

高分辨率区域集合预报混合侧边界扰动方法研究

王婧卓^{1, 2, 3} 李红祺^{1, 2, 3} 陈静^{1, 2, 3} 徐致真^{1, 2, 3} 姚梦颖⁴

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局地球系统数值预报重点开放实验室, 北京 100081

4 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008

摘要: 受限有限区域, 侧边界扰动是区域集合预报的主要扰动方法之一。然而, 如何为中国气象局高分辨率区域集合预报构建侧边界扰动以提高预报技巧仍不明确。本文利用中国气象局全球集合预报扰动场及区域确定性模式的侧边界场, 开发了一种混合侧边界扰动方法, 并通过动态扰动系数调整扰动振幅。结果表明, 无侧边界扰动会抑制预报后期扰动能量的增长, 导致集合离散度不足。混合侧边界扰动方案可提高中 α 和大尺度的扰动能量谱, 改进等压面要素和降水的离散度技巧和概率预报技巧。与混合侧边界扰动方案相比, 动态混合侧边界扰动方案能增加 100 km 以上的波谱能量, 提高离散度技巧关系和低层要素及预报 24 h 以后的降水概率预报技巧, 显示出良好的业务应用潜力。

关键词: 高分辨率区域, 集合预报, 混合侧边界扰动, 动态扰动系数, 离散度技巧关系

中图分类号: P435

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.041401

Research on the mixed lateral boundary perturbation method for high-resolution regional ensemble prediction

Wang Jingzhuo^{1, 2, 3} Li Hongqi^{1, 2, 3} Chen Jing^{1, 2, 3} Xu Zhizhen^{1, 2, 3} Yao Mengying⁴

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, CMA, Beijing 100081

3 Key Laboratory of Earth System Modeling and Prediction, CMA, Beijing 100081

4 Zhejiang Institution of Meteorological Science, Hangzhou 310008

国家自然科学基金项目 (U2242213, 42105154) 共同资助

第一作者: 王婧卓, 主要从事集合预报研究. E-mail: 15510166003@163.com

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

Abstract: Due to the limitations of the limited area, lateral boundary perturbations are one of the primary perturbation methods for regional ensemble prediction. However, it remains unclear how to construct lateral boundary perturbations for the high-resolution regional ensemble prediction system of the China Meteorological Administration (CMA) to improve forecast skill. This paper develops a mixed lateral boundary perturbation method using the perturbation field of the CMA global ensemble prediction and lateral boundary field of the regional deterministic model, and adjusts the perturbation magnitude through dynamic perturbation coefficients. The results showed that the absence of lateral boundary perturbations suppresses the growth of perturbation energy at later forecast ranges, leading to insufficient ensemble spreads. The mixed lateral boundary perturbation scheme can enhance the perturbation energy spectra at meso- α and large scales, as well as improve the spread-skill relationships and probabilistic forecast skills for isobaric element and precipitation. Compared to the mixed lateral boundary perturbation scheme, the dynamic mixed lateral boundary perturbation scheme can enhance the spectral energy above 100 km, improve the spread-skill relationships, as well as the probabilistic forecast skills for low-level variables and precipitation beyond 24 hours, exhibiting good potential for operational application.

Keywords: high-resolution region, ensemble prediction, mixed lateral boundary perturbation, dynamic perturbation coefficient, spread-skill relationship

引言

由于大气运动的非线性混沌特征、初值误差、模式误差、有限区域模式的侧边界误差, 确定性数值预报模式不可避免地存在较大的预报误差或预报不确定性 (Lorenz, 1963; 杜钧和陈静, 2010; 王明欢等, 2021; 韩雨盟等, 2023; 彭飞等, 2023), 且高分辨率模式的误差增长快、非线性强, 其预报不确定性比低分辨率模式更大 (Hohenegger and Schar, 2007; Gebhardt et al, 2011)。集合预报是解决预报不确定性的一种有效方法, 可提供预报误差的概率分布 (王婧卓等, 2018a; Frogner et al, 2019; 潘贤等, 2021; 岳健等, 2023)。随着计算机资源的增加, 2~4 km 水平分辨率的区域集合预报系统应运而生, 其可有效地模拟湿对流过程, 进而提高对强对流天气的预报能力 (Clark et al, 2018; Klasa et al, 2018; Yang et al, 2023)。高分辨率区域集合预报模式已成功应用到德国、英国、美国、法国等全球多个业务数值天气预报中心 (Golding et al, 2014; Gallo et al, 2017; Hagelin et al, 2017; Schellander-Gorgas et al, 2017)。

高分辨率区域集合预报的关键是如何采用合理的扰动方法来描述数值预报模式的多源误差 (Vié et al, 2011; Raynaud and Bouttier, 2016)。目前, 已有大量学者针对高分辨率区域集合预报的初值扰动和模式扰动方法开展了相关研究 (Lawson and Gallus, 2016; Wastl et al, 2019; Zhang, 2019; Ono et al, 2021; Xu et al, 2022; 张涵斌等, 2022; Wang et al, 2023a, 2024), 从预报时效、天气类型、变量、扰动尺度等多个角度分析了初值扰动和模式扰动对高分辨率区域集合预报的影响, 且有针对性地构建了适用于该系统的初值和模式扰动方法, 并揭示了两者的相互作用机制等。除初值扰动和模式扰动外, 受限有限区域, 侧边界扰动也是高分辨率区域集合预报的一种主要扰动方法 (Peralta et al, 2012)。2~4 km 水平分辨率的集合预报模式由于更高的分辨率和更小的预报范围, 其对侧边界扰动的敏感性要高于中尺度集合预报模式 (庄潇然等, 2017)。侧边界扰动方法主要包括两类, 第一类方法是采用全球或区域集合预报动力降尺度产生侧边界扰动 (Storto and Randriamampianina, 2010; 张涵斌等, 2017; 庄潇然等, 2017), 以获得大尺度不确定性信息, 该类方法是各大数值预报中心的主流方法 (Vié et al, 2011; Caron et al, 2013)。第二类是尺度化滞后平均法 (Hou et al, 2001; Kong et al, 2007)。范宇恩等 (2019) 对比了两类侧边界扰动方法, 结果表明, 动力降尺度侧边界扰动方法的等压面要素和地面要素的集合预报技巧要明显优于尺度化滞后平均法, 即动力降尺度构造的侧边界扰动更加合理。

侧边界扰动对区域集合预报的影响研究已有很多。大量研究 (Hou et al, 2001; Nutter et al, 2004a, b) 表明, 如果没有引入侧边界扰动, 区域模式的离散度会较低, 而引入侧边界扰动可提高集合预报的离散度, 同时, 侧边界扰动可降低集合平均均方根误差 (Saito et al, 2012)。侧边界扰动对集合预报的影响不仅与预报时效有关 (Gebhardt et al, 2011; Vié et al, 2011; Marsigli et al, 2014), 也与误差传播速度和区域大小有关 (Peralta et al, 2012), 具体而言, 侧边界扰动的影响随着预报时效的延长而逐渐增加, 随着区域的减小而增加。另外, 侧边界扰动对集合预报的影响具有环流依赖性, 即侧边界扰动对强强迫个例的影响大于对弱强迫个例的影响 (Zhang et al, 2023)。

中国气象局区域集合预报系统 (CMA-REPS) 是由地球系统数值预报中心自主研发的, 其确定性模式为中国气象局中尺度模式 (CMA-MESO) (王婧卓等, 2021)。鉴于侧边界扰动对高分辨率区域集合预报的影响, 如何构建适用于 CMA-REPS 模式的侧边界扰动方法, 描述 CMA-MESO 的侧边界不确定性, 并实现较好的离散度技巧关系是本文的研究重点。鉴于此, 本文充分利用中国气象局全球集合预报系统 (CMA-GEPS) 扰动场信息及确定性模式

84 CMA-MESO 的侧边界场，构建了混合侧边界扰动方法，并采用动态扰动系数调整方案对侧
85 边界扰动大小进行约束，以期获得较好的集合预报离散度技巧关系。开展本研究有利于加深
86 对侧边界扰动对高分辨率区域集合预报影响的认识，并构建合理且业务可行的侧边界扰动方
87 法及 CMA-REPS 系统，进而提高集合预报的离散度技巧关系和概率预报技巧。

88 1 模式和方法

89 1.1 CMA-REPS V4.0 简介

90 基于确定性模式 CMA-MESO V5.1 版本，中国气象局地球系统数值预报中心发展了 3 km
91 水平分辨率的中国气象局区域集合预报模式 CMA-REPS V4.0 版本，已于 2024 年 11 月实现
92 业务化升级。CMA-MESO 模式具有全可压非静力平衡的动力框架、半隐式半拉格朗日时间
93 平流方案、水平 Arakawa-C 网格、垂直地形追随坐标（于翥等, 2018）。CMA-REPS V4.0 模
94 式参数配置如表 1，垂直层次 51 层，预报时效 72h，模拟范围覆盖中国区域（10°~60.1°N,
95 70°~145°E）。CMA-REPS V4.0 控制预报初值和侧边界来源于 0.5°×0.5°分辨率的美国国家
96 环境预报中心全球预报系统（NCEP-GFS）（于翥等, 2018; 陈静等, 2022）。集合成员同化分
97 析系统采用常规观测资料扰动、三维变分（3DVAR）资料同化、云分析方案（朱立娟等, 2017）。
98 CMA-REPS V4.0 初值扰动采用多尺度奇异向量最优谱截断混合初值扰动（叶璐等, 2020; Liu
99 et al, 2024）与观测资料扰动（张涵斌等, 2022）组合的方法，模式扰动采用随机物理倾向扰
100 动方案（袁月等, 2016; Xu et al, 2022），侧边界扰动采用混合侧边界扰动方法，集合成员数
101 为 15 个，包括 1 个控制预报和 14 个扰动成员。

102 表 1 CMA-REPS V4.0 模式的参数配置

103 Table 1 The parameter configuration of CMA-REPS V4.0 model

参数	配置
控制预报模式	CMA-MESO V5.1
水平分辨率/垂直层次	0.03 度/51 层
预报区域	中国区域（10~60.1° N, 70~145° E）
控制预报初值和侧边界	NCEP-GFS
集合成员同化分析系统	常规观测资料扰动、三维变分、云分析
初值不确定性	多尺度奇异向量最优谱截断混合初值扰动、观测资料扰动
模式不确定性	随机物理过程倾向扰动方法
侧边界不确定性	混合侧边界扰动方案

