

# 物理参数化方案联合扰动对集合预报质量的影响<sup>†</sup>

魏莉青<sup>1</sup> 闵锦忠<sup>1</sup> 张璐<sup>1</sup> 徐渊<sup>2</sup> 杨婷<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

<sup>2</sup> 江西省气象台, 南昌 330096

<sup>3</sup> 河南省气候中心, 郑州 450003

**摘要** 云微物理方案参数众多且参数间约束关系复杂, 在集合预报中选择什么参数、如何进行参数组合扰动一直没有定论, 本文基于 WRFv4.2 模式, 选择 WSM6 方案 8 个参数对 2020 年一次梅雨锋强降水过程进行参数扰动集合预报试验, 对比分析不同参数、不同扰动范围组合对预报的影响, 尝试将云微物理方案和边界层方案的敏感参数进行联合扰动。结果表明: 4 个云微物理方案敏感参数的组合扰动在预报试验中表现最优, 减小了暴雨概率预报的空报率, 提升了湿度场、纬向风、低层温度场、对流层中层经向风的集合离散度; 雨滴截断参数与云冰直径的有限最大值联合扰动后呈协同共振作用, 能有效改进集合预报效果; 而霰截断参数与霰密度、截断参数间的组合扰动显示, 扰动能量并没有随扰动参数的增加而增强, 参数间的拮抗作用会制约集合预报技巧的提升; MRF 边界层方案三个参数的扰动对低层湿度场的集合预报技巧改善明显, 且三个参数组合扰动比单个扰动集合预报技巧更高; 同时将云微物理参数扰动方案和边界层参数扰动方案进行联合, 效果最优。说明参数扰动时参数的选择、扰动的范围都会对集合预报的效果产生影响, 呈协同关系的参数组合易取得较优的预报效果, 存在拮抗作用的参数组合则呈现负技巧。考虑参数间依赖关系、扰动范围的多参数扰动更有利于集合预报效果的提升, 为今后参数扰动中参数的选择提供了有价值的参考。

**关键词** 集合预报 物理扰动 多参数 云微物理方案 边界层方案

<sup>†</sup>作者简介: 魏莉青 (1998-), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事对流尺度集合预报研究。E-mail: weilq1998@163.com

通信作者: 闵锦忠 (1965-), 男, 江苏金湖人, 教授, 主要从事中小尺度数值模拟、集合预报与资料同化研究。E-mail: minjz@nuist.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3000902)

Funded by: National Key Research and Development Program of China (Grant 2021YFC3000902)

收稿日期: 2022-11-09 网络预出版日期: 202X-XX-XX

# Effect of Physical Parameterization Scheme Combined with Perturbation on Ensemble Prediction Quality

WEI Liqing<sup>1</sup>, MIN Jinzhong<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, XU Yuan<sup>2</sup>, YANG Ting<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory, Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

<sup>2</sup> Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096, China

<sup>3</sup> Henan Climate Center, Zhengzhou 450003, China

**Abstract** There are many parameters in the cloud microphysics scheme and the constraint relationship between the parameters is complex, so it has not been decided what parameters should be selected and how to carry out the parameter combination disturbance in the ensemble forecast. Based on WRFv4.2 model, this paper selects eight parameters of WSM6 scheme to conduct the ensemble prediction experiment of parameter disturbance for the heavy rainfall event of Meiyu front in 2020. Contrast and analyze the influence of different parameters and different disturbance range combinations on prediction, and try to jointly disturb the sensitive parameters of cloud microphysical scheme and boundary layer scheme. The results show that the combined disturbance of the 4 sensitive parameters of the cloud microphysics schemes has the best performance in the prediction test, which reduces the False Alarm Rate of torrential rain probability forecast, and improves the spread skills of humidity field, zonal wind, temperature field in low level and meridional wind in middle troposphere. The combined disturbance of the raindrop truncation parameter and the maximum of the cloud ice diameter presents a synergistic resonance effect, which can effectively improve the ensemble prediction effect. However, combined perturbations between graupel truncation parameters, graupel density and truncation parameters show that disturbance energy does not increase with the increase of disturbance parameters, and the antagonism between parameters will restrict the improvement of ensemble forecasting skills. The disturbance of three parameters in the MRF boundary layer scheme has significantly improved the ensemble prediction skill of low layer humidity field, and the combined disturbance of three parameters is better than that of a single disturbance; At the same time, joint perturbation of the cloud microphysical parameter perturbation scheme and boundary layer parameter perturbation scheme can achieve the best effect. It shows that the selection of parameter and the range of the disturbance can affect the effect of the ensemble forecast, a collaborative relationship between the parameters of the combination is easy to obtain a better forecast effect, while parameter combinations with antagonistic effect show negative skills. Multi parameter disturbance considering the dependency relationship between parameters and the range of disturbance is more conducive to the improvement of ensemble prediction effect, which provides a valuable reference for the selection of parameters in parameter disturbance in the future.

