合成员预报分布越可靠。由图 6a~6c 可见, 引入 SKEB 方案的六组时间尺度敏感性试验相比较于控制预报 NOSKEB 均显著降低了各个层次纬向风的 outlier 评分, 其中 SKEB\_12 h 方案的离群值减小最显著, 例如在预报时效 36 h, outlier 评分减小幅度为 14.9%, 这说明 SKEB\_12 h 方案使得区域集合预报包含实况的可能性更高, 集合预报质量更优; 同样, 引入 SKEB 方案的六组敏感性试

验均显著降低了温度的离群值评分(图 6d~6f)。

对于高层 250 hPa 温度, SKEB\_9 h 和 SKEB\_15 h 方案的离群值减小较为显著; 对于中层 500 hPa 温度, SKEB\_12 h 方案的离群值减小最显著; 低层 850 hPa 温度, SKEB\_12 h 和 SKEB\_15 h 方案离群值减小较为显著。

综上所述, SKEB 方法可有效显著降低 outlier 评分, 使集合成员预报分布更加可靠, 提升集合预报质量, 在时间尺度敏感性试验中, 且 SKEB\_12 h 方案的对集合预报技巧的改善效果最好。

## 3 SKEB 随机型空间尺度敏感性试验

### 3.1 试验方案设计

本文第二部分对随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$  的失相关时间尺度  $\tau$  进行敏感性试验, 总结得出 SKEB\_12 h 试验的对预报技巧提升效果最优。而对于空间尺度敏感性试验, 与最大截断波数有关。不同学者在引入