1.2 混合侧边界扰动方法

CMA-REPS V4.0 控制预报侧边界来源与 CMA-MESO 一致, 为 NCEP-GFS。同时, 为表征 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的 CMA-GEPS 的预报不确定性, 构建了混合侧边界扰动方法。即提取 CMA-GEPS 扰动成员相对于控制预报的全球背景预报扰动场, 乘以侧边界扰动系数, 并加在控制预报全球背景驱动数据上构造全球混合背景场, 并通过动力降尺度的方式得到各成员的侧边界集合, 具体如式 (1) 和式 (2) 所示。侧边界扰动变量为纬向风 u 和经向风 v 。

$$BP_i = BG_i - BG_0 \quad i = 1, 2, 3 \dots 14 \quad (1)$$

$$B_i = B_0 + BP_i \times r(k) \quad i = 1, 2, 3 \dots 14 \quad (2)$$

式中: i 代表第 1~14 个扰动成员, BG_i 为扰动成员 i 的全球背景场, BG_0 为控制预报的全球背景场, BP_i 为全球背景预报扰动场, $r(k)$ 为第 k 层等压面的侧边界扰动系数, B_0 为 CMA-REPS V4.0 控制预报的背景场 (来自于 NCEP-GFS), B_i 为 CMA-REPS V4.0 所需的全球混合背景场。

基于上述方案, 进一步根据 CMA-REPS V4.0 模式历史的集合平均均方根误差 (RMSE) 和集合离散度关系构建了一套动态混合侧边界扰动方案, 以实现高分辨率区域集合预报集合离散度与均方根误差之间具有较好的一致性。该方案是在模式积分后运行。在这里需要指明的是, 计算集合平均均方根误差时, 以控制预报的分析场作为真值, 考虑到业务时效性问题, 对于某一起报时次, 只能获得起报时次前 3d (72 h, 对应模式预报时效) 预报的均方根误差。动态混合侧边界扰动方案计算流程如下: (1) 计算起报时次前 13~3d (每日两个时次, 00 时和 12 时) 不同垂直层次、不同预报时效 (不包括初始时刻, 因为初始时刻扰动大小主要是由初值扰动所影响) 的纬向风 u 、经向风 v 的集合平均均方根误差和集合离散度; (2) 计算均方根误差和离散度的比值, 并将比值进行预报时效、10d (20 个时次)、2 个变量的平均, 得到不同垂直层次的侧边界扰动系数 $r(k)$, 用于下一时次起报的混合侧边界扰动方案构建 (式 (1) 和式 (2))。第 k 层的 $r(k)$ 计算公式如式 (3) 所示:

$$r(k) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{20} \sum_{ini=1}^{20} \frac{1}{nt} \sum_{fcst=1}^{nt} \left(\frac{RMSE_u(k, ini, fcst)}{spread_u(k, ini, fcst)} + \frac{RMSE_v(k, ini, fcst)}{spread_v(k, ini, fcst)} \right) \quad (3)$$

式中: $RMSE_u(k, ini, fcst)$ 和 $RMSE_v(k, ini, fcst)$ 分别为第 k 层等压面 ($k=1 \sim 26$, 对应 1000~10 hPa)、第 $fcst$ 预报时效 ($nt=5$, 即 72 h 预报时效除以 RMSE 计算间隔 12 h, 再

减去起报时次)、第 ini 起报时次 ($ini=10d$, 即 20 个时次) 的 CMA-REPS V4.0 模式的纬向风 u 和经向风 v 的集合平均均方根误差, $spread_u(k, ini, fcst)$ 和 $spread_v(k, ini, fcst)$ 为对应的纬向风 u 和经向风 v 的集合离散度。

图 1 给出了不同垂直层次的侧边界扰动系数分布。根据其定义可知, 理想情况下, $r(k)$ 的值应为 1, 即集合离散度与集合平均均方根误差相等。然而, 从图 1 中可以看出, $r(k)$ 在所有垂直层次上均大于 1, 说明集合平均均方根误差远大于集合离散度, 这在国际上大多数集合预报系统中是较为普遍的现象 (McCollor and Stull, 2009; Garcia-Moya et al, 2011)。另外, 高层变量的离散度技巧关系更差, 这可能与扰动方案对高层变量不确定性的捕捉能力不足, 或者高层变量存在较大的系统性误差有关 (Wang et al, 2018), 未来需进一步研究。

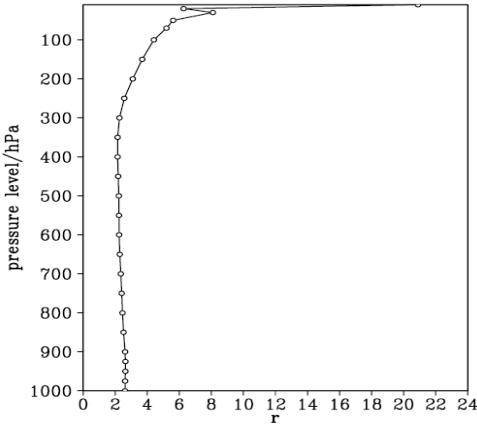


图 1 2024 年 7 月 1 日 12 时起报时次所用的混合侧边界扰动系数的垂直分布

Fig.1 The vertical distribution of the mixed lateral boundary perturbation coefficient used at the initialization time of 12 UTC 1 July 2024

1.3 试验设计和检验指标

为揭示侧边界扰动对高分辨率区域集合预报的影响, 并构造合理的集合预报侧边界扰动方案, 共设计了 3 组对比试验, 具体见表 2。本研究的主要目的有两方面, 一是通过对比 no_BP 试验和 BP 试验, 进一步揭示混合侧边界扰动方案相比于无侧边界扰动方案的作用; 二是通过对比 BP 试验和 BP_rescale 试验, 阐述动态混合侧边界扰动方案相比于混合侧边界扰动方案的优势。在这里需要说明的是, 为单独说明侧边界扰动的作用, 不同试验均采用相同的初值扰动和模式扰动方案。

表 2 侧边界扰动试验设计

Table 2 The experimental design of lateral boundary perturbations

名称	方案
----	----

无侧边界扰动试验 (no_BP)	无侧边界扰动, 只有初值和模式扰动
混合侧边界扰动试验 (BP)	混合侧边界扰动, 扰动系数固定, 不同垂直层次均为 1
动态混合侧边界扰动试验 (BP_rescale)	混合侧边界扰动, 扰动系数动态调整

149

150

151 本文对扰动能量演变特征、等压面要素和降水的离散度技巧关系、概率预报技巧进行了

152 检验。差异总能量 (DTE)、整层扰动能量 (RMDTE)、扰动谱分布 (Nielsen and Schumacher,

153 2016; 马雅楠等, 2023) 用来表征扰动能量的演变特征; RMSE、集合离散度、集合一致性

154 (RMSE 与集合离散度的比值, 一致性越接近于 1, 集合预报离散度技巧关系越好) (Du et al,

155 2014)、连续分级概率预报技巧评分 (CRPS) (Bröcker, 2012) 用来检验等压面要素的集合预

156 报技巧; 误差分数技巧评分 (eFSS) 和离散分数技巧评分 (dFSS) (Dey et al, 2014) 指标用

157 来评估降水的离散度技巧关系, 邻域降水概率预报技巧评分 (Brier) (Wang et al, 2022) 用

158 来评估降水的概率预报技巧。具体的检验指标公式可参考以往研究 (Wang et al, 2022, 2023a,

159 b)。

160 采用 CMA-meso 模式的分析场作为等压面要素检验的真值; 采用 5 km 水平分辨率的地

161 面-卫星-雷达三源融合降水格点数据作为降水检验的真值, 并通过双线性插值方法将其转换

162 到 3 km 水平分辨率的模式网格中 (潘昞等, 2015)。

163 本文对 2024 年 6 月 30 日 00 时、12 时及 7 月 1 日 00 时、12 时进行了连续 4 个时次的

164 预报。受高空槽、低空急流等共同影响 (霍达等, 2024), 此时段出现了强降水过程 (图 2),

165 主雨带呈东北—西南走向, 安徽、湖北、湖南、江西、贵州、广西等地均出现强降水。文中

166 检验结果均为 4 个时次预报统计平均的结果。

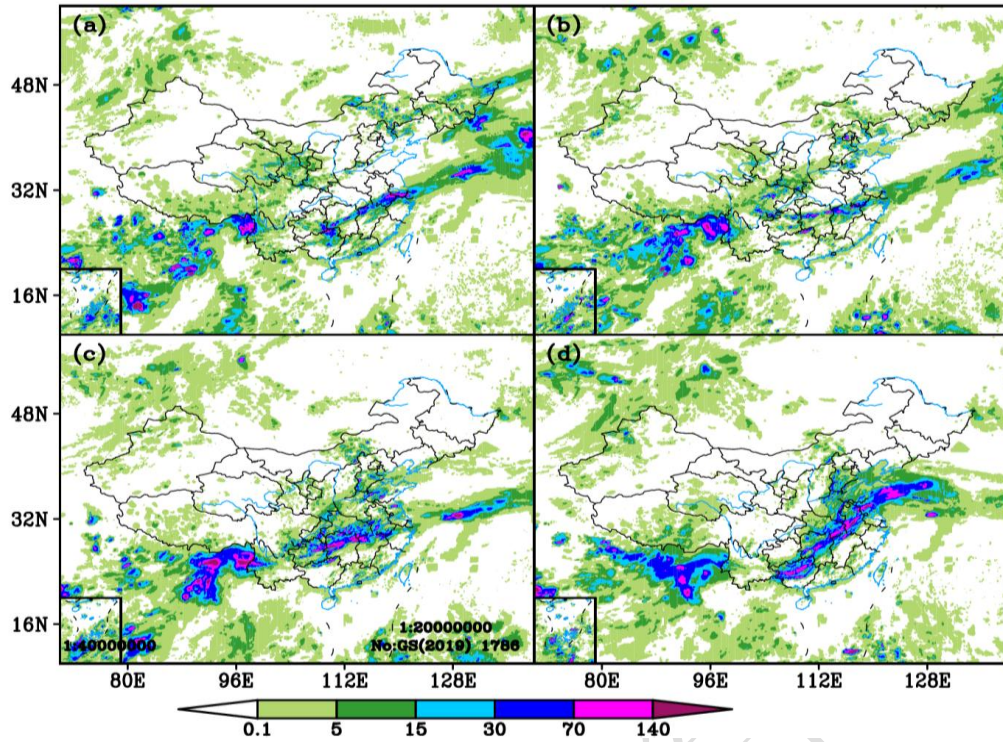


图 2 2024 年 (a) 6 月 30 日 00—12 时, (b) 6 月 30 日 12 时至 7 月 1 日 00 时, (c) 7 月 1 日 00 时—12 时, (d) 7 月 1 日 12 时至 2 日 00 时的 12 h 累计降水量观测

