

# GRAPES 全球集合预报系统不同随机物理扰动方案影响分析\*

彭 飞 李晓莉 陈 静  
PENG Fei LI Xiaoli CHEN Jing

1. 国家气象中心, 北京, 100081
  2. 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081
  1. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*
  2. *Numerical Weather Prediction Center of CMA, Beijing 100081, China*
- 2019-10-23 收稿, 2020-09-27 改回.

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. 气象学报, 78(6): 972-987

Peng Fei, Li Xiaoli, Chen Jing. 2020. Impacts of different stochastic physics perturbation schemes on the GRAPES Global Ensemble Prediction System. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(6):972-987

**Abstract** In order to better understand the impacts of different stochastic physics perturbation schemes on global medium ensemble forecasts, this research conducts a comparative analysis of the features of perturbations yielded by the Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies (SPPT) scheme, the Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB) scheme, and the combination of the SPPT and SKEB schemes as well as the impacts of these three model perturbation methods on ensemble forecasts based on the GRAPES Global Ensemble Prediction System (GRAPES-GEPS). To avoid the impacts from initial perturbations, initial perturbations are disabled when the features of perturbations produced by the above stochastic physics schemes are explored. Via the perturbation versus error correlation analysis (PECA), it is found that perturbations yielded by different stochastic physics perturbation schemes have the capability to capture forecast errors. Furthermore, when the combination of the SPPT and SKEB schemes is applied, the produced perturbations best simulate forecast errors. For all stochastic perturbation schemes, the total energy of perturbations is initially concentrated in the middle and upper troposphere and the lower stratosphere of the tropics. In addition, the total energy of perturbations increases with the forecast lead time, for which the maxima keep propagating towards the extratropical regions. From the spectra of total energy of perturbations, it is observed that the perturbation energy evolves upscale. In the GRAPES-GEPS built on the initial perturbations derived from singular vectors, the applications of stochastic physics perturbation schemes increase the ensemble spreads for fields at different isobaric surfaces in different regions and improve the root-mean-square errors of the ensemble means to some extent. Due to the increased ensemble spreads, outliers are significantly decreased. The continuous rank probability scores are also reduced, which is more pronounced in the tropics. Furthermore, the probabilistic forecast skills of rainfall in China for light rain, moderate rain, heavy rain, and rainstorm are also improved to some extent. The above-mentioned improvements are the largest when the combination of the SPPT and SKEB schemes is employed. This is consistent with the results from the analyses on total energy of perturbations and PECA.

**Key words** Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies (SPPT) scheme, Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB) scheme, Model perturbation, Features of perturbations, Ensemble prediction

---

\* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506703、2017YFA0604502)、国家自然科学基金项目(41905090、41875181)。

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

**摘 要** 为了更好地理解不同随机物理扰动方案对全球中期集合预报的影响差异,本研究基于 GRAPES 全球集合预报系统 (GRAPES-GEPS) 对比分析了随机物理倾向扰动 (Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT)、随机动能补偿 (Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB) 及联合使用 SPPT 与 SKEB 三种模式扰动方案所产生的扰动特征及其对集合预报的影响。为避免初值扰动影响,考察随机物理方案所产生的扰动特征时,不使用初值扰动。通过扰动与误差相关性分析 (PECA) 发现,不同随机物理扰动方案所产生的扰动对预报误差均具有一定的描述能力,而且联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时,扰动对误差的描述能力最好。对所有扰动方案来说,扰动总能量最初主要集中在热带地区对流层中高层以及平流层低层。随着预报时效的延长,扰动总能量不断增大,其大值区不断向热带外地区转移。从扰动总能量的谱结构来看,扰动能量均呈现升尺度发展的特征。在基于奇异向量初值扰动的 GRAPES-GEPS 中,随机物理扰动方案的使用均能够显著增加不同地区等压面要素的集合离散度,并在一定程度上改善集合平均误差。由于集合离散度的增大,预报失误率显著减小。连续分级概率评分也有所减小,尤其是在热带地区,改进更为明显。此外,中国地区不同量级(小雨、中雨、大雨和暴雨)降水概率预报技巧在一定程度上得到改善。上述改进均在联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时最好,这与扰动总能量、扰动与误差相关分析结果一致。

**关键词** 随机物理倾向扰动方案, 随机动能补偿方案, 模式扰动, 扰动特征, 集合预报

**中图法分类号** P456

## 1 引 言

由于不可避免地存在初值误差与模式误差,单一确定性预报具有不确定性。为了估计这种预报的不确定性, Epstein(1969) 和 Leith(1974) 最先提出了集合预报的思想与方法。自 20 世纪 90 年代以来,集合预报快速发展,在短、中期天气预报以及季节、气候预测中得到广泛应用,同时在高影响天气事件的预报、预警中发挥了重要的作用。

在一个集合预报系统中,除了初值不确定性,模式不确定性的表征也尤为重要。为了更好地探究模式不确定性,欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 与世界天气研究计划 (the World Weather Research Programme, WWRP) 联合举办了专题研讨会,总结已有的以及正在研发的一系列模式不确定性表征方案 (ECMWF, 2016)。用于表征模式不确定性的方法和途径有很多。近年来,随着模式的发展与分辨率的不断提高,随机参数化方案在天气与气候模式发展中的重要作用日益凸显 (Palmer, 2012; Berner, et al, 2017)。模式本身物理过程参数化方案使用一个最可能的确定性数值去量化次网格尺度运动及其对可分辨尺度运动的影响,忽略了次网格尺度运动及其与可分辨尺度运动相互作用过程中存在的随机性。因而,有必要发展随机参数化方案,通过在物理过程参数化方案中引入随机因子来体现次网格参数化过程中存在的不确定性。目前,随机参数化方案已成功应用于改善短、中期以及季节尺度概率预报 (Berner, et al, 2009; Charron, et al, 2010; Tennant, et al, 2011; Weisheimer, et al, 2014)。

随机物理倾向扰动 (Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT) 方案与随机动能补偿 (Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB) 方案是目前应用较为广泛的两种随机参数化方案。SPPT 方案首先由 Buizza 等 (1999) 提出,将模式物理过程净倾向与具有一定时、空相关特征的随机场进行相乘,再把乘积作为扰动后的物理过程净倾向,以体现物理参数化方案中次网格物理倾向存在的不确定性。Buizza 等 (1999) 把 SPPT 方案应用于 ECMWF 全球集合预报系统。结果表明,SPPT 方案能够有效增加集合离散度,提高概率预报技巧,尤其是在热带地区。SPPT 方案虽然简单,但是正效果明显 (Palmer, et al, 2009; Charron, et al, 2010; Yonehara, et al, 2011; 李晓莉等, 2019b)。在区域中尺度和对流尺度集合预报研究中,SPPT 方案同样应用广泛。例如, Bouttier 等 (2012) 使用 SPPT 方案改善了对流尺度集合预报系统的预报性能。Qiao 等 (2017) 发展了与扩散有关的 SPPT 方案,将其应用于对流尺度集合预报研究中,改善了超级单体的集合预报效果。与 SPPT 方案不同, SKEB 方案使用具有一定时、空相关特征的随机型以及估算的局地动能耗散率构建随机流函数强迫和温度强迫,对由于数值扩散、重力波拖曳以及深对流导致的能量耗散进行补偿,进而弥补模式中缺失的次网格尺度能量升尺度转换过程 (Shutts, 2005)。Shutts (2005) 指出,该方案的使用能够改善 ECMWF 全球集合预报系统的预报能力。也有不少研究考察了 SKEB 方案对区域集合预报的影响。例如, Duda 等 (2016) 展示了 SKEB 方案对对流尺度集合

预报的改进作用。

在体现模式不确定性时,不同随机参数化方案的联合使用展示出强大的优势,能够产生更好的集合预报效果。Jankov等(2017, 2019)对比分析了不同模式不确定性表征方案对区域集合预报的影响,指出仅使用随机参数扰动方案(SPP)时产生的集合离散度不如多物理方案,但是SPP与SPPT、SKEB方案联合使用时,高空变量(例如500 hPa位势高度)和部分地面要素(例如10 m风)的集合离散度与多物理方案相当甚至更大。蔡沅辰等(2017)进行了SPPT和SKEB方案在风暴尺度集合预报中的对比研究,结果表明两种方案的组合能够提供比单独使用任何一种方案时更大的集合离散度,并且减小了预报误差,提高了预报的准确度。Qiao等(2018)与Wang等(2019)对物理过程倾向和来自微物理方案的截断参数进行随机扰动研究,讨论了不同随机物理扰动方案的结合使用对强对流天气集合预报的影响。Xu等(2020)分析了SPP、SKEB与SPPT方案的不同组合方式对GRAPES区域集合预报系统的影响,表明联合使用多种随机物理扰动方案能够更好地表征模式不确定性,获得更高的预报技巧。而且,不同随机参数化方案的联合使用在很多先进数值预报中心的集合预报业务系统中得到了应用(Palmer, et al, 2009; Tennant, et al, 2011; Charron, et al, 2010)。

目前,中国关于不同随机物理扰动方案对集合预报影响的对比研究较少,并且主要集中在有限区域集合预报,缺乏研究对比分析不同随机物理扰动方案对全球中期集合预报的影响。中国气象局已建立GRAPES全球中期集合预报业务系统(GRAPES-GEPS)。在GRAPES-GEPS中使用SPPT方案来表征模式物理过程参数化方案中存在的 uncertainty(李晓莉等, 2019b)。为体现GRAPES模式次网格尺度能量升尺度转换过程中存在的 uncertainty,彭飞等(2019)将SKEB方案应用于GRAPES-GEPS系统。但是,上述工作仅关注各自方案单独使用时的影响,并且侧重于对集合预报效果的检验分析。在GRAPES全球模式中,SPPT和SKEB方案产生的扰动如何发展?不同方案所产生的扰动特征是否与预报误差特征一致?SPPT与SKEB方案的联合使用对GRAPES-GEPS系统的影响如何?与单独使用SPPT或SKEB方案时的影响差异又是怎样