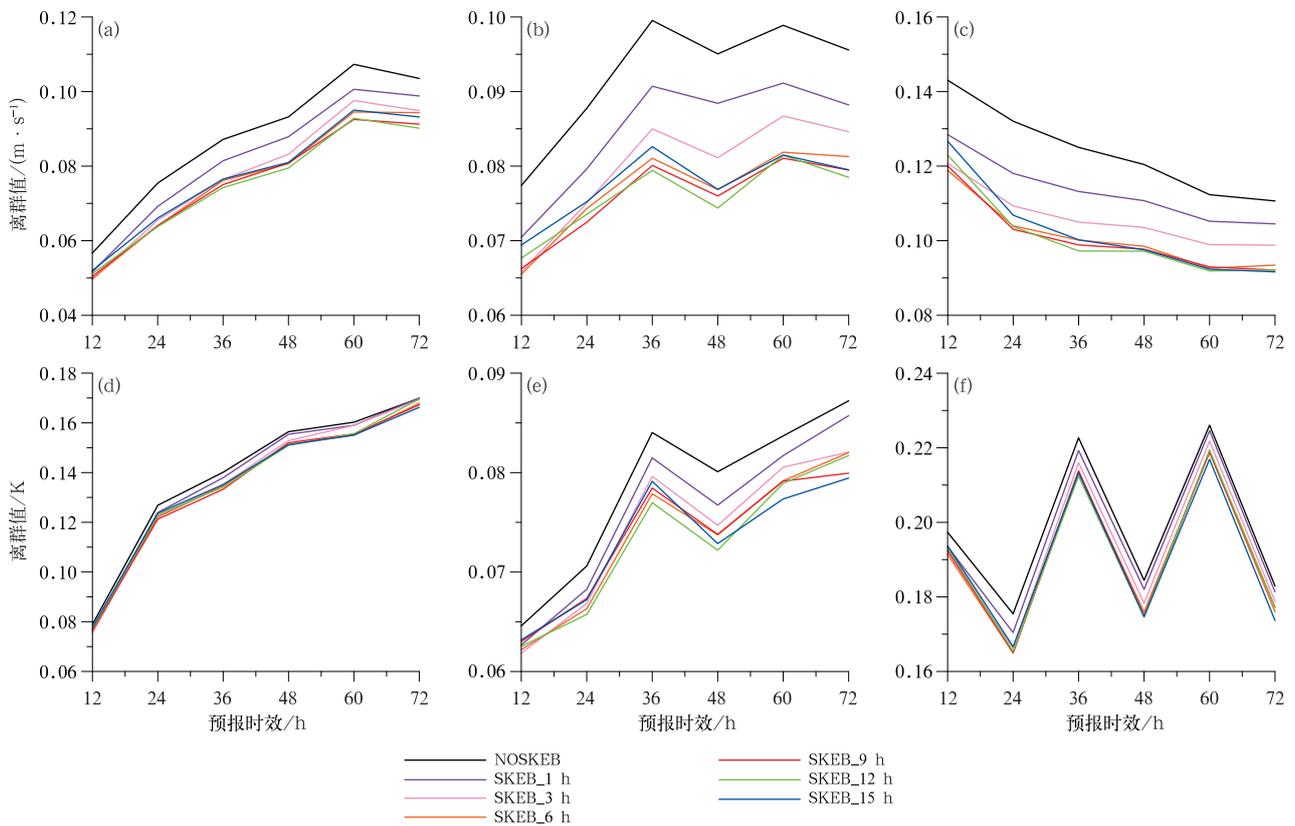


图 6 同图 3, 但为离群值评分

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the outlier

的 SKEB 方案采用的随机型最小、最大截断波数有所差异。Tennant et al(2011)使用 SKEB 方案的随机型的最小、最大截断波数分别是 5、60; Charron et al(2010)使用的 SKEB 方案的随机型的最小、最大截断波数分别是 40、128。Tennant et al (2011)与 Charron et al (2010)的研究中,使用的模式均为全球模式,构造的集合预报系统与本文使用的 CMA-REPS 区域集合预报系统有较大的差异。因此,本文将对 SKEB 方案随机型的最大截断波数进行敏感性试验,选取最适用于 CMA-REPS 的 SKEB 方案的参数。

本节基于时间尺度敏感性试验结果,对随机型  $\psi(\lambda, \phi, t)$  的空间尺度进行敏感性试验。为了避免引入大尺度扰动,固定最小截断波数  $L_{\min}$  为 20, 再分别选取最大截断波数  $L_{\max}$  为 80、100、120、160、200、240 的六组试验,加上控制预报 NOSKEB 共七组集合预报试验,以期找出最适用于 CMA-REPS 的参数, SKEB 方案差异的具体细节详见表 3。NOSKEB 不使用 SKEB 方案。七组试验的初值扰动和侧边界扰动均来自 T639 全球集合预报系统。试验时段为

2018 年 9 月、10 月分别选取 1 日、7 日、13 日、19 日、25 日的总计 10 d 的集合预报试验,预报时效为 72 h。

表 3 SKEB 方案随机型空间尺度参数敏感性试验设计  
Table 3 Sensitivity test design of stochastic spatial-scale parameters for SKEB test

试验名	SKEB 方案试验描述
NOSKEB	无
SKEB_80	$L_{\max} = 80$
SKEB_100	$L_{\max} = 100$
SKEB_120	$L_{\max} = 120$
SKEB_160	$L_{\max} = 160$
SKEB_200	$L_{\max} = 200$
SKEB_240	$L_{\max} = 240$

### 3.2 试验结果

#### 3.2.1 集合离散度和 RMSE

图 7a~7c 是各个层次的纬向风的离散度和均方根误差变化特征随预报时效的演变图,由图可见,七组试验的 RMSE 随着预报时效的演变基本保持一致, SKEB\_100 的 RMSE 略低于控制预报 NOSKEB; 而从离散度方面分析,引入 SKEB 方案的试验组都提