Fig. 2 The 12 h accumulated precipitation (a) from 00 UTC to 12 UTC 30 June, (b) from 12 UTC 30 June to 00 UTC 1 July, (c) from 00 UTC to 12 UTC 1 July, (d) from 12 UTC 1 to 00 UTC 2 July

2 扰动能量演变特征

2.1 扰动能量谱特征

图 3 给出了不同预报时效集合成员平均的 500 hPa 的 DTE 能量谱分布。能量谱分布可给出扰动的尺度分布特征。no_BP 与 BP 试验对比结果表明, 无侧边界扰动试验的扰动总能量谱最小, 加入侧边界扰动有利于提高扰动总能量谱, 尤以预报中后期的扰动能量谱提高最为显著, 说明侧边界扰动对高分辨率区域集合预报的影响随着预报时效的延长而逐渐增加, 与前人的研究结果相吻合。另外, 混合侧边界扰动试验可明显提高无侧边界扰动试验在波长 100 km 以上的 DTE 能量谱, 这与混合侧边界扰动试验相比于无侧边界扰动试验的 DTE 能量谱增长率在不同波长分布是吻合的 (图略), 说明侧边界扰动有利于提高中 α 和大尺度波长范围内的扰动能量。侧边界扰动主要对较大尺度波长范围的扰动能量有影响, 这是因为该扰动来自于全球集合预报动力降尺度形成, 只能分辨相对大尺度的扰动信息, 与以往研究(庄潇然等, 2017; 范宇恩等, 2019; Zhang et al, 2023) 结论是一致的。BP 与 BP_rescale 试验的对

比结果说明, 动态混合侧边界扰动试验可进一步提高混合侧边界扰动试验在波长 100 km 以上的波谱能量, 即在保持小尺度扰动能量基本不变的情况下, 进一步增加了大尺度扰动能量。其他垂直层次的 DTE 能量谱分布类似, 不再赘述。

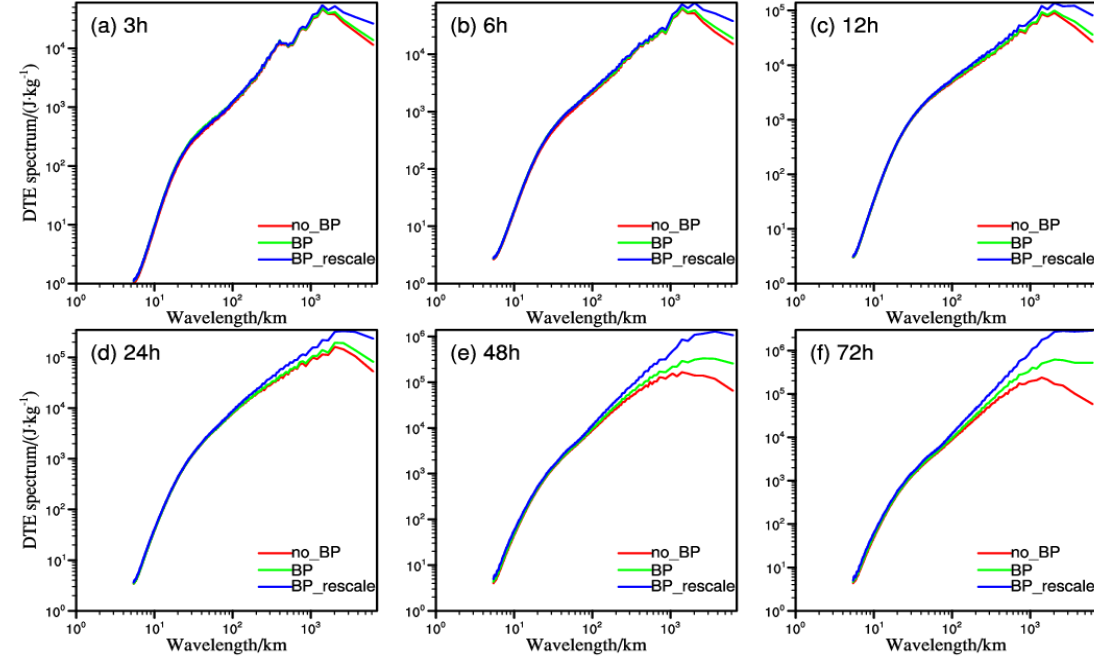


图 3 4 个预报时效平均的不同预报时效集合成员平均的 500 hPa 的 DTE 能量谱随波长的变化
Fig. 3 Variation of ensemble member-averaged DTE spectrum at 500 hPa with wavelength for different forecasting lead times , averaged over four forecasting times

为了表征扰动能量的增长特征, 采用 Lyapunov 指数增长率 (Kay and Kim, 2014; Wang et al, 2021) 计算 DTE 能量谱随预报时效的增长率。由图 4 可见, 对 3 组侧边界扰动试验而言, 在前 6 h 小尺度扰动快速增长, 随着预报时效增加, 扰动增长率逐渐降低, 甚至在波长 50 km 以下范围内为负值, 即小尺度扰动在预报初期快速增长, 随后达到饱和。对 100 km 以上的中 α 尺度和大尺度波长而言, 无侧边界扰动试验在预报初期的 DTE 能量谱增长率较大, 随着预报时效增加, 增长率逐渐降低并趋近于 0。这说明无侧边界扰动的能量谱在预报初期 (前 36 h) 随预报时效增加而逐渐增长, 即扰动逐渐发展, 但是在预报后期, 扰动能量谱增长缓慢, 即高分辨率区域集合预报没有加入侧边界扰动会抑制预报后期扰动能量的增长。然而, 两组侧边界扰动试验的扰动能量谱增长率均为正值, 且大于无侧边界扰动试验的能量谱增长率, 说明侧边界扰动可促进扰动能量的增长, 且动态混合侧边界扰动方案相比于混合侧边界扰动方案在大尺度波长内的能量谱增长率更快, 即扰动发展更快。

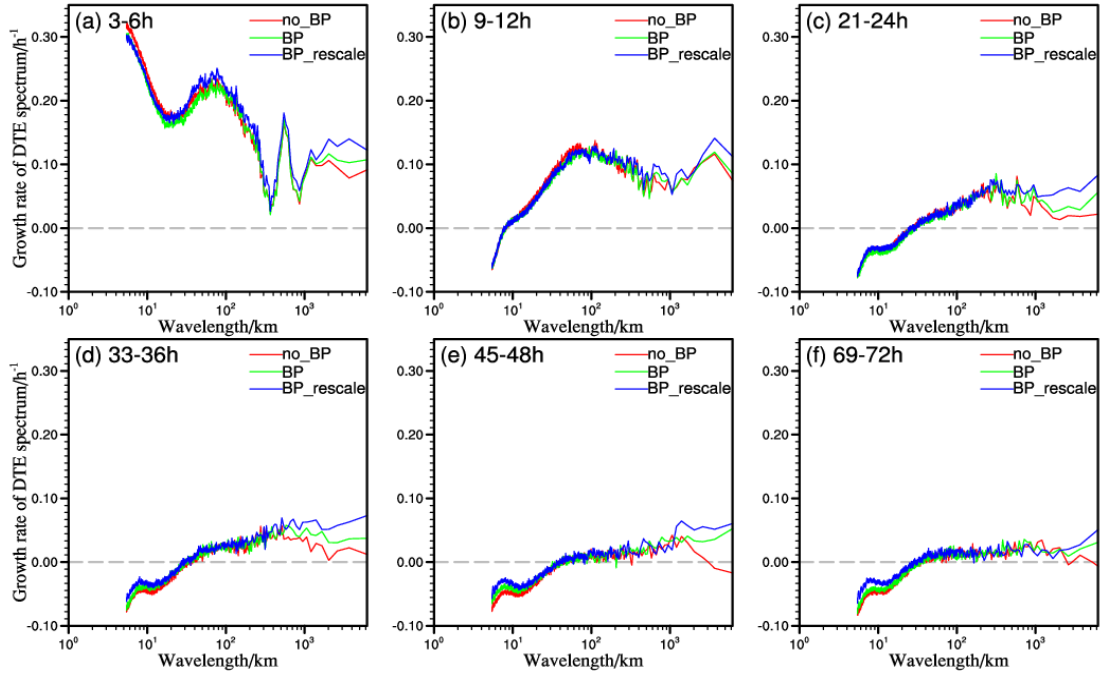


图 4 4 个预报时次平均的不同预报时效集合成员平均的 500 hPa 的 DTE 能量谱增长率随波长的变化

Fig. 4 Variation of the growth rate of the ensemble member-averaged DTE spectrum at 500 hPa with wavelength for different forecasting lead times , averaged over four forecasting times

2.2 扰动能量特征

为表征扰动能量的水平分布特征，图 5 给出了不同预报时效 500hPa 的 DTE 水平分布。从图中可见，3 组方案的扰动总能量随着预报时效增加均呈增长趋势，即扰动能量逐渐发展，且扰动总能量水平分布大值区基本相当，如在 12 h 预报时效，扰动总能量大值区均分布在侧边界及中国东北和华北区域。no_BP 与 BP 试验的对比结果表明，在 3 h 预报时效下，混合侧边界扰动试验相比于无侧边界扰动试验的扰动总能量有所增加，且增量主要集中在模拟区域的边界处，即侧边界扰动在预报初期主要作用在模式的侧边界处，随着预报时效的延长，侧边界扰动向中心区域扩展，带来整个区域的扰动能量增量。BP 与 BP_rescale 试验的对比结果表明，动态混合侧边界扰动试验的扰动总能量要大于混合侧边界扰动试验，尤以预报中后期扰动能量增加最为显著。扰动能量的垂直分布特征与水平分布特征结论一致，不再赘述。