的?这些工作还需要进一步分析和研究。因此,为了进一步提高GRAPES全球中期概率预报技巧,本研究从扰动特征、集合预报统计检验等角度系统考察了不同模式随机物理扰动方案(SPPT、SKEB、SPPT与SKEB联合使用)产生的扰动特征以及它们对GRAPES-GEPS系统影响的差异。

## 2 试验设计与方法

### 2.1 GRAPES-GEPS 系统

GRAPES-GEPS系统于2018年12月底正式投入业务运行,每天进行00和12时(世界时,下同)起报的实时预报。文中使用的系统相关参数如表1所示,对照预报模式是水平分辨率为 $0.5^\circ$ 、垂直为60层(约3 hPa)、预报时效为15 d的GRAPES全球模式(薛纪善等, 2008),使用奇异向量方法产生初值扰动(刘永柱等, 2013; 李晓莉等, 2019a, 2019b),使用随机参数化方案SPPT与SKEB体现模式不确定性(李晓莉等, 2019b; 彭飞等, 2019),一共包括31个集成员(1个对照预报与30个扰动成员)。

表1 GRAPES-GEPS系统参数配置  
Table 1 The configuration of the GRAPES global ensemble prediction system (GRAPES-GEPS)

对照预报模式	GRAPES_GFS 2.3.1
水平分辨率	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$
垂直层次	60层(约3 hPa)
预报时效	15 d
初值扰动方法	奇异向量方法
模式扰动方法	SPPT、SKEB方案
集合预报成员	31(1个对照预报, 30个扰动成员)

#### 2.1.1 SPPT 方案

SPPT方案使用模式物理过程参数化方案的净倾向( $X_c$ )与随机场( $r$ )的乘积产生扰动后的物理倾向 $X_p$

$$X_p = r \times X_c \quad (1)$$

式中, $X_p$ 为扰动后的位温、比湿与水平风场的物理倾向; $r$ 是随机场,服从均值为1的高斯分布。随机场的生成基于空间上三角截断形式的球谐函数展开式,展开式中谱系数随时间的演变满足一阶自回归过程。由此方式生成的随机场具有可任意调控的时、空相关特征,具体介绍见李晓莉等(2019b)和

彭飞等(2019)。通过一系列敏感性试验确定了能够有效增加 GRAPES-GEPS 系统集合离散度的 SPPT 方案随机场时、空相关尺度等参数的取值: 随机场的时间相关尺度为 6 h; 随机场的取值范围是 [0.2, 1.8]; 球谐函数展开式的最大截断波数为 20。

### 2.1.2 SKEB 方案

彭飞等(2019)对 GRAPES-GEPS 系统的 SKEB 方案进行了详细介绍。该方案使用随机型以及由数值扩散导致的局地动能耗散率建立随机流函数强迫  $F_\psi$

$$F_\psi = \frac{\alpha \Delta x}{\Delta t} \Psi(\lambda, \phi, t) \sqrt{\Delta t D(\lambda, \phi, \eta, t)} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为可调常数, 用于控制扰动大小;  $\Delta x$ 、 $\Delta t$  分别表示模式网格长度和积分步长;  $\lambda$ 、 $\phi$ 、 $\eta$  分别表示经度、纬度、模式层高度;  $\Psi$  表示随机型;  $D$  代表局地动能耗散率。动能耗散率( $D$ )计算公式如下

$$D = -d \times \mathbf{u} \times \mathbf{u}' \quad (3)$$

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

由于 GRAPES 模式中流函数并非预报变量, 因而使用流函数与水平风场旋转分量的关系, 基于式 (4) 和 (5), 把式 (2) 所示的流函数强迫转化为适合 GRAPES 模式的水平风场扰动

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\text{SKEB}} = -\frac{1}{a} \frac{\partial F_\psi}{\partial \phi} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\text{SKEB}} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial F_\psi}{\partial \lambda} \quad (5)$$

式中,  $a$  表示地球半径。

### 2.2 试验设计

为了独立分析随机物理扰动方案所产生的扰动特征, 基于相同的初值条件(未经扰动), 设计了 3 组采用不同随机物理扰动方案的集合预报试验(表 2), 分别是仅使用 SPPT 方案的试验(简记为 SPPT)、仅使用 SKEB 方案的试验(简记为 SKEB)及联合使用 SPPT 和 SKEB 方案的试验(简记为 SPPT\_SKEB)。

在使用初值扰动(初值扰动)的情况下, 考察不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统预报能力的影响, 设计了如表 3 所示的 4 组集合预报试验, 分别是仅使用初值扰动的试验(简记为 INI)、使用初值扰动与 SPPT 方案的试验(简记为 INI\_SPPT)、使用初值扰动与 SKEB 方案的试验(简记为 INI\_SKEB)及使用初值扰动与 SPPT、SKEB 方案的试验(简记为 INI\_SPPT\_SKEB)。

针对上述 7 组不同集合预报试验设置, 分别开展了从 2017 年 8 月 7—16 日(共计 10 d)每日 12 时起报的集合预报试验, 每次试验的模式积分时效至

表 2 分析不同随机物理扰动方案产生的扰动特征时, 集合预报试验方案设计 (“Off” 表示不使用相应扰动方案, “On” 表示使用相应扰动方案)

Table 2 Ensemble forecast experiments designed to analyze the characteristics of perturbations caused by different stochastic physics perturbation schemes (“Off” indicates that the corresponding perturbation scheme is not used, and “On” indicates that the corresponding perturbation scheme is used)

试验名称	初值扰动方案	SPPT方案	SKEB方案
SPPT	Off	On	Off
SKEB	Off	Off	On
SPPT_SKEB	Off	On	On

表 3 考察不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统的影响时, 集合预报试验方案设计 (“Off” 表示不使用相应扰动方案, “On” 表示使用相应扰动方案)

Table 3 Ensemble forecast experiments designed to investigate the impacts of different stochastic physics perturbation schemes on the GRAPES-GEPS (“Off” indicates that the corresponding perturbation scheme is not used, and “On” indicates that the corresponding perturbation scheme is used)

试验名称	初值扰动方案	SPPT方案	SKEB方案
INI	On	Off	Off
INI_SPPT	On	On	Off
INI_SKEB	On	Off	On
INI_SPPT_SKEB	On	On	On



15 d, 共计 2170 次模式预报。进行集合预报检验评估时, 对于等压面上的连续变量, 采用 GRAPES 模式分析场作为“真值”。进行中国地区降水检验时, 使用了中国气象局国家气象信息中心提供的 2400 多个站点的降水观测。如无特别声明, 下文提到的南半球均表示南半球热带外地区(20°—90°S), 北半球均表示北半球热带外地区(20°—90°N), 热带地区即为 20°S—20°N。

### 3 随机物理扰动方案的扰动特征对比分析

#### 3.1 扰动与误差相关性分析

扰动与误差相关性分析(Perturbation versus Error Correlation Analysis, PECA)已应用于集合预报初值扰动研究(Wei, et al, 2003; 马旭林等, 2008), 以评估扰动(扰动预报与对照预报的差异)描述预报误差(对照预报与分析场的差异)的能力。通过 PECA, 下面分析不同随机物理扰动方案下扰动描述预报误差的能力。扰动与预报误差的

空间相关系数可使用下式中的  $A_c$  进行度量

$$A_c(\mathbf{P}, \mathbf{E}) = \frac{\{\mathbf{P}, \mathbf{E}\}}{\{\mathbf{E}, \mathbf{E}\}^{1/2}\{\mathbf{P}, \mathbf{P}\}^{1/2}} \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}_p(t) - \mathbf{F}_{ctl}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}_{ctl}(t) - \mathbf{F}_{ana}(t) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{F}_p(t)$ 、 $\mathbf{F}_{ctl}(t)$ 、 $\mathbf{F}_{ana}(t)$  分别表示扰动预报、对照预报、分析场,  $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{E}$  分别表示扰动、预报误差。PECA 定义为扰动与预报误差的空间相关系数( $A_c$ )。PECA 值越接近 1, 扰动与误差相关越强, 说明扰动对大气真实误差状态的描述越准确, 集合扰动效果越好。

基于表 2 中的试验, 分析了不使用初值扰动的 3 组集合预报试验(SPPT、SKEB、SPPT\_SKEB) 500 hPa 水平风场、温度场、位势高度场的全球 PECA 值(图 1)。可以看到, 对于每个考察变量, PECA 值随预报时效延长逐渐增大, 并且不同试验设置下 PECA 值有所不同, 其中, SPPT\_SKEB 试验最大,