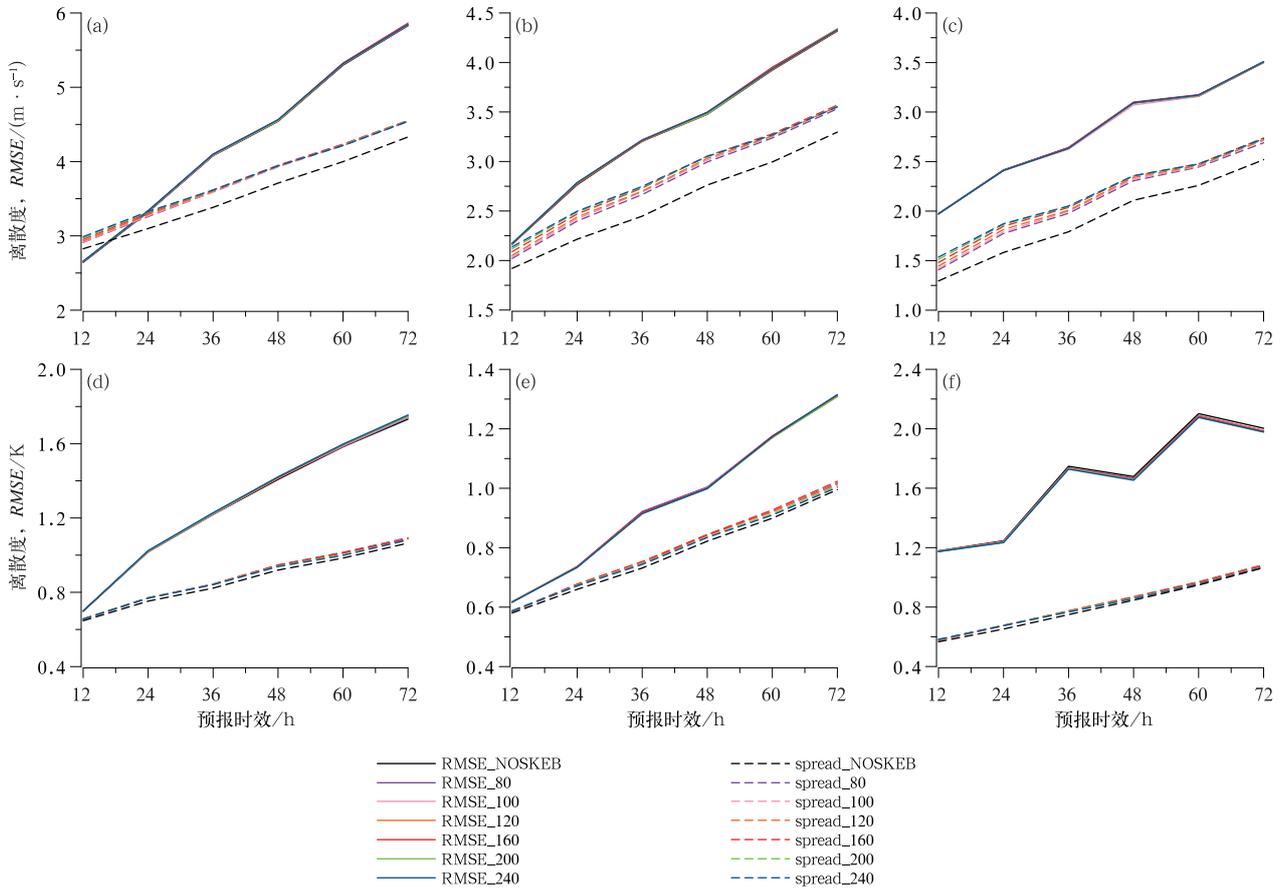


图 7 空间尺度敏感性试验结果(a,b,c)U 和(d,e,f)T 的离散度和均方根误差变化特征随预报时效演变  
(a,d)250 hPa, (b,e)500 hPa, (c,f)850 hPa

Fig. 7 The spread and root mean square error of (a, b, c) U and (d, e, f) T the spatial-scale sensitivity test result as a function of forecast lead time  
(a, d) 250 hPa, (b, e) 500 hPa, (c, f) 850 hPa

高了离散度,高于控制预报 NOSKEB,方案 SKEB\_240 的离散度是七组试验中最高的,说明最大截断波数  $L_{\max}$  为 240 时,扰动振幅较大,提升离散度较高,但是会影响到 RMSE;对于温度(图 7d~7f),七组试验的 RMSE 随着预报时效的演变基本保持一致;但是在低层 850 hPa,引入 SKEB 方案会明显的降低 RMSE,且 SKEB\_240 的 RMSE 较低;而离散度方面,所有引入 SKEB 方案的试验组都提高了离散度,由于没有直接补偿温度的耗散量,所以离散度提升效果并不明显,综合比较各个方案,SKEB\_160 方案的离散度是七组试验中最高的。