**Keywords** Ensemble Forecast, Physical Disturbance, Multi-parameter, Cloud Microphysics Scheme, Boundary layer scheme

## 1 引言

受独特的气候背景与复杂下垫面条件的影响，每年春夏交替之际（梅雨季）我国江淮地区强对流天气频发，造成的暴雨灾害严重影响了农业、交通、水利等领域的国民经济产业，威胁人民群众的生命财产安全，对江淮梅雨季的强对流过程开展定时、定点、定量的预报始终都是业务工作中的难点（Fu et al., 2013; Fu et al., 2019; 周志敏等，2021）。数值模式初始场、侧边界条件和物理过程等的不确定性使得模式预报存在很大的不确定性，集合预报技术是提供概率天气预报、估计预报不确定性的一种有效手段（陈静等，2002），不仅可以提供比单一确定性预报更高的预报技巧评分，还可以对预报不确定性进行定量估计从而为业务预报提供指导，提高对高影响天气的预报预警能力，已成为数值预报业务的核心系统（陈静和李晓莉，2020）。因此如何基于预报不确定性设计合理的对流尺度集合扰动方案，是集合预报的核心问题。

对流尺度的实际可预报性受物理过程参数化影响（徐渊等，2022），模式分辨率亦是影响模式预报效果的重要因素之一（李祥等，2020），随着模式分辨率的提高，物理过程的模拟对于对流尺度强降水的重要性日益凸显，发展高分辨率的对流尺度集合预报迫在眉睫。目前处理模式物理过程不确定性的集合预报方法大致分为：表达物理和数值方案不确定性的多模式/多物理方法，表示参数不确定性的多参数方法，以及随机物理扰动方法，其中随机物理倾向扰动（SPPT）和随机后向散射方法（SKEB）是主流的随机物理扰动方法。

集合预报系统中各成员具有相似的天气背景，积分后的预报结果存在差异，从误差演变的角度能够衡量预报变量与集合成员模式初值及物理过程的耦合关系（肖柳斯等，2021）。在针对对流尺度集合预报的研究中，众多学者对由不同参数化过程引起的误差进行探究（Raynaud and Bouttier, 2016; Bouttier et al., 2012），其中云微物理参数化方案可以直接模拟强对流风暴云内物理过程，通过调整温湿场的结构及物理过程影响积云对流发生发展的条件，进而影响降水的预报。亦有研究表明云微物理参数化方案的选择对于模式降水的模拟有重要影响（Rajeevan et al., 2010; 伍华平等，2009; 王洪等，2014），针对已经发展出的众多云微物理方案，现有研究（尹金方等，2014; 朱格利等，2014; 王文君等，2018;