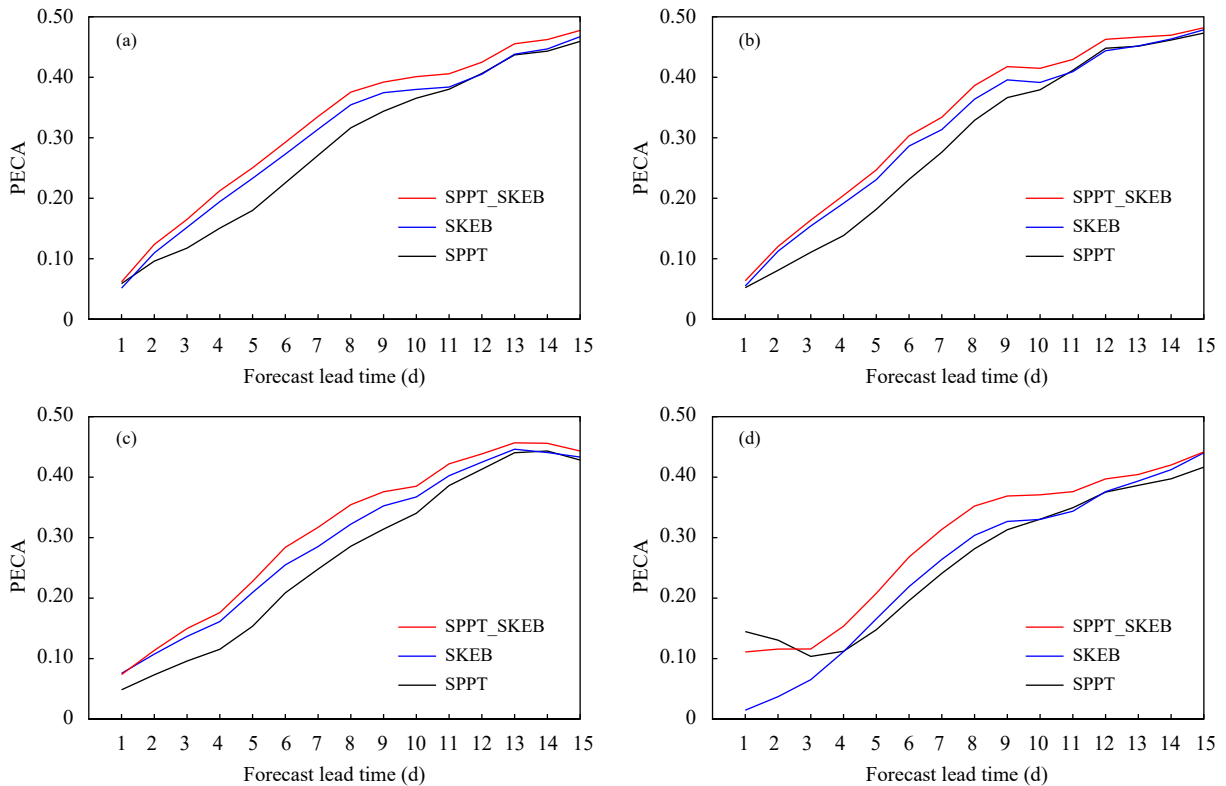


图 1 2017 年 8 月 7—16 日 12 时 SPPT、SKEB 与 SPPT\_SKEB 3 组不使用初值扰动的集合预报试验 10 d 平均的 500 hPa (a) 纬向风场、(b) 经向风场、(c) 温度场与 (d) 位势高度场全球 PECA 值随预报时效的演变

Fig. 1 The PECA values over the global domain for 500 hPa (a) zonal wind, (b) meridional wind, (c) temperature, and (d) potential height averaged over a 10 d period in the three ensemble forecast experiments without initial perturbations: SPPT, SKEB, SPPT\_SKEB (12: 00 UTC 7—16 August 2017)

SKEB 试验次之, SPPT 试验最小。这表明, 联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时, 扰动对预报误差的描述能力最优, 能够更好地描述大气真实的误差状态。

### 3.2 扰动总能量演变

采用如下式所示的扰动总能量 (Zhang, et al, 2003)

$$DTE = \frac{1}{2} \left[ (\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 + \frac{c_p}{T_r} (\Delta T)^2 \right] \quad (9)$$

考察不同随机物理扰动方案下扰动总能量的时、空演变特征。式中,  $\Delta u$ 、 $\Delta v$  和  $\Delta T$  分别表示集合成员与对照预报纬向风场、经向风场和温度场的差异,  $c_p$  为干空气比热容 (1004 J/(kg·K)),  $T_r$  为参考温度 (280 K)。从 SPPT、SKEB 与 SPPT\_SKEB 三组试验下扰动总能量纬度-高度剖面 (图 2) 可以看到, 不管在哪种随机物理扰动方案下, 预报初期, 扰动总能量主要集中在热带地区对流层中高层以及平流

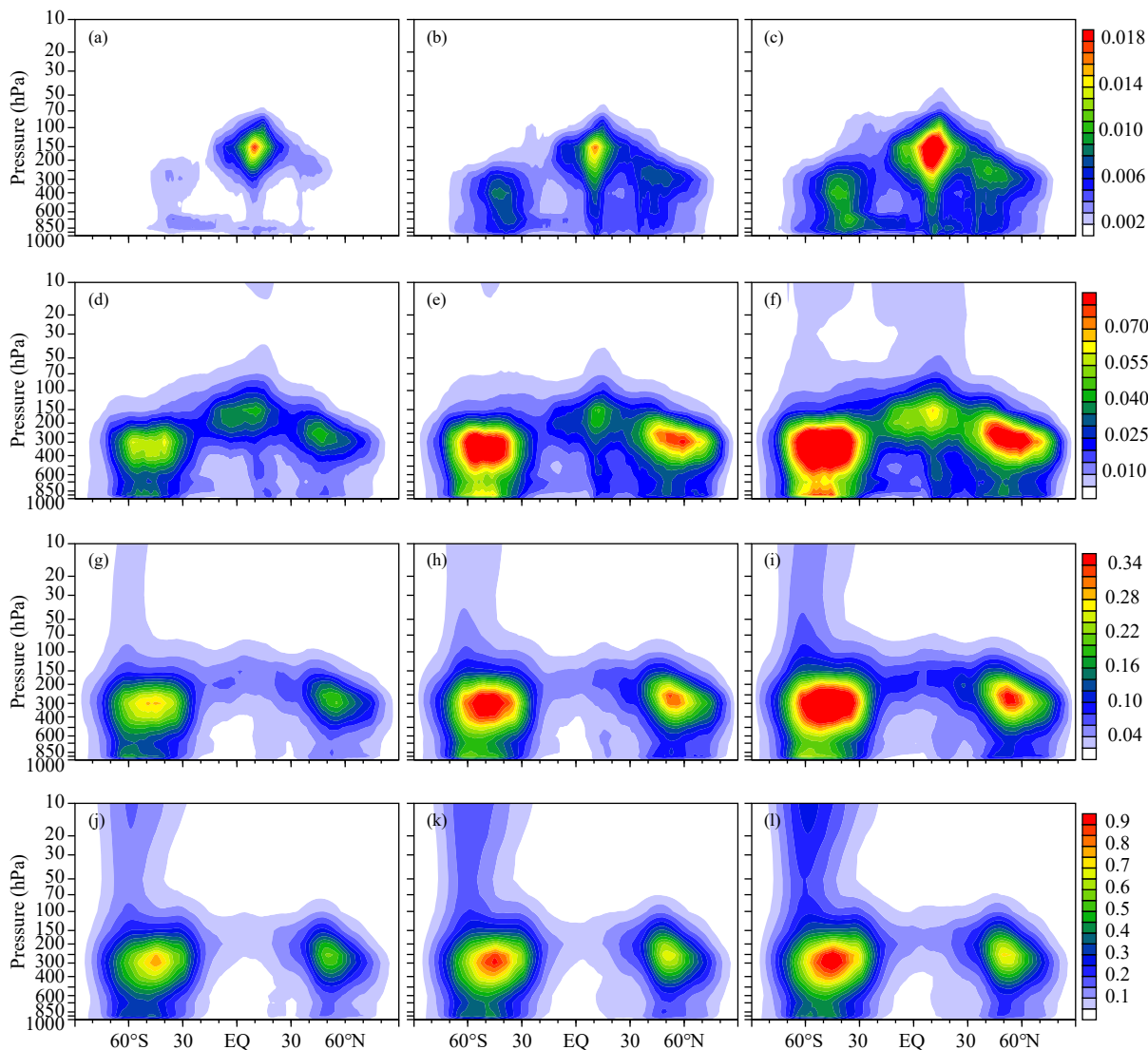


图 2 2017 年 8 月 7—16 日 12 时 SPPT (a、d、g、j)、SKEB (b、e、h、k) 与 SPPT\_SKEB (c、f、i、l) 3 组不使用初值扰动的集合预报试验不同预报时效 10 d 平均的面积加权扰动总能量纬度-高度剖面 (单位: J/kg) (a—c. 第 1 天, d—f. 第 4 天, g—i. 第 7 天, j—l. 第 10 天)

Fig. 2 Latitude-height cross sections of area-weighted total energy of perturbations averaged over a 10 d period in the three ensemble forecast experiments without initial perturbations (SPPT: a, d, g, j; SKEB: b, e, h, k; SPPT\_SKEB: c, f, i, l) at different lead times (unit: J/kg) (a—c. day 1, d—f. day 4, g—i. day 7, j—l. day 10; 12:00 UTC 7—16 August 2017)

层低层(约 300—100 hPa);随着预报时效的延长,扰动总能量不断增大,其大值区也由热带地区转移至热带外地区,这可能与热带外地区扰动的快速发展以及热带地区扰动向热带外地区的传播有关,并且大值区依旧主要集中在对流层中高层以及平流层低层(约 500—200 hPa)。同时还可以看到,大约 4 d 以后,不同试验方案下扰动总能量垂直结构非常相似,这可能与扰动本身的依流型发展有关。类似特征在初值扰动发展过程中也存在,如 Magnusson 等(2009)指出在模式积分一段时间后不同初值扰动试验方案下扰动总能量将收敛。

就整层扰动总能量(图 3)而言,不管在热带地区还是热带外地区,SPPT\_SKEB 试验最大,SKEB

试验次之,SPPT 试验最小。从扰动能量的谱结构(图 4)可以看到,随着预报时效的增加,所有试验方案中的扰动能量不断升尺度发展,向大尺度方向转移,大尺度扰动能量不断增大,而小尺度扰动能量在大约 2 d 之后达到饱和,不再增长。

#### 4 不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统影响的对比分析

基于表 3 中的 4 组试验,探究在采用初值扰动的前提下不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统预报性能的影响。以仅采用初值扰动的集合预报(INI)试验结果为基准,分析 3 组采用初值扰动和随机物理扰动方案的集合预报(INI\_SPPT、