### 3.2.2 连续分级概率评分

图 8 是控制试验七组试验的纬向风和温度的 CRPS 评分随预报时效演变图,对于高层纬向风(图 8a)和中层纬向风(图 8b),引入 SKEB 的各个方案对 CRPS 评分的改进效果有限,SKEB\_100 和

SKEB\_120 的 CRPS 值较低;而对于低层纬向风(图 8c),SKEB\_240 对 CRPS 评分有一定的改进效果,且低于控制预报 NOSKEB;对于温度(图 8d~8f)的 CRPS 评分,七组试验的 CRPS 值在高层 250 hPa 和中层 500 hPa 基本保持一致;SKEB\_240 方案对低层 850 hPa 温度 CRPS 评分改进效果最好。

综上所述,引入 SKEB 方案对 CRPS 评分的改进效果有限,最大截断波数  $L_{\max}$  为 240 时,对 CRPS 评分的改进效果最好。

### 3.2.3 离群值

对于纬向风(图 9a~9c),引入 SKEB 方案的六组空间尺度敏感性试验均显著降低了各个层次纬向风的 outlier 评分,其中 SKEB\_200 和 SKEB\_240 方案的离群值减小较为显著。另一方面,对于高层 250 hPa 温度(图 9d),SKEB\_160 方案的离群值减