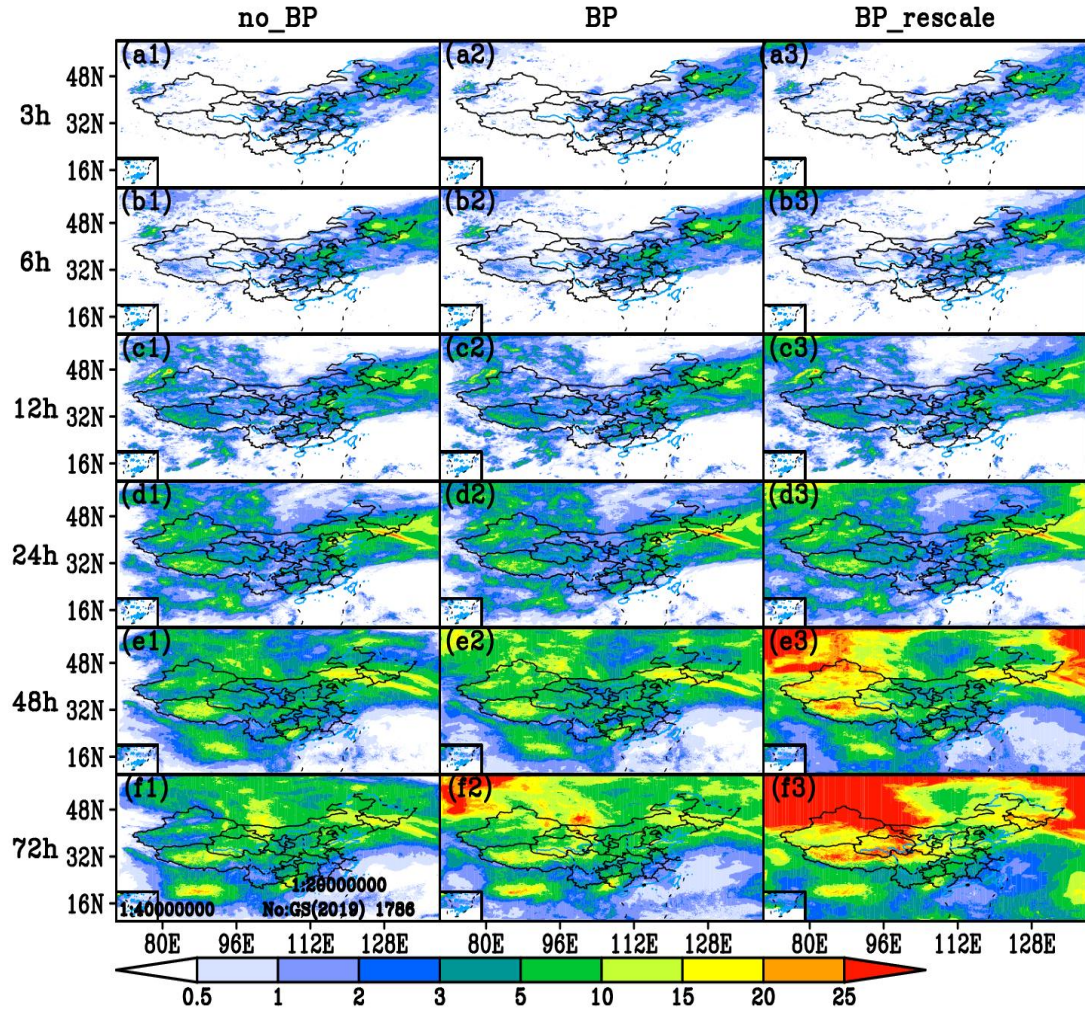


图 5 4 个预报时效平均的不同预报时效 500 hPa 的 DTE 水平分布

Fig. 5 The horizontal distribution of DTE (unit: J kg^{-1}) at 500 hPa for different forecasting lead times , averaged over four forecasting times

为表征扰动能量随预报时效的演变特征，图 6 给出了不同垂直层次的 DTE 和整层 RMDTE 随预报时效的演变。从图中可见，无侧边界扰动试验在前 36 h 的扰动能量增加速度较快，在 36 h 以后扰动能量增加速度缓慢。相比于无侧边界扰动试验，混合侧边界扰动试验可明显增加扰动能量，且侧边界扰动的影响随着预报时效延长而更加明显。动态混合侧边界扰动试验可进一步增加扰动能量，使得扰动增长率更快。提高的扰动增长率有望进一步改进目前国际集合预报系统普遍存在的集合离散度不足的问题，提高集合预报技巧。

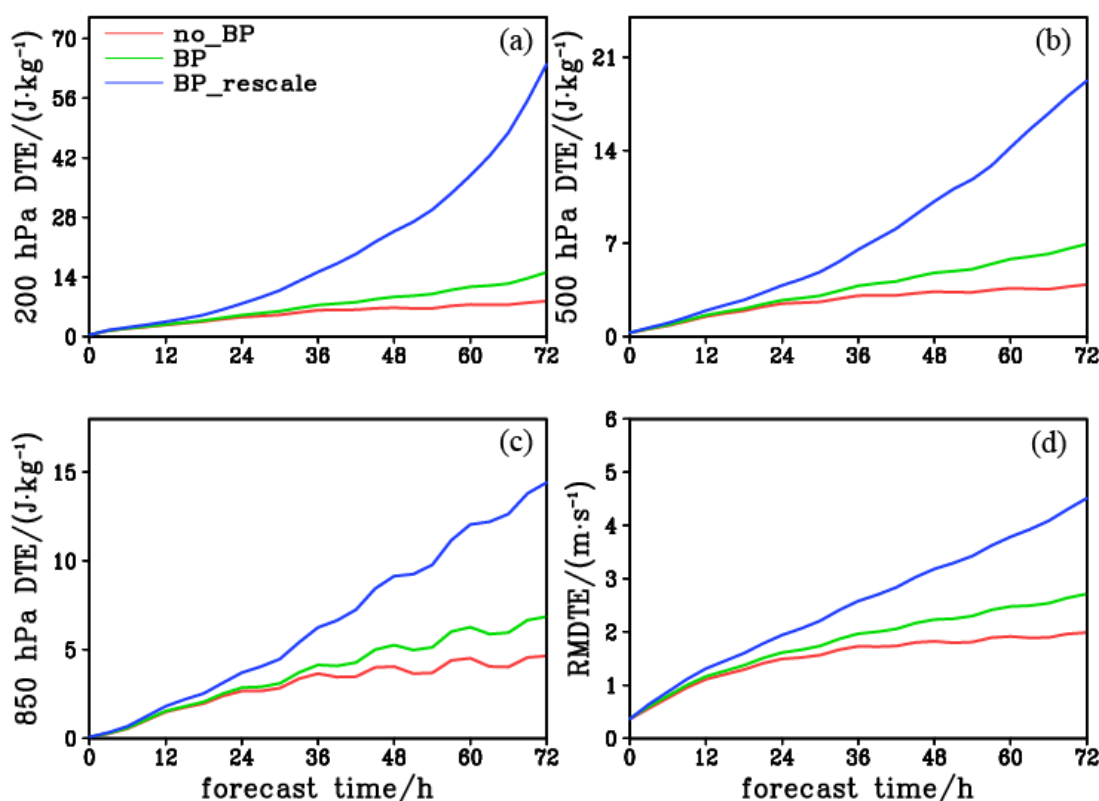


图 6 4 个预报时次平均的 (a) 200、(b) 500、(c) 850 hPa 的 DTE 和 (d) RMDTE 随预报时效的演变

Fig. 6 The evolution of DTE at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa and (d) RMDTE with forecasting lead times , averaged over four forecasting times

3 等压面要素集合预报技巧

3.1 离散度技巧关系

图 7 给出了不同预报试验 500 hPa 纬向风的集合平均均方根误差、集合离散度、集合预报一致性在 72 h 预报时效的水平分布。从图中可见, 3 组试验的 RMSE 水平分布基本相当, 大值区均分布在中国东北地区。然而, 3 组试验的集合离散度差异较为明显, 具体表现为: 无侧边界扰动试验的集合离散度最小, 最大值在 $4.2 \sim 4.9 \text{ m s}^{-1}$; 混合侧边界扰动试验的离散度明显增加, 尤以侧边界处离散度增加最为明显; 动态混合侧边界扰动试验相比于混合侧边界扰动试验的离散度有所增加, 这与扰动能量的演变特征是一致的。为了更直观地反映集合平均均方根误差和集合离散度的关系, 图 7 也给出了集合预报一致性的水平分布。从图中可见, no_BP 试验的集合预报一致性在中国大部分区域均大于 1, 说明无侧边界扰动试验均存在集合离散度不足的问题; 混合侧边界扰动试验的集合预报一致性明显降低, 某些区域的集合一致性大于 1, 某些区域的集合一致性小于 1, 整体围绕在 1 附近, 集合离散度技巧关

系更好；动态混合侧边界扰动试验的集合离散度进一步增大，使得集合预报一致性更低，但
该试验是否相比于混合侧边界扰动试验更好，需结合 RMSE、离散度的区域平均值和两者的
比值来说明。