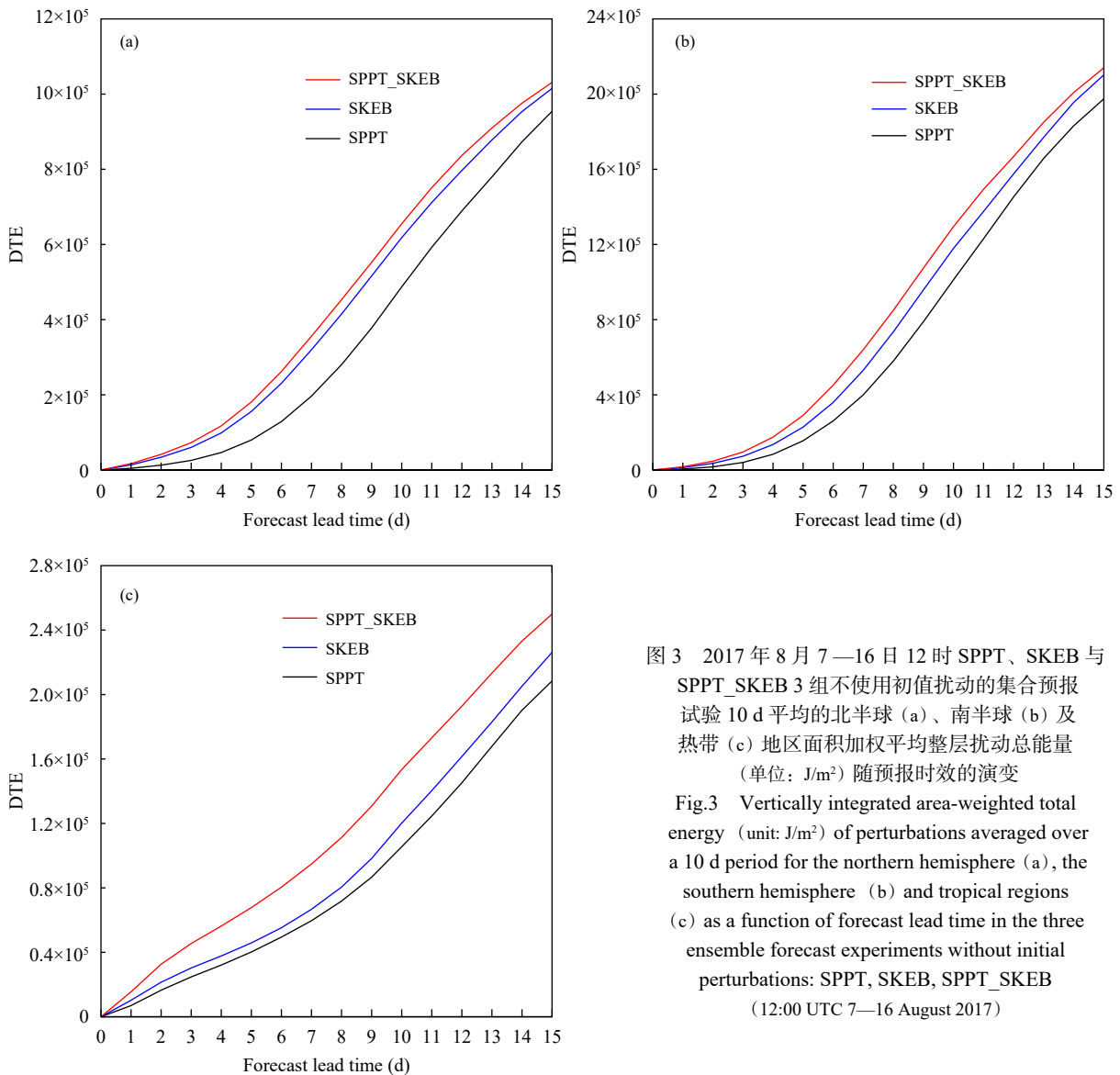


图 3 2017 年 8 月 7—16 日 12 时 SPPT、SKEB 与 SPPT\_SKEB 3 组不使用初值扰动的集合预报试验 10 d 平均的北半球 (a)、南半球 (b) 及热带 (c) 地区面积加权平均整层扰动总能量 (单位:  $J/m^2$ ) 随预报时效的演变  
Fig.3 Vertically integrated area-weighted total energy (unit:  $J/m^2$ ) of perturbations averaged over a 10 d period for the northern hemisphere (a), the southern hemisphere (b) and tropical regions (c) as a function of forecast lead time in the three ensemble forecast experiments without initial perturbations: SPPT, SKEB, SPPT\_SKEB (12:00 UTC 7—16 August 2017)

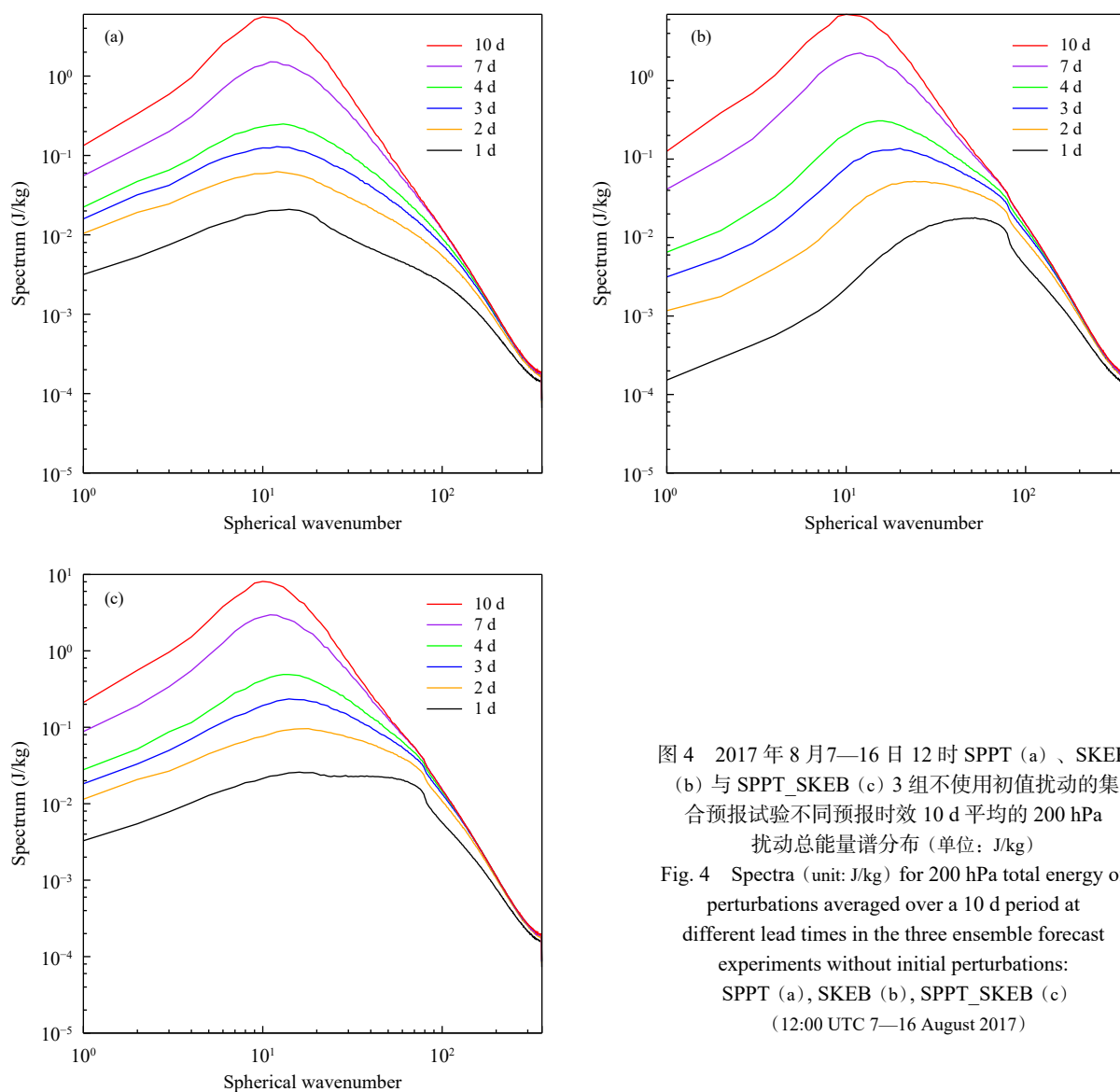


图 4 2017 年 8 月 7—16 日 12 时 SPPT (a)、SKEB (b) 与 SPPT\_SKEB (c) 3 组不使用初值扰动的集合预报试验不同预报时效 10 d 平均的 200 hPa 扰动总能量谱分布 (单位: J/kg)  
 Fig. 4 Spectra (unit: J/kg) for 200 hPa total energy of perturbations averaged over a 10 d period at different lead times in the three ensemble forecast experiments without initial perturbations: SPPT (a), SKEB (b), SPPT\_SKEB (c) (12:00 UTC 7—16 August 2017)

INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 试验结果与 INI 试验结果的差异, 主要检验分析指标包括: 集合离散度、集合平均均方根误差 (RMSE)、连续分级概率评分 (Continuous Rank Probability Score, CPRS)、预报失误率 (Outlier)、中国地区 24 h 累计降水 Brier 评分等。并且, 还使用  $t$  检验法对不同试验之间集合离散度、集合平均均方根误差、连续分级概率评分、预报失误率、Brier 评分等的差异进行水平为 95% 的显著性检验。

#### 4.1 集合离散度与集合平均均方根误差

集合离散度与集合平均均方根误差之间的关系通常用来衡量一个集合预报系统的可靠性。二者越接近, 相应集合预报系统可靠性越高。研究表

明, 仅使用初值扰动的 GRAPES-GEPS 系统存在集合离散度不足 (集合离散度小于集合平均均方根误差) 的问题 (李晓莉等, 2019b; 鹏飞等, 2019)。以仅使用初值扰动的 INI 试验结果为基准, 图 5 给出了 3 组随机物理扰动试验方案下北半球代表性等压面纬向风场、温度和位势高度的集合离散度、集合平均均方根误差与不使用随机物理扰动 INI 试验之间的差异 (INI\_SPPT 减去 INI、INI\_SKEB 减去 INI、INI\_SPPT\_SKEB 减去 INI)。可以看出, 对于 850、200 hPa 纬向风场与 850 hPa 温度场而言, 使用不同随机物理扰动方案时, 集合离散度在几乎所有预报时效上均显著增大 (差异为正), 其中 INI\_SPPT\_SKEB 试验中离散度增幅最大, INI\_SPPT 试验最小, 这与