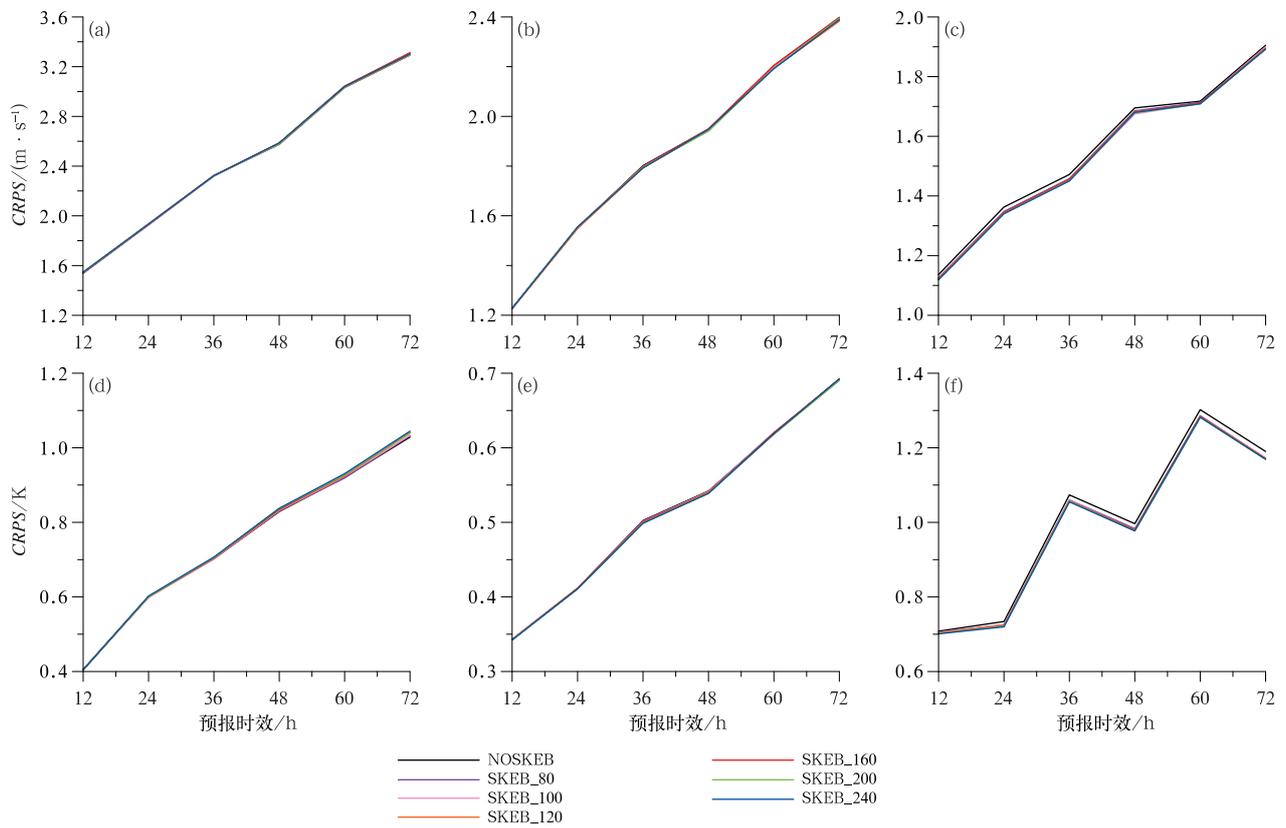


图 8 同图 7, 但为 CRPS 评分  
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the CRPS

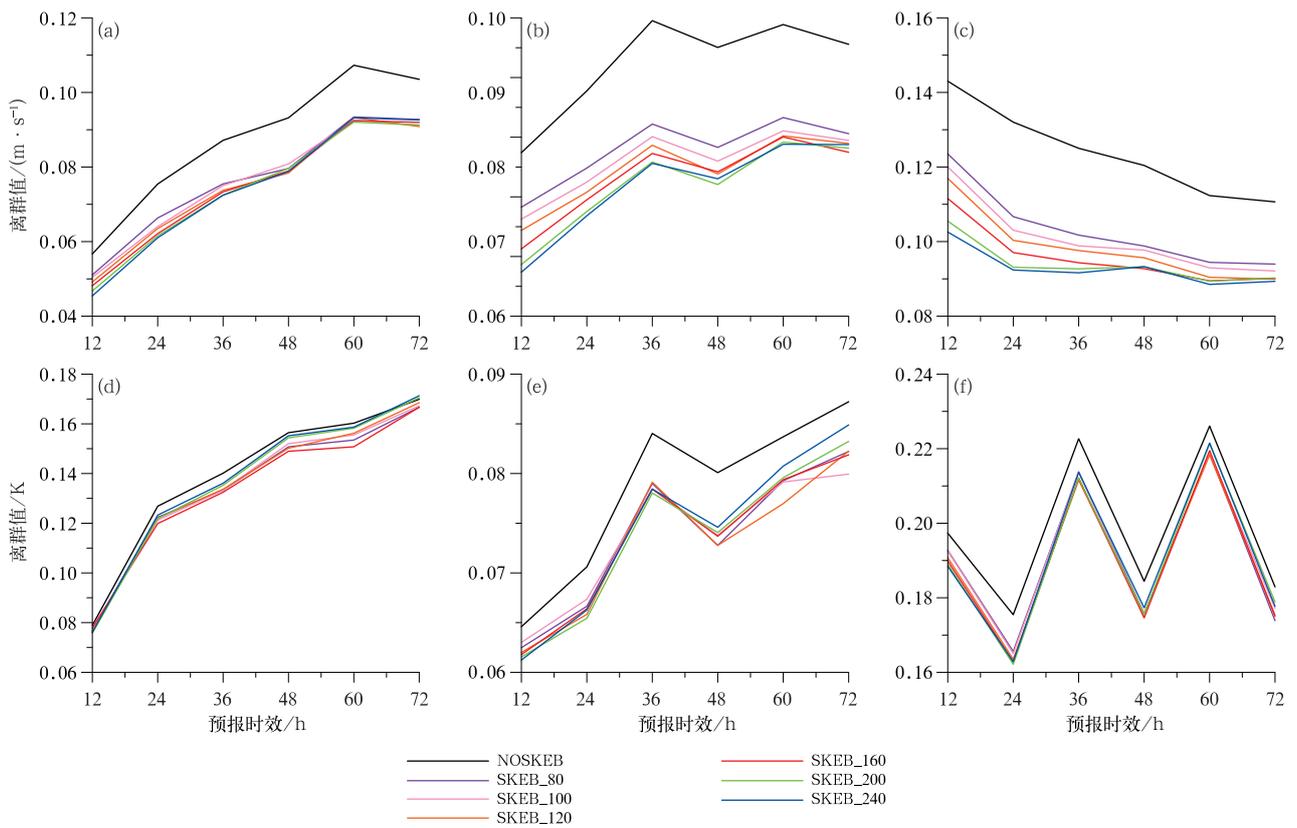


图 9 同图 7, 但为离群值评分  
Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the outlier