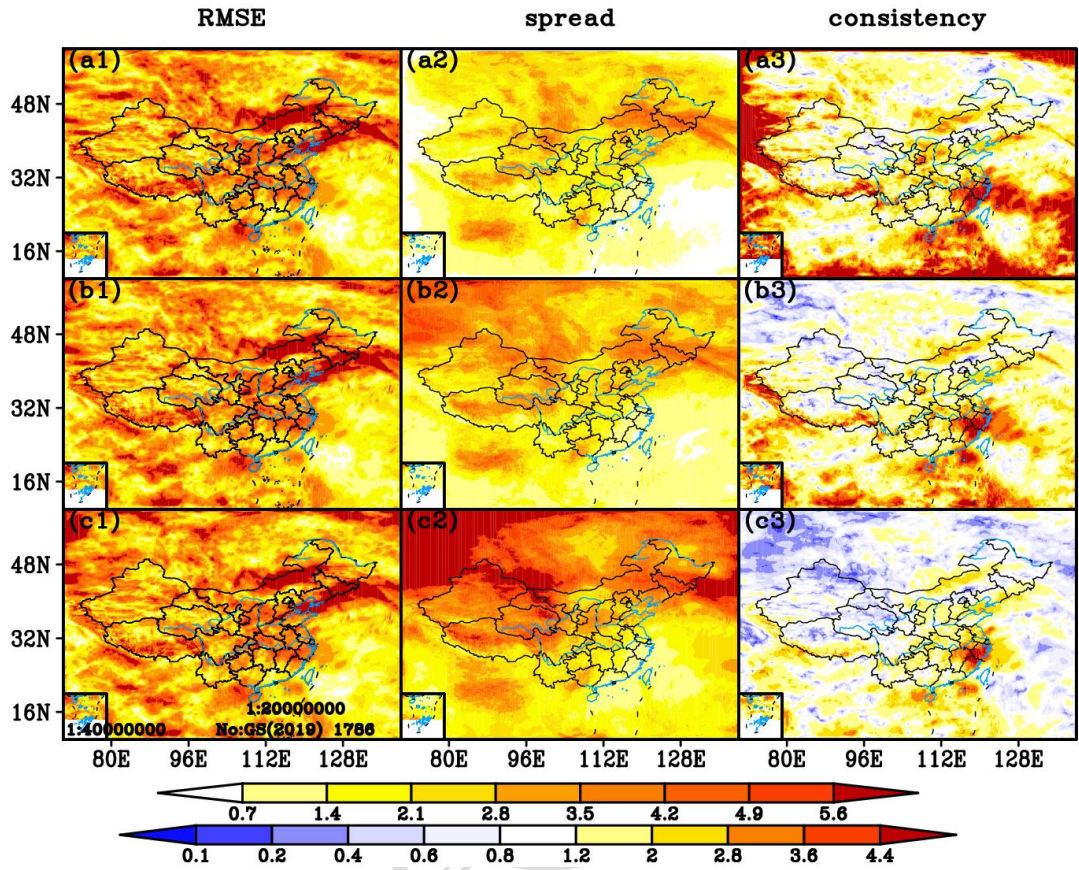


图 7 4 个预报时次平均的不同试验的 500 hPa 纬向风的 (a₁~ c₁) 集合平均 RMSE、(a₂~c₂) 集合离散度、
(a₃~c₃) 集合一致性在 72 h 预报时效的水平分布

Fig. 7 The horizontal distribution of (a₁~c₁) RMSE of ensemble mean , (a₂~c₂) ensemble spread , (a₃~c₃) ensemble consistency for 500 hPa zonal wind at 72 h forecasting lead time, averaged over four forecasting times

图 8 给出了 200、500、850 hPa 等压面的纬向风场、温度场、高度场区域平均的集合平均 RMSE、集合离散度随预报时效的演变。从图中可见，对无侧边界扰动试验而言，集合离散度远小于集合平均均方根误差，说明无侧边界扰动存在集合离散度不足的问题。另外，集合平均 RMSE 的对比结果表明，相比于无侧边界扰动试验，两组混合侧边界扰动试验可降低 850 hPa 的纬向风场、温度场、高度场的集合平均均方根误差，但却增加了 200 hPa 和 500 hPa 不同变量的 RMSE，说明侧边界扰动可改进低层集合平均均方根误差，但对中高层的均方根误差有一定的负效果。集合离散度的对比结果表明，无侧边界扰动试验的集合离散度最

小, 混合侧边界扰动试验的集合离散度有一定的提升, 离散度技巧关系更好, 动态混合侧边界扰动试验可进一步增加集合离散度, 对除 500 hPa 高度场外的大部分变量和垂直层次而言, 离散度技巧关系更好。

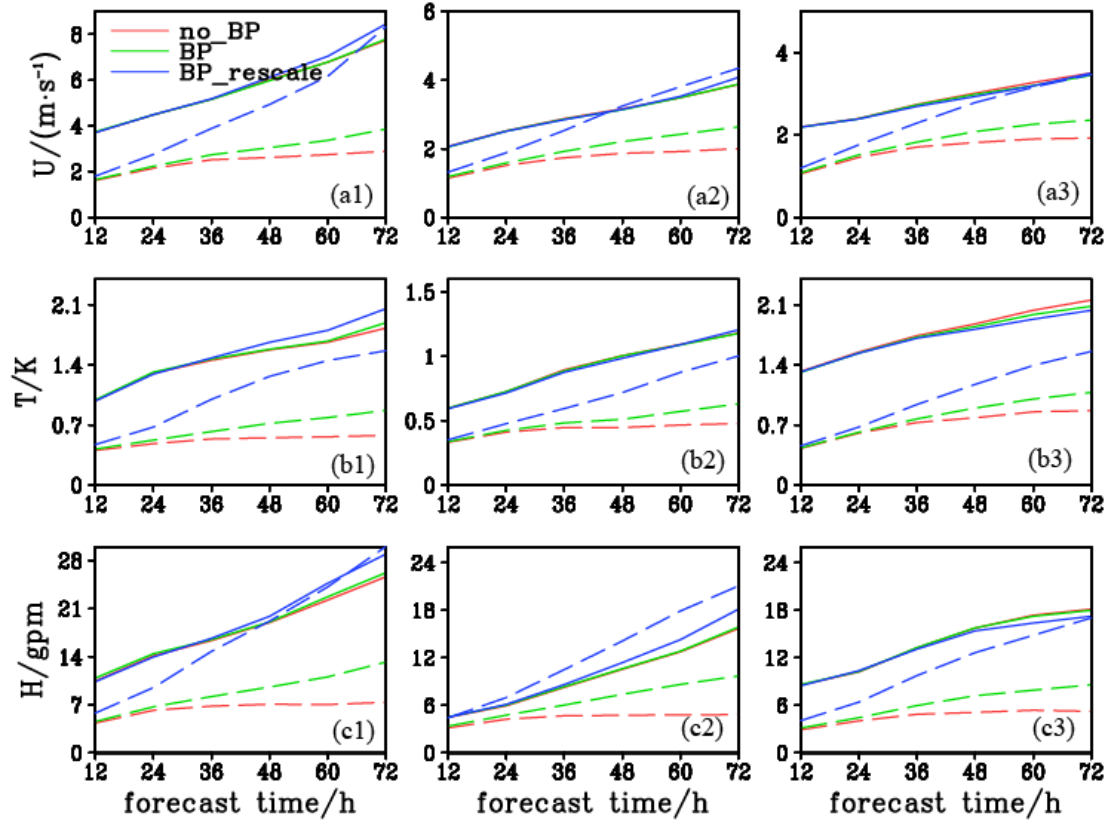


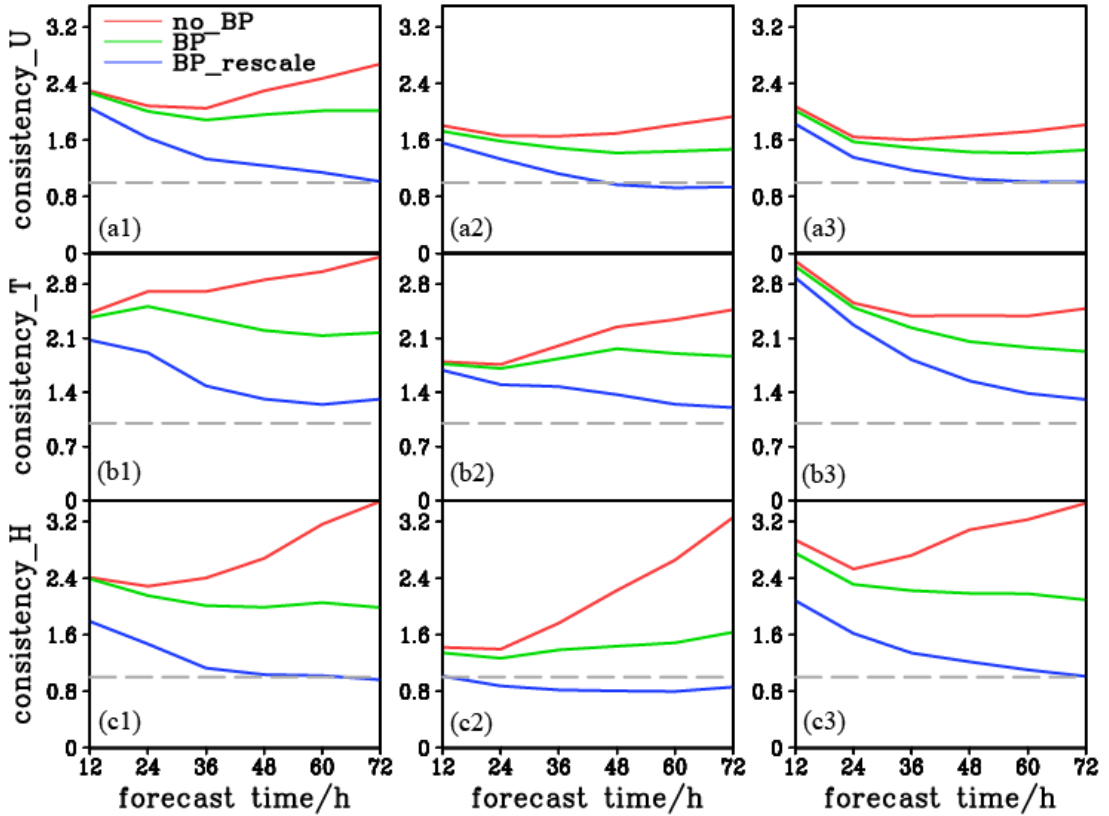
图 8 4 个预报时次平均的不同等压面的 (a) 纬向风场、(b) 温度场、(c) 位势高度场的区域平均集合平均 RMSE (实线) 与集合离散度 (虚线) 随预报时效的演变

Fig. 8 The evolution of domain-averaged RMSE of ensemble mean (solid line) and ensemble spread (dashed line) with forecasting lead times for (a) zonal wind, (b) temperature, and (c) potential height at different isobaric surface, averaged over four forecasting times

图 9 给出了不同垂直层次纬向风场、温度场、高度场的集合一致性随预报时效的演变。集合一致性是用区域平均的集合平均 RMSE 与区域平均的集合离散度求比值计算得到, 即图 8 中实线与虚线的比值。从图中可见, 对无侧边界扰动试验而言, 不同层次不同变量的集合一致性远大于 1, 与图 8 的结论是一致的, 且高度场和高层的风场和温度场的一致性更大, 即这些变量存在明显的集合离散度不足的问题。相比于无侧边界扰动试验, 混合侧边界扰动试验的集合预报一致性更接近于 1, 离散度技巧关系有所改进, 且预报中后期改进更为明显, 这说明该试验的离散度增长率要高于 RMSE 增长率。另外, 除 500 hPa 高度场外, 动态混合侧边界扰动试验可明显改进混合侧边界扰动试验集合离散度不足的问题, 离散度技巧关系更