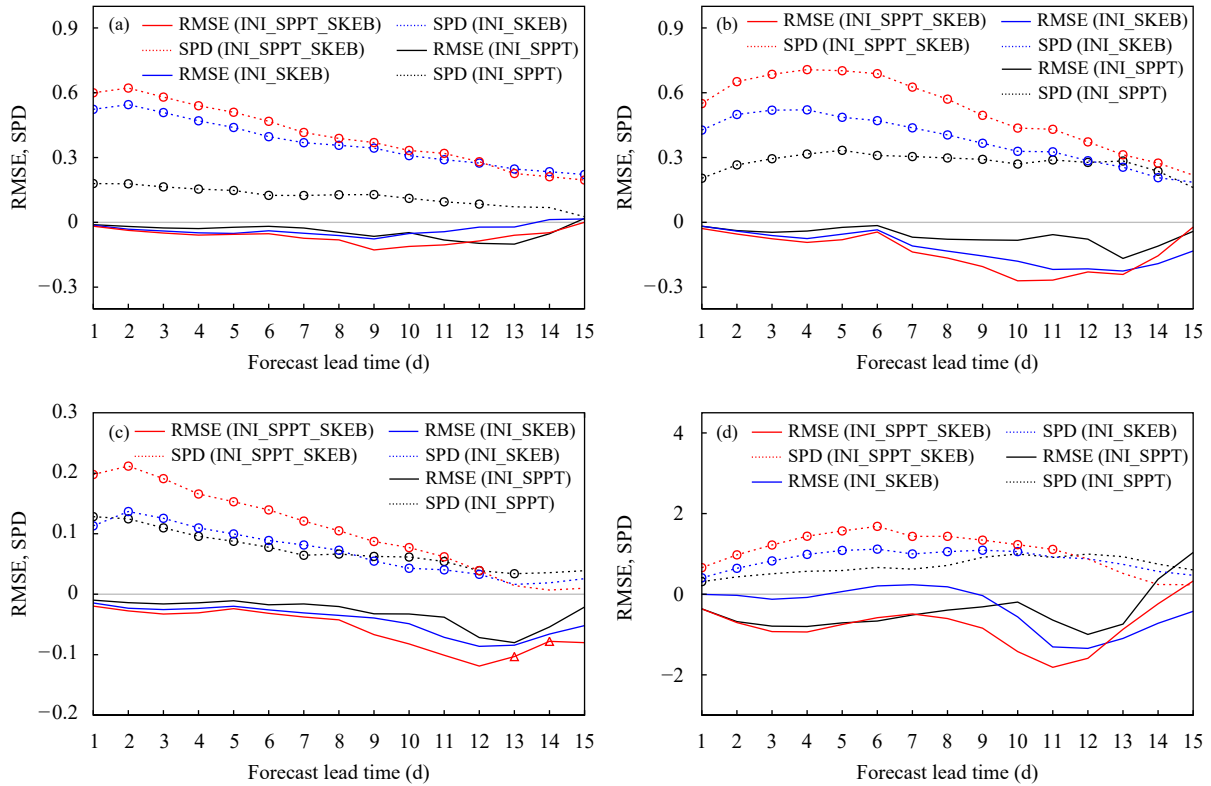


图 5 3 组使用随机物理扰动方案的集合预报试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 北半球地区 (a) 850 hPa、(b) 200 hPa 纬向风场 (单位: m/s)、(c) 850 hPa 温度场 (单位: K) 及 (d) 500 hPa 位势高度场 (单位: m) 集合平均均方根误差和集合离散度与不使用随机物理扰动方案 INI 试验之间的差异 (圆圈表示集合离散度的增大通过了显著性检验; 三角形表示集合平均均方根误差的减小通过了显著性检验)

Fig. 5 Differences in ensemble mean RMSE and ensemble SPD for (a) 850 hPa, (b) 200 hPa zonal winds (unit: m/s), (c) 850 hPa temperature (unit: K), and (d) 500 hPa geopotential height (unit: m) over the northern hemisphere between the ensemble forecast experiments with (INI\_SPPT, INI\_SKEB, and INI\_SPPT\_SKEB) and without stochastic physics (INI) (Circles indicate statistically significant increases in ensemble spread, and triangles indicate statistically significant decreases in ensemble mean RMSE)

整层扰动总能量的结果一致 (图 5a、b、c 和图 3)。采用随机物理扰动方案的 3 组试验中集合平均均方根误差有所减小 (差异为负), 但这种减小未通过显著性检验。对于 500 hPa 位势高度场, 相对于 INI 试验, 不同随机物理扰动试验的集合离散度也有所增大 (差异为正), 其中, INI\_SKEB 与 INI\_SPPT\_SKEB 试验下, 这种增大在 1 至 10 d 的预报时效上是显著的, 而在 INI\_SPPT 试验下没有通过显著性检验 (图 5d)。就集合平均均方根误差而言, 不同随机物理扰动方案对北半球的影响不大。

与图 5 类似, 图 6 为热带地区集合离散度和集合平均均方根误差的差异。很显然, 整个预报时效内, 3 组随机物理扰动试验中几乎所有变量的集合离散度均是显著增大的 (差异为正)。而且, 这种增

大在联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时最大, 对于动力场 (850、200 hPa 纬向风场) 而言, 在单独使用 SPPT 方案时最小, 对于热力场 (850、200 hPa 温度场) 而言, 在单独使用 SKEB 方案时最小。上述 SPPT 和 SKEB 方案对热带地区热力场和动力场影响的差异, 主要与各自方案本身的特点有关。虽然不同随机物理扰动方案对集合离散度的改进效果显著, 但是它们对集合平均均方根误差的影响不大 (图 6)。

#### 4.2 连续分级概率评分

对于一个集合预报系统而言, 连续分级概率评分越小, 观测和预报的累积概率分布函数之间的差异越小, 概率预报技巧越高 (Hersbach, 2000)。图 7 给出了 3 组采用随机物理扰动方案的试验 (INI\_

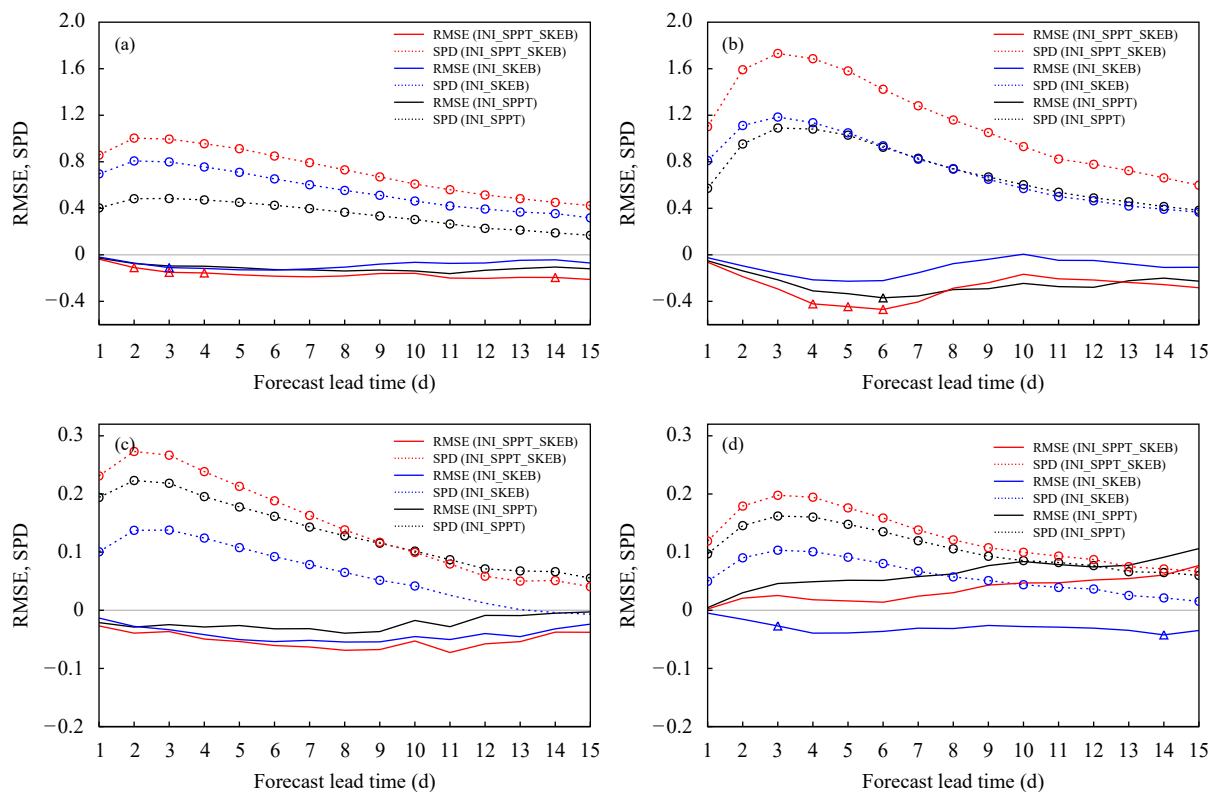


图 6 3 组使用随机物理扰动方案的集合预报试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 热带地区 (a) 850 hPa、(b) 200 hPa 纬向风场 (单位: m/s) 和 (c) 850 hPa、(d) 200 hPa 温度场 (单位: K) 集合平均均方根误差和集合离散度与不使用随机物理扰动方案 INI 试验之间的差异 (圆圈表示集合离散度的增大通过了显著性检验; 三角形表示集合平均均方根误差的减小通过了显著性检验)