小最显著;对于中层 500 hPa 温度(图 9e),在预报时效 36 h 前,SKEB\_200 方案的离群值减小最显著,随着预报时效延长,SKEB\_120 方案的离群值减小最显著。对于低层 850 hPa 温度(图 9f),在预报时效 36 h 前,SKEB\_200 方案的离群值减小最显著,随着预报时效延长,SKEB\_120 方案的离群值减小最显著。

综上 3 种评分,在空间尺度敏感性试验中,最大截断波数  $L_{\max}$  会直接影响到扰动振幅大小,因此对于被扰动的纬向风  $U$  来说,SKEB\_240 方案的对集合预报技巧的改善效果最好。而对于没有被扰动的温度  $T$ ,各个方案之间差距不明显,SKEB\_240 方案稍微较好一点。

## 4 结论与讨论

为了描述区域模式在次网格能量转化过程中存在的不确定性,本文将 SKEB 方法引入 CMA-REPS 区域集合预报系统,以期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,并提高概率预报技巧。本文采用一阶自回归随机过程在水平方向上进行球谐函数展开得到的随机型,计算了由数值扩散方案引起的局地动能耗散率,以随机型和局地动能耗散率构造了随机流函数强迫,并根据流函数与水平风速旋转分量之间的关系,将 SKEB 方案中的随机流函数强迫转化为适用于 CMA-REPS 的水平风速扰动。开展了集合预报试验和随机型时间及空间尺度敏感性试验,从大气动能谱、集合离散度与集合均方根误差、CRPS 评分、离群值评分客观分析评估方面,较为系统地考察了 SKEB 方法对 CMA-REPS 区域集合预报的影响。结果表明:

(1)在 CMA-REPS 区域集合预报中应用 SKEB 方案,可在一定程度上补偿过度耗散的小尺度动能,进而改善了 CMA-REPS 模式对实际大气动能谱的模拟能力。就集合预报技巧改进而言,SKEB 方案可以显著改善区域模式水平风场和温度的离散度,同时水平风场、温度等要素连续分级概率评分(CRPS)和离群值评分均获得改善。

(2)开展了集合预报试验和随机型时间及空间尺度敏感性试验,选取 6 个时间尺度(失相关时间尺度  $\tau$  选取 1、3、6、9、12、15 h)和 6 个空间相关尺度(最大截断波数  $L_{\max}$  选取 80、100、120、160、200、

240)。试验结果表明,最大截断波数  $L_{\max}$  会直接影响到扰动振幅大小, $\tau$  值影响扰动的形态,失相关时间尺度  $\tau=12$  h 和最大截断波数  $L_{\max}=240$  时,集合概率预报技巧更优。

(3)SKEB 方案没有直接对温度  $T$  的耗散量进行补偿,在时间尺度敏感性试验中,SKEB 方案对温度的各项评分有一定的改进效果,SKEB\_12 h 方案表现较好;而在空间尺度敏感性试验中,SKEB 方案对温度的各项评分改进效果不明显,各种 SKEB 方案之间差距不大。