康延臻等, 2018; 顾小祥和李国平, 2019) 尚未找到一个在所有个例中都表现较优的云微物理方案。为了更好的描述物理过程, 李喆等 (2019)、王坤等 (2014) 对参数化方案进行了改进, 在个例中取得了较好的效果, 但不具有普适性 (石荣光等, 2015; 高文华等, 2012; 尹金方, 2013; 罗丽萍, 2018)。云微物理方案参数的研究方面, 郭淳薇等 (2018) 探究过不同云微物理参数化方案中水凝物粒子浓度的敏感性; 亦有研究表明雨滴和霰谱形参数对于水凝物含量、源汇项以及降水存在影响 (刘晓莉等, 2018); Morales A 等 (2018) 研究表明扰动下落速度系数等参数对云和地形降水存在影响; 童颖睿和闵锦忠 (2020) 提到模式模拟的降水及相关物理量对云微物理方案中参数的变化敏感, 参数的取值关系到水凝物粒子的分布、转化、碰并, 从而影响降水的模拟; 类似研究 (White et al., 2017; 李艳伟等, 2018) 均表明参数扰动在模式预报中具有较大的研究价值。目前参数扰动的研究以 SPP 方法为主, 大多着眼于其与初值扰动、侧边界扰动以及其他模式扰动方法的对比与结合, 对参数间的协调性关注较少, 但参数的不确定性与参数间的相互作用所带来的预报误差却不可忽视, 同时参数扰动在统计经验值范围内进行, 针对具体的对流个例应有适宜的扰动范围, 即扰动参数与扰动范围的选择需要科学指导。

本文从对定量降水预报具有直接影响的云微物理方案中参数的敏感性出发, 在动力降尺度提供初边值扰动的基础上, 由单参扰动到多参组合扰动, 涵盖参数的组合搭配与扰动区间的组合, 再到与其他扰动的联合, 评估扰动方法的预报性能。结合数值模拟、敏感性分析、诊断分析以及多种集合扰动方法, 研究可以合理提高离散度同时保持预报稳定性的参数扰动方法, 评估该方法的效果、分析不同扰动在联合扰动中离散度的贡献和背后的作用机制, 进而提高对强对流天气的预报能力。

## 2 个例介绍与模式配置

### 2.1 个例介绍与云微物理方案的选择

2020 年暴力梅持续 62 天之久, 梅雨季江淮区域平均降水量 759.2mm, 达近 60 年之最。选取此次梅雨期间一次典型强降水过程和模拟中表现较佳的 WSM6 方案进行参数扰动试验研究。2020 年 7 月 18-19 日的强降水过程 (图 1b) 是一次典型双阻条件下的梅雨锋暴雨, 此类梅雨暴雨过程预报不确定性明显, 低涡急

流系统和降水潜热间的非自然正反馈会导致天气系统和降水预报存在较大偏差（陈涛等，2020）。降水主体位于鄂皖苏大部地区、湖南北部及河南南部。雨带呈现东北-西南走向，安徽中部、湖北东部为暴雨主要落区，大别山以东区域的24h累积降水超过250mm，达到特大暴雨量级。高纬环流（图1a）呈“两脊一槽”，中高纬阻塞高压稳定维持，东亚沿岸低槽活跃，西南风急流持续将源自低纬地区的水汽输送至江淮，水汽辐合与大气上升运动的发展导致强降水在江淮地区长时间维持，副高为暖湿气流向江淮的输送提供良好的动力条件。经圈型环流对江淮地区的大气上升运动起主导作用，大气环流南北向振幅加大，利于冷空气南下，与西南暖湿气流交汇形成梅雨锋，为强降水的发生提供动力条件。