好。集合一致性垂直分布也有相同的结果，不再赘述。在这里需要表明的是，动态混合侧边界扰动试验的 500 hPa 高度场变量集合一致性小于 1，表明出现了超离散现象。超离散现象可能是因为动态混合侧边界扰动试验使得 500 hPa 风场的集合离散度增加，由风场约束的高度场成员差异也会进一步增大，最终，这种过大的离散度超过了集合平均均方根误差的量级。综合而言，动态混合侧边界扰动方案在保证各变量之间动力协调的同时，提高了大部分垂直层次和变量的离散度技巧关系。

另外，近地面要素的离散度技巧关系（图略）与低层等压面要素一致，即相比于无侧边界扰动试验，混合侧边界扰动试验的集合一致性更接近于 1。相比于混合侧边界扰动试验，动态混合侧边界扰动试验可进一步改进离散度技巧关系，尤以后期的改进最为明显。



注：虚线代表 1。

图 9 4 个预报时次平均的不同等压面的 (a) 纬向风场、(b) 温度场、(c) 位势高度场的区域平均集合一致性随预报时效的演变

Fig. 9 The evolution of domain-averaged ensemble consistency with forecasting lead times for (a) zonal wind, (b) temperature, and (c) potential height at different isobaric surface, averaged over four forecasting times

3.2 概率预报技巧

图 10 给出了不同垂直层次不同变量的概率预报技巧评分随预报时效的演变。从图中可见，对大部分变量而言，无侧边界扰动试验的 CRPS 最高，集合预报概率预报技巧最差。混合侧边界扰动试验的 CRPS 有所降低，概率预报技巧更好。混合侧边界扰动试验和动态混合侧边界扰动试验的对比结果表明，对 850 hPa 高度场和温度场而言，BP_rescale 试验的 CRPS 要低于 BP 试验，尤以预报后期的改进最为明显。综合而言，侧边界扰动可明显改进等压面要素的概率预报技巧，动态混合侧边界扰动试验可进一步改进混合侧边界扰动试验的低层等压面要素的概率预报技巧。

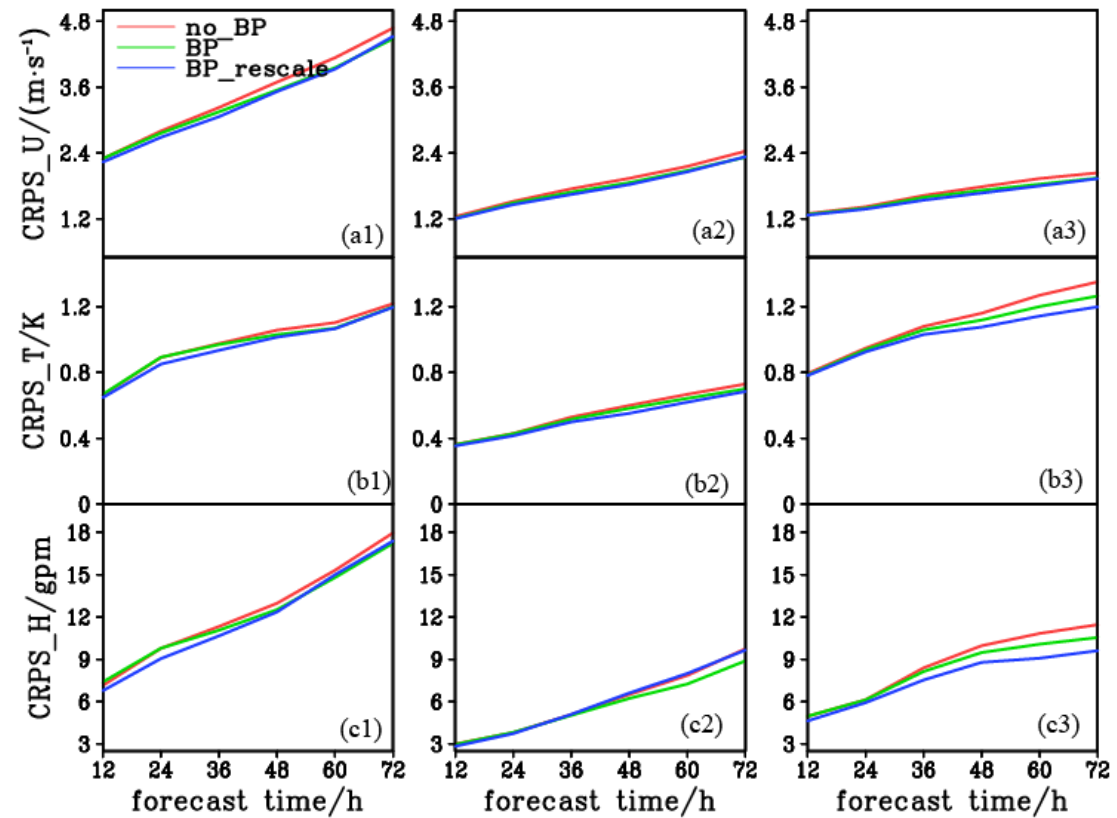


图 10 4 个预报时效平均的不同等压面的 (a) 纬向风场、(b) 温度场、(c) 位势高度场的区域平均 CRPS 随预报时效的演变

Fig. 10 The evolution of domain-averaged CRPS with forecasting lead times for (a) zonal wind, (b) temperature, and (c) potential height at different isobaric surface, averaged over four forecasting times

4 降水集合预报技巧

4.1 离散度技巧关系

图 11 给出了 $3 \text{ mm } 3\text{h}^{-1}$ 降水阈值下不同试验的 eFSS 和 dFSS 差异。eFSS 越低，代表降

水预报误差越大, dFSS 越低, 代表降水离散度越大。BP 与 no_BP 试验的对比说明, 相比于无侧边界扰动试验, 混合侧边界扰动试验的 eFSS 在不同预报时效表现存在差异, BP 试验可降低 no_BP 试验在 12~54 h 预报时效的降水预报误差, 略微增加 no_BP 试验在前 12 h 和后 18 h 的降水预报误差。BP 试验的 dFSS 明显小于 no_BP 试验, 尤其以预报后期的差异更为明显, 说明混合侧边界扰动试验可提高无侧边界扰动试验的降水离散度, 且侧边界扰动对降水离散度的影响随预报时效增长更加明显, 这与等压面要素的表现一致。因为降水离散度小于降水预报误差 (图略), 混合侧边界扰动方案在 12~54 h 预报时效内更高的降水离散度和更低的降水预报误差带来更好的降水离散度技巧关系。另外, 由于 dFSS 差异在前 12 h 和后 18 h 预报时效内大于 eFSS 差异, 故更大的降水离散度带来更好的降水离散度技巧关系。同理, BP 与 BP_rescale 试验的对比结果说明, 相比于混合侧边界扰动试验, 动态混合侧边界扰动试验可增加大部分预报时效的降水预报误差和降水离散度。由于降水预报误差的差异小于降水离散度的差异, 故动态混合侧边界扰动试验可进一步提高降水的离散度技巧关系。其他降水阈值表现一致, 在这里不再赘述。

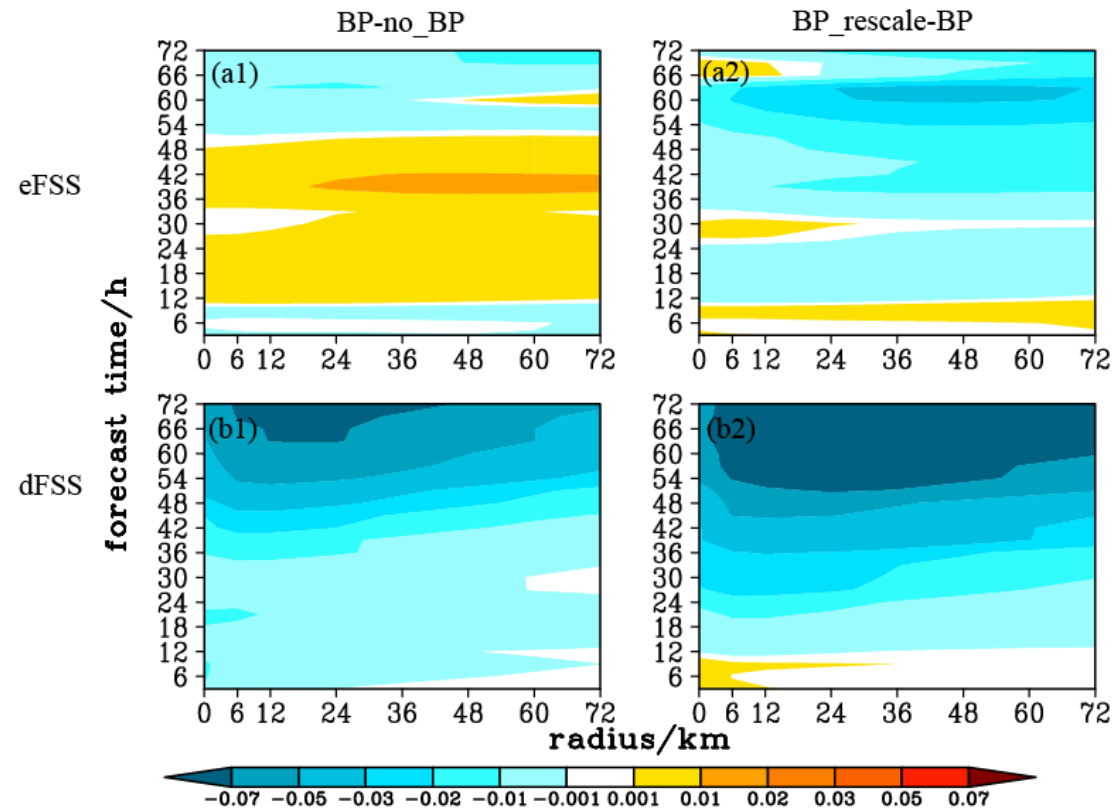


图 11 4 个预报时效平均的不同邻域半径、不同预报时效下 $3 \text{ mm } 3\text{h}^{-1}$ 降水阈值的 (a1, b1) BP 与 no_BP 试验、(a2, b2) BP_rescale 与 BP 试验的 (a) eFSS 和 (b) dFSS 差异

Fig. 11 (a) eFSS and (b) dFSS differences between (a1, b1) BP and no_BP experiments, and (a2, b2)

BP_rescale and BP experiments for a precipitation threshold of $3 \text{ mm } 3\text{h}^{-1}$ at various neighborhood radii and forecast lead times, averaged over four forecasting times