Fig. 6 Differences in ensemble mean RMSE and ensemble SPD for (a) 850 hPa, (b) 200 hPa zonal winds (unit: m/s), (c) 850 hPa, and (d) 200 hPa temperature (unit: K) over the tropical region between the ensemble forecast experiments with (INI\_SPPT, INI\_SKEB, and INI\_SPPT\_SKEB) and without stochastic physics (INI) (Circles indicate statistically significant increases in ensemble spread, and triangles indicate statistically significant decreases in ensemble mean RMSE)

SPPT、INI\_SKEB 和 INI\_SPPT\_SKEB) 与 INI 试验在北半球和热带地区 850 hPa 纬向风场与温度场连续分级概率评分的差异。连续分级概率评分差异为负, 表明相对于 INI 试验, 连续分级概率评分减小, 预报技巧有提高。可以看出, 北半球, 与 INI 试验相比, 3 组使用随机物理扰动方案的试验评分均有所减小 (差异为负), 其中 INI\_SPPT\_SKEB 试验温度场的改进最显著 (图 7b); 对于纬向风场, 在预报前期, INI\_SPPT\_SKEB 试验的改进也最显著, 但预报后期, INI\_SKEB 试验纬向风场连续分级概率评分的改进呈现出减小趋势, 这导致在预报后期 INI\_SPPT\_SKEB 试验连续分级概率评分的表现与 INI\_SPPT 试验相近 (图 7a)。热带地区, 大部分预报时效上, 连续分级概率评分显著减小 (差异为负), 而且这种改进效果在联合使用 SPPT 与 SKEB

方案时最好 (图 7c、d), 说明 SPPT 与 SKEB 方案联合使用对集合预报系统概率预报技巧的改进程度最大。

### 4.3 预报失误差率

随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统的改进还体现在预报失误差率。预报失误差率表征分析 (观测) 落在预报值区间之外的平均概率, 其值越大, 说明预报失误的概率越大, 集合预报的可靠性越低 (Wang, et al, 2014)。图 8 给出了 3 组随机物理扰动方案试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB 和 INI\_SPPT\_SKEB) 与 INI 试验的预报失误差率差异。可以看到, 使用随机物理扰动方案的试验预报失误差率显著减小 (差异为负), 这说明随机物理扰动方案的引入能够使 GRAPES-GEPS 系统捕捉到“真值”的概率增加, 集合预报可靠性得到显著提高。与其他检

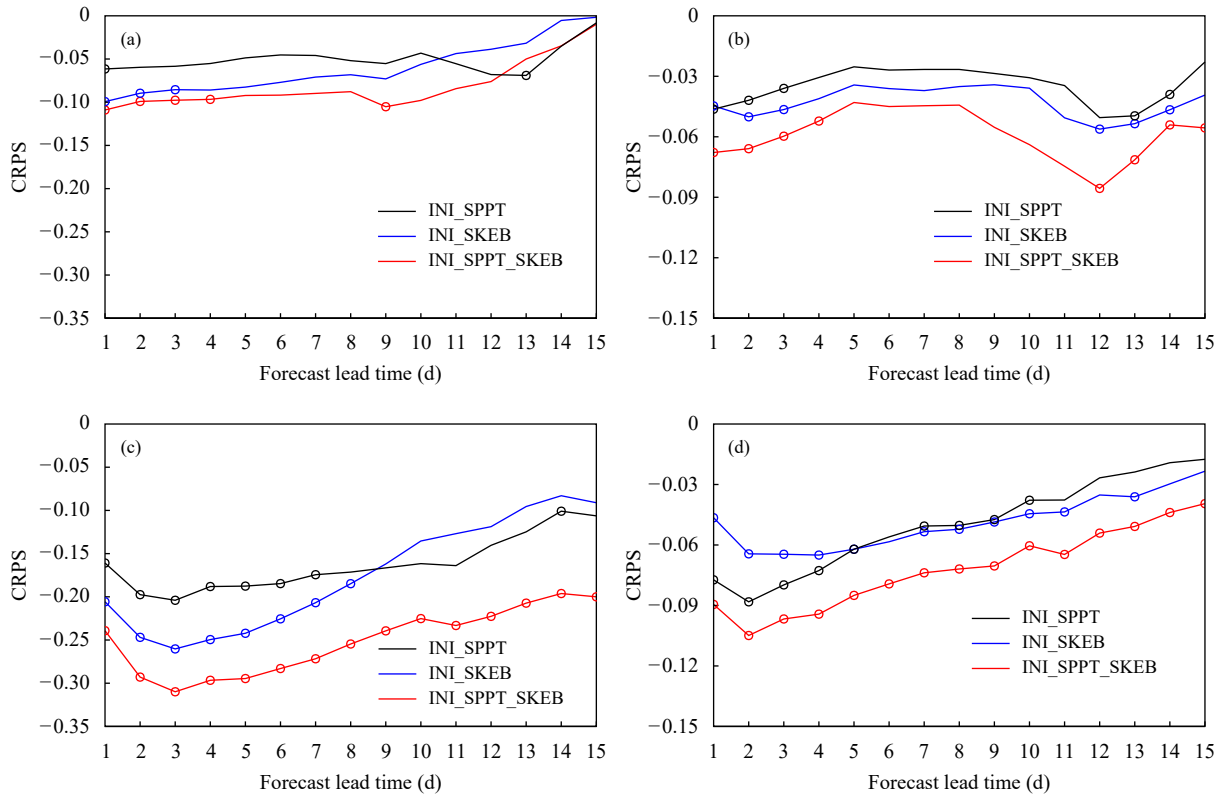


图7 3组使用随机物理扰动方案的集合预报试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 北半球地区 (a) 850 hPa 纬向风场 (单位: m/s)、(b) 850 hPa 温度场 (单位: K) 以及热带地区 (c) 850 hPa 纬向风场 (单位: m/s)、(d) 850 hPa 温度场 (单位: K) 连续分级概率评分与不使用随机物理扰动方案 INI 试验的差异 (圆圈表示连续分级概率评分的减小通过了显著性检验)

Fig. 7 Differences in CRPS score for 850 hPa (a) zonal wind (unit: m/s) and (b) temperature (unit: K) over the northern hemisphere as well as 850 hPa (c) zonal wind (unit: m/s) and (d) temperature (unit: K) over the tropical region between the ensemble forecast experiments with (INI\_SPPT, INI\_SKEB, and INI\_SPPT\_SKEB) and without stochastic physics (INI) (Circles indicate statistically significant decreases in CRPS score)

验评分的结果类似, 使用两种随机物理扰动方案的 INI\_SPPT\_SKEB 试验预报失误率改进效果最优。通过对比 SPPT 和 SKEB 方案各自的影响发现, 与前面结果类似, SPPT 方案对热带地区热力场 (温度) 的预报失误率改进更为显著, 而 SKEB 方案对热带地区动力场 (纬向风) 的改进更为显著 (图 8c、d)。两种方案综合使用存在互补, 并且可产生更优的效果。

#### 4.4 地面降水检验

采用不同量级 24 h 累计降水量的 Brier 评分进行集合预报试验的降水检验, 其中观测资料为中国地区 2400 多站的降水实测数据。Brier 评分数值越小, 表明概率预报技巧越高 (Brier, 1950)。为客观体现全球模式在中期时效降水预报能力, 文中只对 1—10 d 的预报检验结果进行分析。图 9 给出了

3 组随机物理扰动方案试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB 和 INI\_SPPT\_SKEB) 与 INI 试验 Brier 评分的差异。可以看到, 对于不同量级的降水, 相对于只有初值扰动的试验, 在 1—10 d 的预报时效内, 3 组随机物理扰动试验中 Brier 评分均减小 (差异为负, 但未通过显著性检验), 其中, INI\_SPPT\_SKEB 试验中 Brier 评分的减小最为明显。这表明, 采用随机物理扰动方案能够改善 GRAPES-GEPS 系统中国地区降水概率预报技巧, 尤其是联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时, 这种改善效果最明显。

由以上分析可知, SPPT 与 SKEB 方案表征了 GRAPES 全球模式不确定性的不同来源, 均能够增加 GRAPES-GEPS 系统的集合离散度, 并在一定程度上减小集合平均均方根误差, 尤其是在热带地区。因而, 这两种方案能够改善 GRAPES-GEPS 系