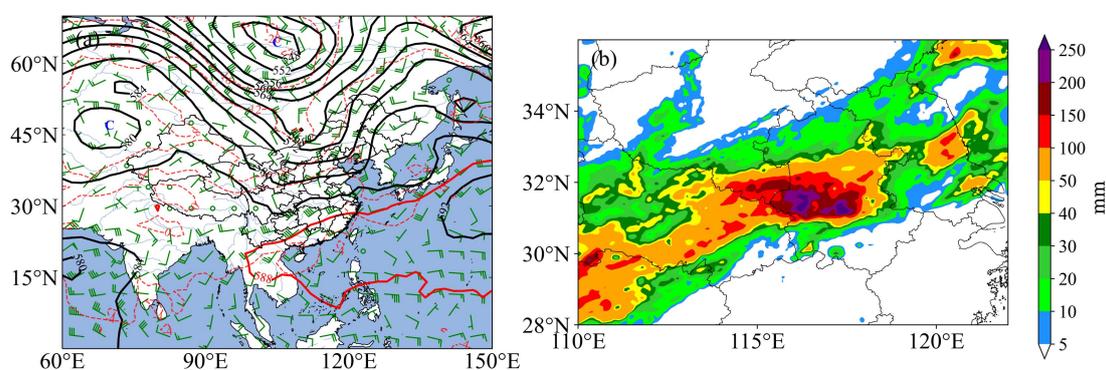


图1 (a) 2020.7.18日500hPa位势高度场(等值线,单位: dagpm)、温度场(等值线,单位: °C)与700hPa风场(矢量,风速单位: m/s) (b) 2020.7.18日00时-19日00时(UTC)24h实况累积降水(单位: mm)

Fig.1 (a) 500hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm), temperature field (contour, unit: °C) and 700hPa wind field (vector, wind speed unit: m/s) on July 18, 2020 (b) 24h actual accumulated precipitation (unit: mm)

## 2.2 试验方案

模式采用WRFv4.2双重嵌套(见图2),网格中心位于34.5°N, 112.5°E,内外分辨率分别为3km、15km,外层格点数184×154,内层格点数441×296,垂直方向为不等距33层,模式层顶50hPa。模拟时间从2020年7月17日12时(世界时,下同)开始积分36h,前12h为spin up时间。具体的物理参数化方案选择如下:WSM6云微物理方案、RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、MRF边界层方案、Noah陆面方案,关闭内层网格的积云参数化方案,外层使用K-F积云对流方案。

参数敏感性试验由逐6小时、1°×1°的FNL分析资料提供初始场及侧边界条

件，而集合预报试验首先采用动力降尺度方法，使用 TIGGE 计划中逐 6 小时、分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的 NCEP 全球集合预报系统的分析扰动，包括 20 个成员，扰动变量分别为风场 U、V 分量、温度及比湿，扰动层次 200-1000hPa，经双线性插值降尺度后叠加到模拟内外区域，提供新的初始场与侧边界条件，在此基础上进行相应的物理参数化方案的参数扰动。选取 CMPAS 中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水分析产品、空间分辨率  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  的逐小时降水数据为实况资料进行模式模拟效果的评估，利用 ECMWF 提供的分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  的 ERA5 逐小时再分析资料进行风场、温度、湿度场等相关物理量场的对比。

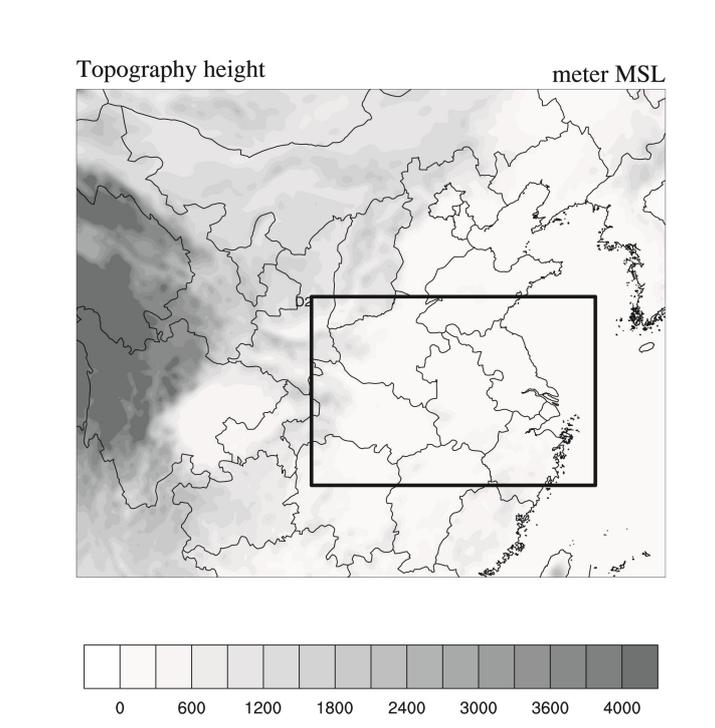


图 2 WRF 模式嵌套区域（填色图：地形高度，单位：m）

Fig.2 WRF mode nesting area (color map: terrain height, unit: m)