4.2 概率预报技巧

图 12 给出了不同试验的降水邻域概率技巧评分差异。Brier 越小，降水的概率预报技巧越高。从图中可见，无论对任何降水阈值而言，混合侧边界扰动试验的 Brier 均小于无侧边界扰动试验，说明侧边界扰动可提高降水的概率预报技巧，尤以预报后期的改进最为明显。另外，对 24 h 以后的大部分预报时效而言，动态混合侧边界扰动试验的 Brier 均低于混合侧边界扰动试验，说明动态扰动试验的中后期降水概率预报技巧更好。需要指出的是，在 0~24 h 的预报时效内，BP_rescale 试验的 Brier 高于 BP 试验，这是因为在没有观测到降水的区域，BP_rescale 试验的降水邻域集合概率高于 BP 试验的降水概率（图略）。这表明邻域集合概率与观测降水之间的关系能够很好地解释三种侧边界扰动方案在降水概率预报技巧上的差异，与 Wang et al (2024) 的研究结果一致。

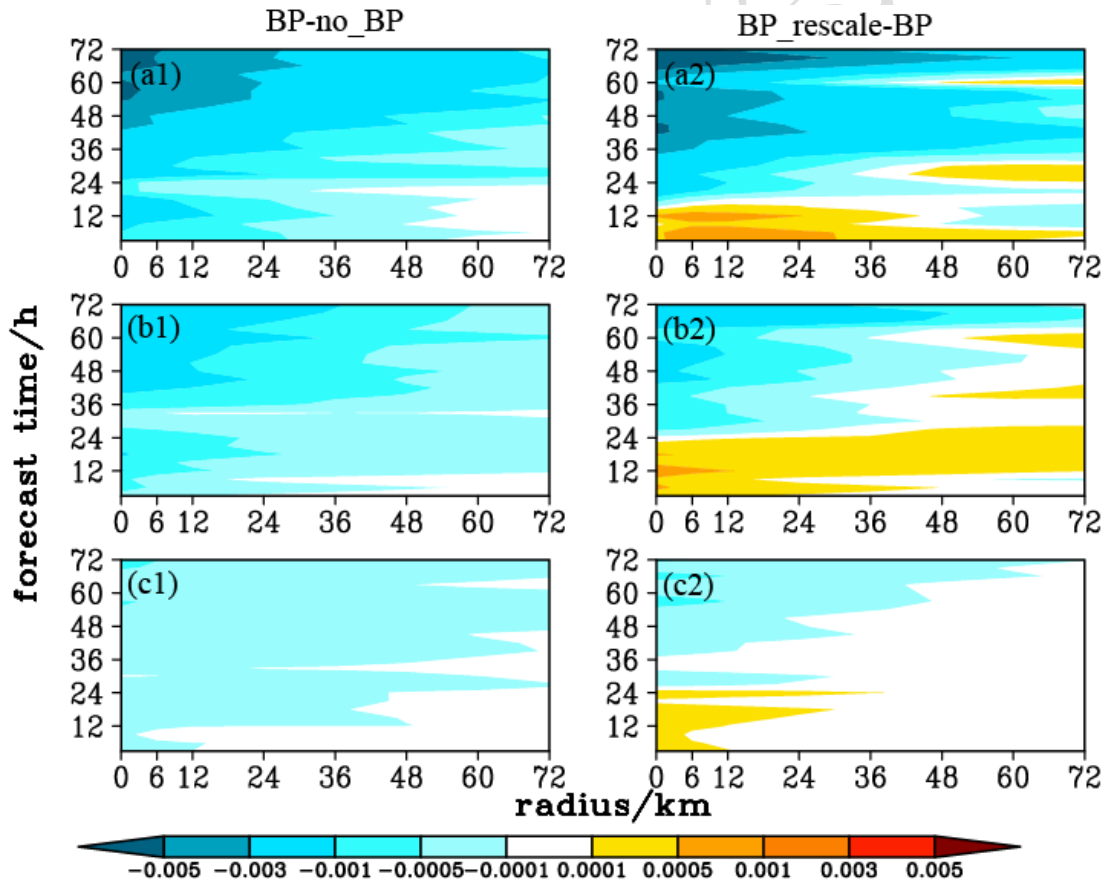


图 12 4 个预报时次平均的不同邻域半径、不同预报时效 (a) 0.1 、(b) 3 、(c) $10 \text{ mm } 3\text{h}^{-1}$ 降水阈值下 (a1~c1) BP 与 no_BP 试验, (a2~c2) BP_rescale 与 BP 试验的 Brier 差异

Fig. 12 The differences in Brier score between (a1—c1) BP and no_BP experiments, and (a2—c2) BP_rescale and

BP experiments at various neighborhood radii and forecasting lead times under (a) 0.1, (b) 3, (c) 10 mm $3h^{-1}$ precipitation threshold, averaged over four forecasting times

5 结论和讨论

本文充分利用我国自主研发的 CMA-GEPS 扰动场信息及确定性模式 CMA-MESO 的侧边界场, 构建了混合侧边界扰动方法, 并采用动态扰动系数调整方案对侧边界扰动大小进行约束, 以期获得较好的集合预报离散度技巧关系。开展本研究有利于揭示侧边界扰动对高分辨率区域集合预报的影响, 并构建业务可行的 CMA-REPS V4.0 侧边界扰动方法及业务系统, 进而提高集合预报等压面要素和降水的预报技巧。研究结论如下:

(1) 能量谱分布表明, 无侧边界扰动会抑制预报后期能量谱增长, 混合侧边界扰动试验有利于提高中 α 和大尺度波长范围内的扰动能量谱, 且对中后期影响更为显著, 动态混合侧边界扰动试验在保持小尺度波谱能量不变的情况下, 可进一步提高混合侧边界扰动试验在波长 100 km 以上的波谱能量。

(2) 能量演变特征表明, 无侧边界扰动试验在 36 h 扰动能量基本达到饱和, 后期扰动能量增长缓慢; 混合侧边界扰动试验可提高扰动能量, 且在初期主要作用在侧边界处, 随着预报时效的增加, 侧边界扰动向中心区域扩展, 带来整个区域的扰动能量增量; 动态混合侧边界扰动试验可进一步提高混合侧边界扰动试验的扰动能量, 使得扰动增长率更快。

(3) 相比于无侧边界扰动试验, 混合侧边界扰动试验可提高等压面要素和降水的离散度技巧关系和概率预报技巧; 动态混合侧边界扰动试验可进一步增加混合侧边界扰动试验的集合离散度, 降水和等压面变量的集合一致性更接近于 1, 且可提高低层等压面要素和 24 h 预报时效以后的降水概率预报技巧。

综合而言, 通过高分辨率区域集合预报模式历史的均方根误差和离散度关系构建的动态混合侧边界扰动方案对等压面要素和降水均有较好的集合预报技巧, 已应用到业务 CMA-REPS V4.0 模式中。在这里需要说明的是, 首先, 初值扰动和模式扰动对高分辨率区域集合预报的影响依然很大, 需进一步开展相关研究。在此基础上, 根据 CMA-REPS V4.0 模式的历史均方根误差和离散度关系, 对侧边界扰动系数进行调整, 以构建更为合理的侧边界扰动方案。其次, 本文是通过与全球集合预报相耦合来获得高分辨率区域集合预报的侧边界扰动场, 这也是很多业务和科研机构采用的主流方法 (Wang et al, 2011; Zhang et al, 2015)。然而, 通过全球集合预报系统动力降尺度获得的侧边界扰动可能存在预报误差 (Marsigli et al, 2014), 需采用一个中间分辨率的区域集合预报为 2~4 km 水平分辨率的高分辨率集合预报

系统提供侧边界条件扰动 (Caron, 2013; 庄潇然等, 2017)。因此, 未来可利用中间分辨率的集合预报系统构建混合侧边界扰动方法, 并分析其集合预报效果。最后, 本文所有结果均为 4 个预报时次的平均值。随着计算机资源的不断增加, 未来需开展更多的批量试验, 以更全面地揭示所构建的动态混合侧边界扰动方案的效果, 并分析其与其他试验相比的统计学显著差异。

参考文献

- 陈静, 庞波, 吴政秋, 等, 2022. 华南复杂地形下 GRAPES_Meso 3 km 对流尺度模式前汛期精细化降水预报评估[J]. 大气科学学报, 45(1): 99-111. Chen J, Pang B, Wu Z Q, et al, 2022. Evaluation of fine-scale precipitation forecast of GRAPES_Meso 3 km convective-scale model in early summer rainy season in South China under complex topographical conditions[J]. Trans Atmos Sci, 45(1): 99-111 (in Chinese).
- 杜钧, 陈静, 2010. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 36(11): 1-11. Du J, Chen J, 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction[J]. Meteor Mon, 36(11): 1-11 (in Chinese).
- 范宇恩, 陈静, 邓国, 等, 2019. GRAPES 区域集合预报两种侧边界扰动方法对比试验[J]. 气象, 45(12): 1629-1641. Fan Y E, Chen J, Deng G, et al, 2019. Comparison of two lateral boundary perturbation methods in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Meteor Mon, 45(12): 1629-1641 (in Chinese).
- 韩雨盟, 陈静, 彭飞, 等, 2023. 全球集合预报位温系统偏差和随机误差结合的模式倾向扰动方法[J]. 气象学报, 81(4): 592-604. Han Y M, Chen J, Peng F, et al, 2023. A model tendency perturbation method that combines systematic bias of potential temperature and random errors in global ensemble prediction[J]. Acta Meteor Sin, 81(4): 592-604 (in Chinese).
- 霍达, 马杰, 马殿博, 2024. 2024 年 6 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 50(9): 1153-1160. Huo D, Ma J, Ma D B, 2024. Analysis of the June 2024 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 50(9): 1153-1160 (in Chinese).
- 马雅楠, 陈静, 徐致真, 等, 2023. GRAPES 对流尺度集合预报模式中不同尺度初始扰动能量的演变特征[J]. 大气科学, 47(5): 1541-1556. Ma Y N, Chen J, Xu Z Z, et al, 2023. Evolution characteristics of initial perturbation energy at different scales in convection-permitting ensemble prediction of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1541-1556 (in Chinese).
- 潘旸, 沈艳, 字婧婧, 等, 2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报, 73(1): 177-186. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al, 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteor Sin, 73(1): 177-186 (in Chinese).
- 潘贤, 王秋萍, 张瑜, 等, 2021. 分析约束的集合预报初始扰动构造方案的研究[J]. 大气科学, 45(6): 1327-1344. Pan X, Wang Q P, Zhang Y, et al, 2021. Analysis constraints scheme of initial perturbation of ensemble prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1327-1344 (in Chinese).
- 彭飞, 李晓莉, 陈静, 等, 2023. CMA 全球集合预报系统误差增长及预报性能的尺度依赖特征诊断分析[J]. 气象学报, 81(4): 605-618. Peng F, Li X L, Chen J, et al, 2023. Diagnostic analysis on the scale-dependent features in error growth and forecast performance of the CMA global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 81(4): 605-618 (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, 陈静, 庄照荣, 等, 2018. GRAPES 区域集合预报模式的初值扰动增长特征[J]. 大气科学, 42(2): 367-382. Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al, 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2): 367-382 (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).