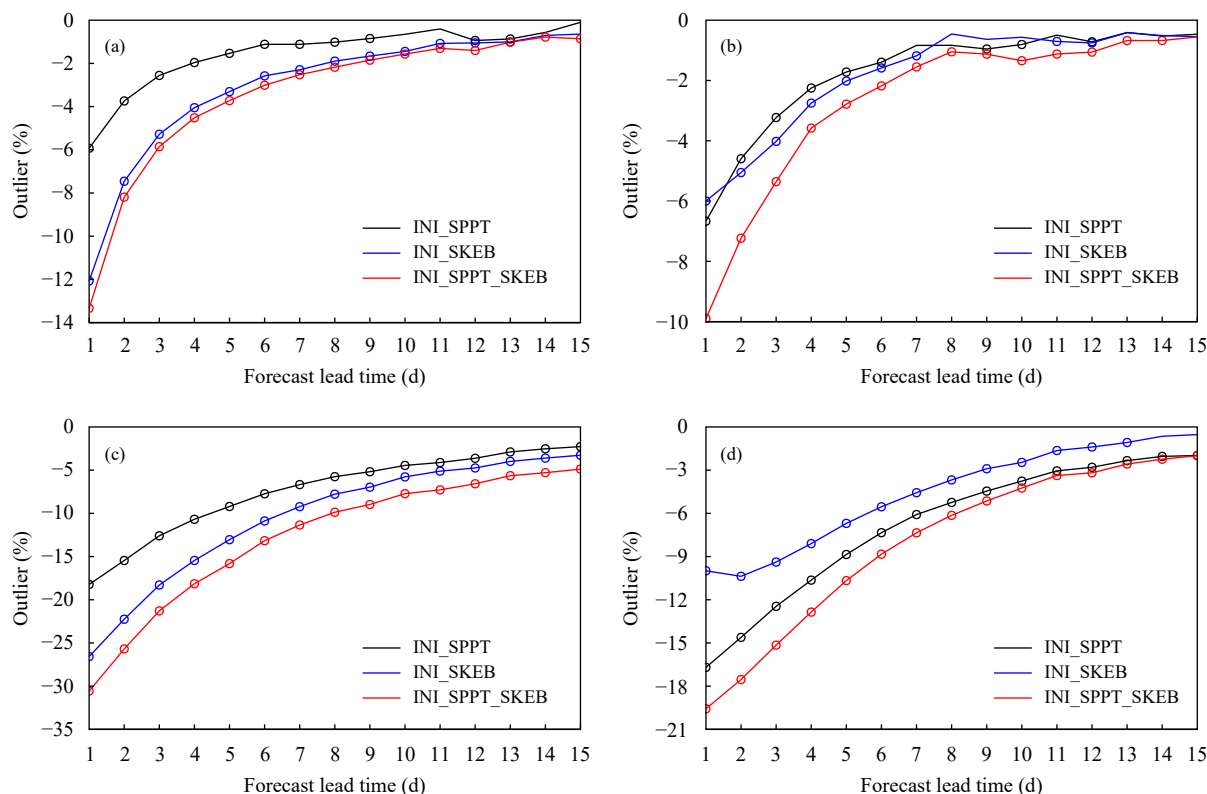


图 8 3 组使用随机物理扰动方案的集合预报试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 北半球地区 (a) 850 hPa 纬向风场、(b) 850 hPa 温度场以及热带地区 (c) 850 hPa 纬向风场、(d) 850 hPa 温度场预报失误率 (单位: %) 与不使用随机物理扰动方案 INI 试验之间的差异 (圆圈表示预报失误率的减小通过了显著性检验)

Fig. 8 Differences in Outlier (unit: %) for 850 hPa (a) zonal wind and (b) temperature over the northern hemisphere as well as 850 hPa (c) zonal wind and (d) temperature over the tropical region between the ensemble forecast experiments with (INI\_SPPT, INI\_SKEB, and INI\_SPPT\_SKEB) and without stochastic physics (INI) (Circles indicate statistically significant decreases of Outliers)

统集合离散度不足的问题。两种方案联合使用时, 能够相互补充, 更好地体现模式的不确定性, 进而产生最好的集合预报效果。

### 5 强降水个例分析

2017 年 8 月 12 日 12 时—13 日 12 时, 贵州、广西、湖南、湖北、江西及安徽一带发生了强降水过程, 多地 24 h 累计降水观测超过 100 mm (图 10a)。以此次强降水事件为例, 对比分析不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统降水预报的影响。

从仅使用初值扰动的集合预报结果来看, 虽然强降水落区与观测结果比较一致, 但是强降水落区内的降水量预报明显较小 (图 10a、b)。对比初值扰动试验结果可以看出, 采用单个随机物理扰动方案的结果 (图 10c、d), 及联合使用两个方案的结果 (图 10e) 对强降水分布范围的影响较小, 但对强降

水落区内降水量预报的改进较大, 较显著地增加了降水强度, 使得预报结果与观测更加接近, 其中 SPPT 方案对主雨带上降水强度的改进更为显著, 这可能与 SPPT 方案对造成暴雨发生的关键因素 (温度和湿度条件) 直接进行扰动有关, 进而 INI\_SPPT\_SKEB 试验中强降水量与观测更加接近。上述结果也说明, 同时使用初值扰动与多个随机物理扰动方案的 GRAPES-GEPS 系统能够有效预报此次强降水过程降水量。

### 6 结果与讨论

近年来, 随机物理扰动方案已被广泛应用于集合预报, 以表征模式不确定性, 不同随机扰动方案侧重于体现模式不同方面的不确定性。针对 GRAPE-GEPS 系统已研发的随机物理扰动方案 SPPT 和 SKEB, 文中首先设计了不使用初值扰动、仅使用随



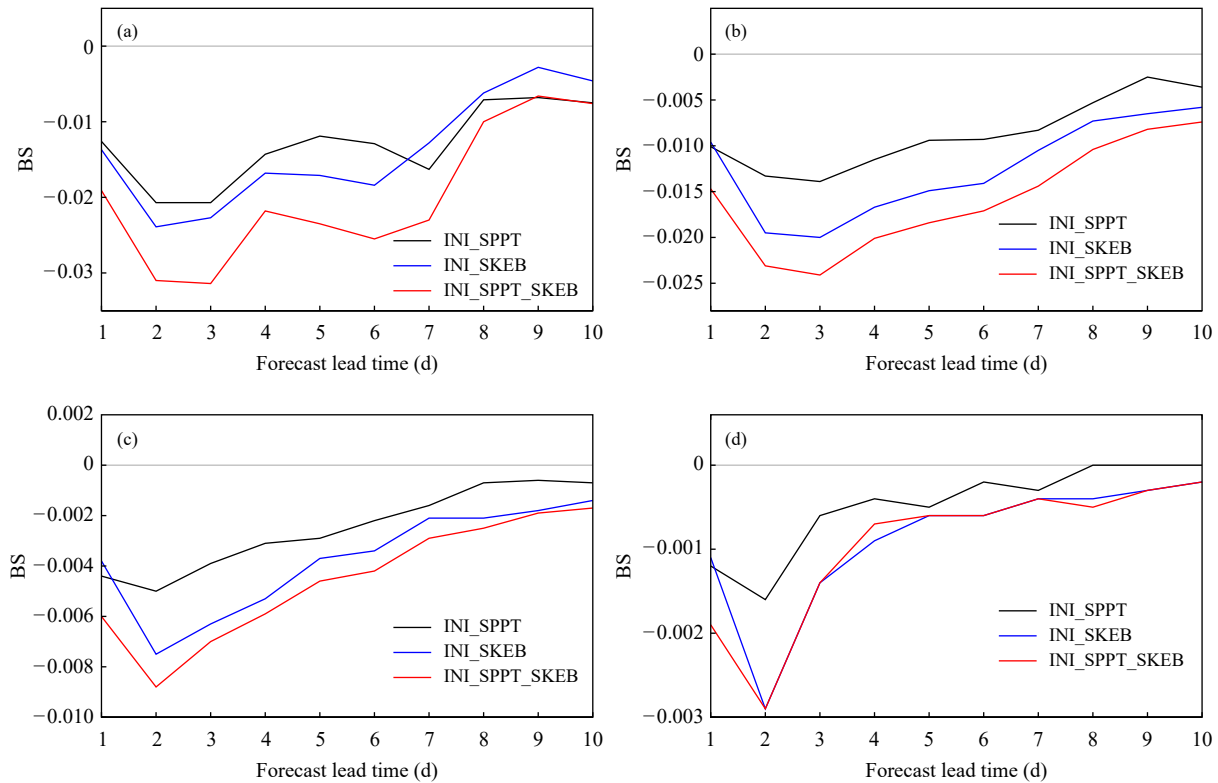


图9 3组使用随机物理扰动方案的集合预报试验 (INI\_SPPT、INI\_SKEB、INI\_SPPT\_SKEB) 中国地区不同量级 24 h 累计降水 Brier 评分与不使用随机物理扰动方案 INI 试验的差异 (a.  $\geq 0.1$  mm, b.  $\geq 10$  mm, c.  $\geq 25$  mm, d.  $\geq 50$  mm)

Fig. 9 Differences in Brier score for 24 h accumulated precipitation over China between the ensemble forecast experiments with (INI\_SPPT, INI\_SKEB, and INI\_SPPT\_SKEB) and without stochastic physics (INI) (a.  $\geq 0.1$  mm, b.  $\geq 10$  mm, c.  $\geq 25$  mm, d.  $\geq 50$  mm)

机物理扰动方案的集合预报试验,从较细致的角度分析 SPPT 和 SKEB 方案的单独使用以及联合使用所产生的扰动结构及扰动能量增长特征,以更加深刻理解不同随机物理扰动方案在 GRAPES 全球模式系统中的表现特征。此外,在采用奇异向量初值扰动的基础上,开展了分别单独使用 SPPT 和 SKEB 方案及联合使用 SPPT 和 SKEB 方案的集合预报试验,探讨不同随机物理扰动方案对 GRAPES-GEPS 系统预报性能的影响差异。得到的主要结果如下:

(1)就随机物理扰动方案本身产生的扰动,通过扰动与误差相关性分析,发现不同随机物理扰动方案下扰动对预报误差均具有一定的描述能力,而且联合使用 SPPT 与 SKEB 两种随机方案时,扰动对误差的描述能力最好,最能够捕捉大气真实的误差状态。

(2)对于随机物理扰动方案本身产生的扰动,就其发展而言,在不同随机物理扰动方案下,扰动

总能量最初主要集中在热带地区对流层中高层以及平流层低层,随着预报时效的延长,扰动总能量不断增大,其大值区不断向热带外地区转移,并且也主要集中在对流层中高层以及平流层低层。从整层扰动总能量来看,不管在热带地区还是热带外地区,SPPT\_SKEB 试验最大,SKEB 试验次之,SPPT 试验最小。从扰动总能量的谱结构可以看到,所有试验方案下,扰动能量不断升尺度发展,向大尺度方向转移,大尺度扰动能量不断增大,而小尺度扰动能量均在大约 2 d 之后达到饱和状态。

(3)与仅使用初值扰动的集合预报试验结果相比,不同随机物理扰动方案均能够显著增加 GRAPES-GEPS 系统不同地区不同等压面要素的集合离散度,并在一定程度上改善集合平均均方根误差(未通过显著性检验)。在热带地区,SKEB 方案对动力场(水平风场)集合离散度的改进优于 SPPT 方案,对热力场(温度场)集合离散度的改进不如