## 参考文献

- 陈静,薛纪善,颜宏,2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验[J]. 气象学报,61(4):432-446. Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of South China heavy rain and the ensemble simulations[J]. Acta Meteor Sin, 61(4):432-446(in Chinese).
- 陈雨潇,徐致真,陈静,等,2020. 随机参数扰动方法对中国冬季降水集合预报的影响[J]. 大气科学,44(5):984-996. Chen Y X, Xu Z Z, Chen J, et al, 2020. Influence of stochastically perturbed parameterization on ensemble forecasting of winter precipitation in China[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):984-996(in Chinese).
- 彭飞,李晓莉,陈静,等,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[J]. 气象学报,77(2):180-195. Peng F, Li X L, Chen J, et al, 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):180-195(in Chinese).
- 彭飞,李晓莉,陈静,2020. GRAPES 全球集合预报系统不同随机物理扰动方案影响分析[J]. 气象学报,78(6):972-987. Peng F, Li X L, Chen J, 2020. Impacts of different stochastic physics perturbation schemes on the GRAPES global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 78(6):972-987(in Chinese).
- 谭燕,陈德辉,2007. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验[J]. 应用气象学报,18(3):396-406. Tan Y, Chen D H, 2007. Meso-scale ensemble forecasts on physical perturbation using a non-hydrostatic model[J]. J Appl Meteor Sci, 18(3):396-406(in Chinese).
- 王明欢,李俊,熊洁,等,2021. 随机物理倾向扰动方案在西部山地对流尺度集合预报中的研究[J]. 气象,47(8):966-981. Wang M H, Li J, Xiong J, et al, 2021. Study of stochastically perturbed parameterization tendencies in West China mountains convective-scale ensemble forecast[J]. Meteor Mon, 47(8):966-981(in Chinese).
- 王婧卓,陈法敬,陈静,等,2021. GRAPES 区域集合预报对 2019 年中国汛期降水预报评估[J]. 大气科学,45(3):664-682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al, 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):664-682(in Chinese).

- 熊洁,李俊,王明欢,2021. 随机参数扰动在一次山地暴雨集合预报中的对比研究[J]. 气象,47(8):953-965. Xiong J, Li J, Wang M H, 2021. Comparative study of stochastically perturbed parameterization in ensemble forecast of a mountain rainstorm event [J]. Meteor Mon, 47(8):953-965 (in Chinese).
- 徐致真,陈静,王勇,等,2019. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性试验[J]. 气象学报,77(5):849-868. Xu Z Z, Chen J, Wang Y, et al, 2019. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):849-868 (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]. Acta Meteor Sin, 40(9):1076-1087 (in Chinese).
- 张涵斌,范水勇,陈敏,等,2019. 区域集合预报基于 SKEB 和多物理过程的混合模式扰动方法研究[J]. 气象,45(1):17-28. Zhang H B, Fan S Y, Chen M, et al, 2019. Study on a synthetic model perturbation method based on SKEB and multi-physics for regional ensemble forecast[J]. Meteor Mon, 45(1):17-28 (in Chinese).
- 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]. J Atmos Sci, 66(3):603-626.
- Buizza R, Milleer M, Palmer T N, 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 125(560):2887-2908.
- Charron M, Pellerin G, Spacek L, et al, 2010. Toward random sampling of model error in the canadian ensemble prediction system [J]. Mon Wea Rev, 138(5):1877-1901.
- Epstein E S, 1969. Stochastic dynamic prediction[J]. Tellus, 21(6):739-759.
- Jankov I, Berner J, Beck J, et al, 2017. A performance comparison between multiphysics and stochastic approaches within a North American RAP ensemble [J]. Mon Wea Rev, 145(4):1161-1179.
- Leith C E, 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. 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[J]. Mon Wea Rev, 136(2):443-462.
- Lorenz E N, 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. Tellus, 17(3):321-333.
- Nastrom G D, Gage K S, Jasperson W H, 1984. Kinetic energy spectrum of large- and mesoscale atmospheric processes[J]. Nature, 310(5972):36-38.
- Palmer T N, Shutts G J, Hagedorn R, et al, 2005. Representing model uncertainty in weather and climate prediction[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 33:163-193.
- Shutts G, 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 131(612):3079-3102.
- Tennant W J, Shutts G J, Arribas A, et al, 2011. Using a stochastic kinetic energy backscatter scheme to improve MOGREPS probabilistic forecast skill[J]. Mon Wea Rev, 139(4):1190-1206.

(本文责编:俞卫平)