叶璐, 刘永柱, 陈静, 等, 2020. 集合预报多尺度奇异向量初值扰动方法研究[J]. *气象学报*, 78(4): 648-664. Ye L, Liu Y Z, Chen J, et al, 2020. A study on multi-scale singular vector initial perturbation method for ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(4): 648-664 (in Chinese).

于翥, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. *大气科学*, 42(5): 1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1146-1156 (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).

岳健, 董林, 陈静, 等, 2023. 基于再分析尺度化因子的集合预报初值扰动对台风烟花(2106)预报的影响[J]. *气象*, 49(7): 773-789. Yue J, Dong L, Chen J, et al, 2023. Effect of ensemble initial perturbations with rescaling on the forecast of Typhoon In-Fa (2106)[J]. *Meteor Mon*, 49(7): 773-789 (in Chinese).

张涵斌, 智协飞, 陈静, 等, 2017. 区域集合预报扰动方法研究进展综述[J]. *大气科学学报*, 40(2): 145-157. Zhang H B, Zhi X F, Chen J, et al, 2017. Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(2): 145-157 (in Chinese).

张涵斌, 计燕霞, 陈敏, 等, 2022. 基于观测扰动的集合预报 EDA 初值扰动方法研究[J]. *气象*, 48(4): 406-417. Zhang H B, Ji Y X, Chen M, et al, 2022. Study on the EDA initial condition perturbation method for ensemble prediction system based on observation perturbation[J]. *Meteor Mon*, 48(4): 406-417 (in Chinese).

朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese).

庄潇然, 闵锦忠, 蔡沅辰, 等, 2017. 风暴尺度集合预报最优侧边界条件扰动方法设计: 个例分析[J]. *气象科学*, 37(1): 21-29. Zhuang X R, Min J Z, Cai Y C, et al, 2017. Optimal design of lateral boundary condition perturbation method in storm-scale ensemble forecast: a case study[J]. *Sci Meteor Sin*, 37(1): 21-29 (in Chinese).

Bröcker J, 2012. Evaluating raw ensembles with the continuous ranked probability score[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(667): 1611-1617.

Caron J F, 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: a case study[J]. *Mon Wea Rev*, 141(1): 356-374.

Clark A J, Jirak I L, Dembek S R, et al, 2018. The Community Leveraged Unified Ensemble (CLUE) in the 2016 NOAA/Hazardous weather testbed spring forecasting experiment[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(7): 1433-1448.

Dey S R A, Leoncini G, Roberts N M, et al, 2014. A spatial view of ensemble spread in convection permitting ensembles[J]. *Mon Wea Rev*, 142(11): 4091-4107.

Du J, Yu R C, Cui C G, et al, 2014. Using a mesoscale ensemble to predict forecast error and perform targeted observation[J]. *Acta Oceanol Sinica*, 33(1): 83-91.

Frogner I L, Singleton A T, Koltzow M Ø, et al, 2019. Convection-permitting ensembles: challenges related to their design and use[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(S1): 90-106.

Gallo B T, Clark A J, Jirak I, et al, 2017. Breaking new ground in severe weather prediction: The 2015 NOAA/Hazardous weather testbed spring forecasting experiment[J]. *Wea Forecasting*, 32(4): 1541-1568.

Garcia-Moya J A, Callado A, Escribà P, et al, 2011. Predictability of short-range forecasting: a multimodel approach[J]. *Tellus A*, 63(3): 550-563.

Gebhardt C, Theis S E, Paulat M, et al, 2011. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries[J]. *Atmos Res*, 100(2-3): 168-177.

- Golding B W, Ballard S P, Mylne K, et al, 2014. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(6): 883-896.
- Hagelin S, Son J, Swinbank R, et al, 2017. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(708): 2846-2861.
- Hohenegger C, Schar C, 2007. Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(11): 1783-1794.
- Hou D C, Kalnay E, Droegemeier K K, 2001. Objective verification of the SAMEX' 98 Ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 129(1): 73-91.
- Kay J K, Kim H M, 2014. Characteristics of initial perturbations in the ensemble prediction system of the Korea Meteorological Administration[J]. *Wea Forecasting*, 29(3): 563-581.
- Klasa C, Arpagaus M, Walser A, et al, 2018. An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(712): 744-764.
- Kong F Y, Droegemeier K K, Hickmon N L, 2007. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part II: storm-scale experiments[J]. *Mon Wea Rev*, 135(3): 759-782.
- Lawson J, Gallus Jr W A, 2016. On contrasting ensemble simulations of two great plains bow echoes[J]. *Wea Forecasting*, 31(3): 787-810.
- Liu X, Chen J, Liu Y Z, et al, 2024. An initial perturbation method for the multiscale singular vector in global ensemble prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 41(3): 545-563.
- Lorenz E N, 1963. Deterministic nonperiodic flow[J]. *J Atmos Sci*, 20(2): 130-141.
- Marsigli C, Montani A, Paccagnella T, 2014. Provision of boundary conditions for a convection-permitting ensemble: comparison of two different approaches[J]. *Nonlinear Process Geophys*, 21(2): 393-403.
- McCollor D, Stull R, 2009. Evaluation of probabilistic medium-range temperature forecasts from the North American ensemble forecast system[J]. *Wea Forecasting*, 24(1): 3-17.
- Nielsen E R, Schumacher R S, 2016. Using convection-allowing ensembles to understand the predictability of an extreme rainfall event[J]. *Mon Wea Rev*, 144(10): 3651-3676.
- Nutter P, Stensrud D, Xue M, 2004a. Effects of coarsely resolved and temporally interpolated lateral boundary conditions on the dispersion of limited-area ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2358-2377.
- Nutter P, Xue M, Stensrud D, 2004b. Application of lateral boundary condition perturbations to help restore dispersion in limited-area ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2378-2390.
- Ono K, Kunii M, Honda Y, 2021. The regional model-based mesoscale ensemble prediction system, MEPS, at the Japan Meteorological Agency[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 147(734): 465-484.
- Peralta C, Bouallegue Z B, Theis S E, et al, 2012. Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D7): 3245-3265.
- Raynaud L, Bouttier F, 2016. Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(695): 854-866.
- Saito K, Kuroda T, Kunii M, et al, 2010. Numerical simulation of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge Part II: ensemble prediction[J]. *J Meteor Soc Japan Ser. II*, 88(3): 547-570.
- Schellander-Gorgas T, Wang Y, Meier F, et al, 2017. On the forecast skill of a convection-permitting ensemble[J]. *Geosci Model Dev*, 10(1): 35-56.
- Storto A, Randriamampianina R, 2010. Ensemble variational assimilation for the representation of background error covariances in a high-latitude regional model[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 115(D17): D17204.
- Vi é B, Nuissier O, Ducrocq V, 2011. Cloud-resolving ensemble simulations of Mediterranean heavy precipitating events: Uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 139(2): 403-423.
- Wang J Z, Chen J, Du J, et al, 2018. Sensitivity of ensemble forecast verification to model bias[J]. *Mon Wea Rev*, 146(3): 781-796.

-
- 499 Wang J Z, Chen J, Zhang H B, et al, 2021. Initial perturbations based on ensemble transform Kalman filter with rescaling method for
500 ensemble forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 36(3): 823-842.
- 501 Wang J Z, Chen J, Xue H L, et al, 2022. The roles of small-scale topographic perturbations in precipitation forecasting using a
502 convection-permitting ensemble prediction system over southern China[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 148(746): 2468-2489.
- 503 Wang J Z, Chen J, Zhang H B, et al, 2023a. Impacts of multiscale components of initial perturbations on error growth characteristics and
504 ensemble forecasting skill[J]. *J Appl Meteorol Climatol*, 62(11): 1677-1692.
- 505 Wang J Z, Chen J, Li H Q, et al, 2023b. The roles of chaos seeding and multiple perturbations in convection-permitting ensemble
506 forecasting over southern China[J]. *Wea Forecasting*, 38(9): 1519-1537.
- 507 Wang J Z, Zhang H B, Chen J, et al, 2024. Construction of multiscale initial perturbations and the associated impacts on
508 convection-permitting ensemble forecasting[J]. *Atmos Res*, 297: 107121.
- 509 Wang Y, Bellus M, Wittmann C, et al, 2011. The central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF[J]. *Quart J*
510 *Roy Meteor Soc*, 137(655): 483-502.
- 511 Wastl C, Wang Y, Atencia A, et al, 2019. A hybrid stochastically perturbed parametrization scheme in a convection-permitting
512 ensemble[J]. *Mon Wea Rev*, 147(6): 2217-2230.
- 513 Xu Z Z, Chen J, Mu M, et al, 2022. A stochastic and non-linear representation of model uncertainty in a convective-scale ensemble
514 prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 148(746): 2507-2531.
- 515 Yang Y L X, Yuan H L, Chen W B, 2023. Convection-permitting ensemble forecasts of a double-rainbelt event in South China during the
516 pre-summer rainy season[J]. *Atmos Res*, 284: 106599.
- 517 Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2015. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system[J].
518 *Atmosphere*, 6(3): 341-360.
- 519 Zhang L, Min J Z, Zhuang X R, et al, 2023. The lateral boundary perturbations growth and their dependence on the forcing types of
520 severe convection in convection-allowing ensemble forecasts[J]. *Atmosphere*, 14(1): 176.
- 521 Zhang X B, 2019. Multiscale characteristics of different-source perturbations and their interactions for convection-permitting ensemble
522 forecasting during SCMREX[J]. *Mon Wea Rev*, 147(1): 291-310.