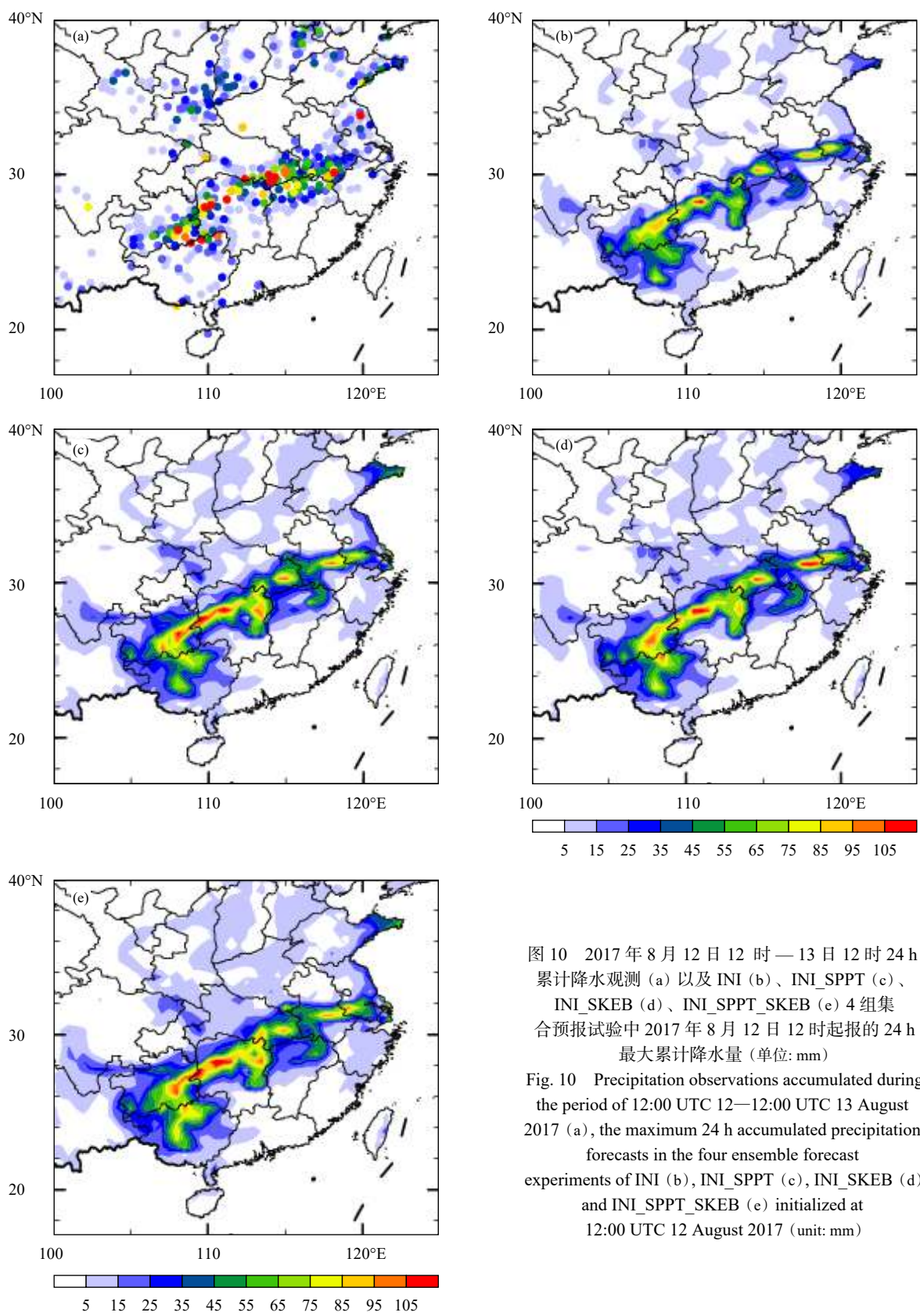


图 10 2017 年 8 月 12 日 12 时—13 日 12 时 24 h 累计降水观测 (a) 以及 INI (b)、INI\_SPPT (c)、INI\_SKEB (d)、INI\_SPPT\_SKEB (e) 4 组集合预报试验中 2017 年 8 月 12 日 12 时起报的 24 h 最大累计降水量 (单位: mm)

Fig. 10 Precipitation observations accumulated during the period of 12:00 UTC 12—12:00 UTC 13 August 2017 (a), the maximum 24 h accumulated precipitation forecasts in the four ensemble forecast experiments of INI (b), INI\_SPPT (c), INI\_SKEB (d) and INI\_SPPT\_SKEB (e) initialized at 12:00 UTC 12 August 2017 (unit: mm)

SPPT 方案, 联合使用两种方案时各自不足可得到弥补。由于离散度的增大, 预报失误率显著减小。此外, 连续分级概率评分也有所减小。以上改进均在联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时效果最优。

(4) 随机物理扰动方案能够改善 GRAPES-GEPS 系统中国地区不同量级(小雨、中雨、大雨和暴雨)降水概率预报技巧, 尤其是联合使用 SPPT 与 SKEB 方案时, 这种改善效果最好。强降水个例结果分析也表明, 虽然随机物理扰动方案对强降水落区的位置影响较小, 但能提高强降水量值的预报, 与观测更为接近。

综上, 本研究体现了联合使用不同随机物理扰动方案在提高 GRAPES-GEPS 系统预报性能方面的优势。在 GRAPES-GEPS 系统中, SKEB 和 SPPT 方案还需要进一步的改进, 如 SKEB 方案中目前局地动能耗散率的估计仅考虑了显式水平扩散方案的作用, 未来将引入深对流过程的贡献; SPPT 方案中将改进随机扰动场, 构建具有多时间和空间尺度的随机场, 以体现模式物理过程在不同尺度上的随机误差特征。此外, 目前 GRAPES-GEPS 系统中有效的随机型产生技术也提供了开展面向具体物理过程层次的随机参数化方案研究(如随机物理参数扰动方案等, Ollinaho, et al, 2017)的基础, 未来, 计划开展这方面的研究工作, 来更加全面体现 GRAPES 模式的不确定性。

## 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)
- 李晓莉, 刘永柱. 2019a. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析. *气象学报*, 77(3): 552-562. Li X L, Liu Y Z. 2019a. The improvement of GRAPES global extratropical singular vectors and experimental study. *Acta Meteor Sinica*, 77(3): 552-562 (in Chinese)
- 李晓莉, 陈静, 刘永柱等. 2019b. GRAPES 全球集合预报初始条件及模式物理过程不确定性方法研究. *大气科学学报*, 42(3): 348-359. Li X L, Chen J, Liu Y Z, et al. 2019b. Representations of initial uncertainty and model uncertainty of GRAPES global ensemble forecasting. *Trans Atmos Sci*, 42(3): 348-359 (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)
- 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)
- 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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 77(2): 180-195 (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 GRAPES Numerical Prediction System. Beijing: Science Press, 383pp (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 Atmos Sci*, 66(3): 603-626
- 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
- Bouttier F, Vié B, Nuissier O, et al. 2012. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Mon Wea Rev*, 140(11): 3706-3721
- Brier G W. 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon Wea Rev*, 78(1): 1-3
- 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
- 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
- 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
- ECMWF. 2016. ECMWF/WWRP Workshop Model Uncertainty. Reading, UK: ECMWF
- Epstein E S. 1969. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 21(6): 739-759
- Hersbach H. 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Wea Forecasting*, 15(5): 559-570
- Jankov I, Berner J, Beck J, et al. 2017. A performance comparison between multiphysics and stochastic approaches within a North American Rap ensemble. *Mon Wea Rev*, 145(4): 1161-1179
- Jankov I, Beck J, Wolff J, et al. 2019. Stochastically perturbed parameterizations in an HRRR-based ensemble. *Mon Wea Rev*, 147(1):

- 153-173
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of monte carlo forecasts. *Mon Wea Rev*, 102(6): 409-418
- Magnusson L, Nycander J, Källén E. 2009. Flow-dependent versus flow-independent initial perturbations for ensemble prediction. *Tellus A Dyn Meteor Oceanogr*, 61(2): 194-209
- 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, Buizza R, Doblas-Reyes F, et al. 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty. ECMWF Tech Memo, 598, 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
- Qiao X S, Wang S Z, Min J Z. 2017. A stochastic perturbed parameterization tendency scheme for diffusion ( SPPTD) and its application to an idealized supercell simulation. *Mon Wea Rev*, 145(6): 2119-2139
- Qiao X S, Wang S Z, Min J Z. 2018. The impact of a stochastically perturbing microphysics scheme on an idealized supercell storm. *Mon Wea Rev*, 146(1): 95-118
- Shutts G. 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *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. *Mon Wea Rev*, 139(4): 1190-1206
- Wang S Z, Qiao X S, Min J Z, et al. 2019. The impact of stochastically perturbed parameterizations on tornadic supercell cases in East China. *Mon Wea Rev*, 147(1): 199-220
- Wang Y, Bellus M, Geleyn J F, et al. 2014. A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: Blending. *Mon Wea Rev*, 142(5): 2043-2059
- Wei M Z, Toth Z. 2003. A new measure of ensemble performance: Perturbation versus error correlation analysis ( PECA). *Mon Wea Rev*, 131(8): 1549-1565
- Weisheimer A, Corti S, Palmer T, et al. 2014. Addressing model error through atmospheric stochastic physical parametrizations: Impact on the coupled ECMWF seasonal forecasting system. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 372(2018): 20130290
- Xu Z Z, Chen J, Jin Z, et al. 2020. Representing model uncertainty by multi-stochastic physics approaches in the GRAPES ensemble. *Adv Atmos Sci*, 37(4): 328-346
- 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
- Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2003. Effects of moist convection on mesoscale predictability. *J Atmos Sci*, 60(9): 1173-1185