### 3 参数敏感性试验

#### 3.1 关键参数的选择与敏感性试验设计

梅雨锋暴雨过程的预报不确定性主要表现为天气系统和降水的预报偏差较大，低涡急流系统和降水潜热间的非自然正反馈是重要诱因之一(程涛等, 2020)，而云微物理方案通过调整温湿场的结构和潜热释放等可以影响积云对流发生发展的条件，进而影响降水与天气系统的预报（童颖睿和闵锦忠, 2022）。云微物

理方案的截断参数在方案中设为定常值,但在实际对流个例中截断参数往往在一个范围内波动。参数的单一设置不足以表征参数的不确定性,对参数进行扰动,就使得集合预报成员能更准确的描述大气的可能状态。WSM6 方案的属性对粒径分布异常敏感,而截断参数直接影响液滴的大小 (Hacker et al., 2011); 云雨自动转换率 (PEAUT)、云冰直径的有限最大值 (DIMAX)、海上云滴浓度 (XNCR) 控制云雨的转变,对于降水意义重大 (Jiang et al., 2010; Baker et al., 2014); 霰密度 (DENG) 与云水碰并系数 (EACRC) 直接影响降水粒子的碰并过程,对于降水效率亦有重要影响 (Johannesson et al., 2014)。参考已有研究对于云微物理方案敏感参数的选择 (徐致真等, 2018; 童颖睿和闵锦忠, 2022), 选取截断参数等 8 个参数进行参数敏感性试验, 每个参数扰动 4 次, N0G 与 EACRC 两个参数目前的统计经验值均在默认值以下变化, 故只进行负向扰动, 其他参数则以默认值为界进行正负扰动, 扰动幅度为参数默认值的 25%、50%, 具体的取值如表 1 所示, 其默认值和扰动范围均出自有关文献中标定的统计经验值及范围 (Hacker et al., 2011; Baker et al., 2014; Johannesson et al., 2014), 以期筛选出相对敏感的参数, 并探究不同参数对于正负扰动幅度的响应与敏感性。

表 1 参数敏感性试验扰动方案设计

Table 1 Disturbance scheme design of parameter sensitivity test

Test	Parameter	Default	Min	Para2	Para3	Max
SR	雨滴尺度分布截断参数 N0R(m <sup>-4</sup> )	8×10 <sup>6</sup>	4×10 <sup>6</sup>	6×10 <sup>6</sup>	10×10 <sup>6</sup>	12×10 <sup>6</sup>
SS	雪晶尺度分布截断参数 N0S(m <sup>-4</sup> )	2×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	1.5×10 <sup>6</sup>	2.5×10 <sup>6</sup>	3×10 <sup>6</sup>
SG	霰尺度分布截断参数 N0G(m <sup>-4</sup> )	4×10 <sup>6</sup>	0.5×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>	2×10 <sup>6</sup>	3×10 <sup>6</sup>
SP	云雨自动转换率 PEAUT(kg/(kg·s))	0.55	0.275	0.4125	0.6875	0.825
SX	海上云滴浓度 XNCR(m <sup>-3</sup> )	3×10 <sup>8</sup>	1×10 <sup>7</sup>	1.5×10 <sup>8</sup>	4.5×10 <sup>8</sup>	1×10 <sup>9</sup>
SM	云冰直径的有限最大值 DIMAX (m)	5×10 <sup>-4</sup>	2.5×10 <sup>-4</sup>	3.75×10 <sup>-4</sup>	6.25×10 <sup>-4</sup>	7.5×10 <sup>-4</sup>
SE	雪、云水粒子碰并系数 EACRC	1.0	0.6	0.7	0.8	0.9
SD	霰密度 DENG (kg/m <sup>3</sup> )	500	250	375	625	750

### 3.2 参数敏感性试验结果分析

不同参数主要影响的水凝物种类不同,对降水的影响存在差异,故具体的对流个例中 8 个参数的敏感性也有大小之分。从 24h 累积降水的 RMSE 与 ETS 评分可见 (图 3), 参数变化对于降水的改善集中在暴雨以上量级, 除 SX 试验, 其他试验在大暴雨量级均有效提升 ETS 评分, 其中 SR-min、SS-min、SD-max、

SP-max、SM-max、SG-para2 在提高 ETS 评分的同时降低了降水误差，说明同个参数同幅度不同向的扰动对于降水模拟的影响程度存在差异。各参数在不同量级的降水中表现不同，SM 负扰动在小雨和大雨量级降水预报中改善明显，但在暴雨及以上量级表现较差，PEAUT、NOG 的 4 组试验均降低了降水的 RMSE，说明预报效果对扰动参数、扰动区间的选择敏感。

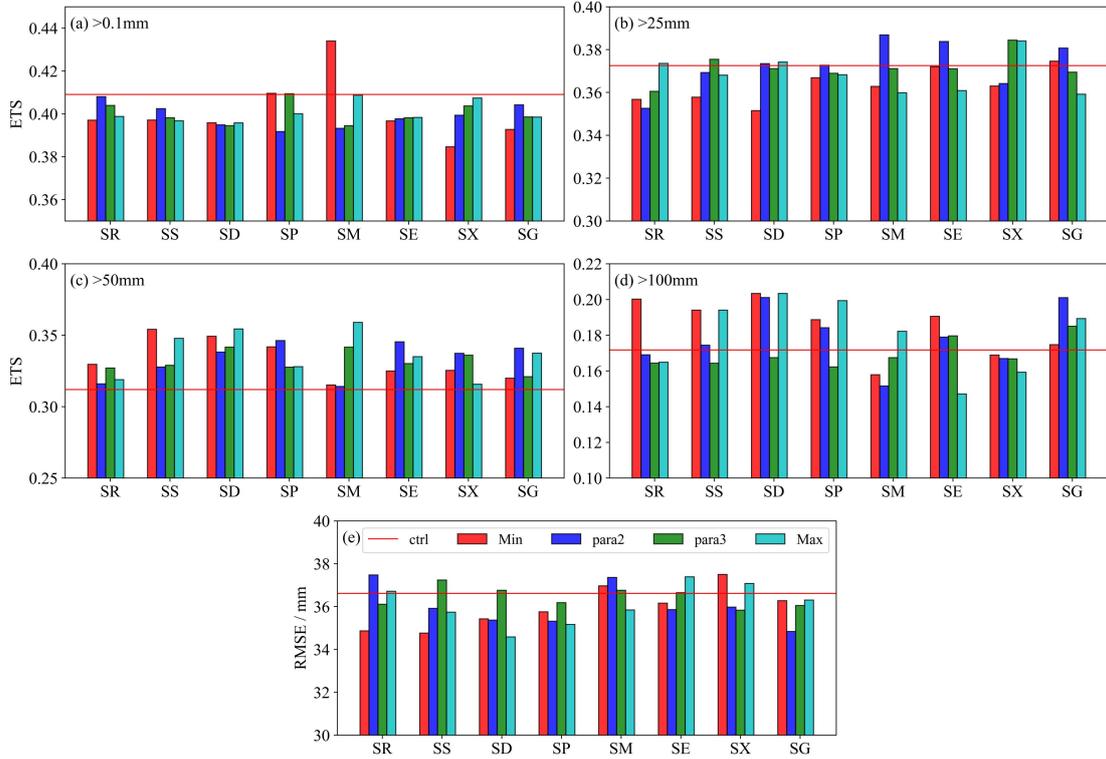


图 3 不同参数试验 24h 累积降水 (a-d) 不同量级降水 ETS 评分与 (e) RMSE 直方图

Fig. 3 ETS score (a-d) and RMSE (e) histogram of 24h accumulated precipitation in different parameter tests

平均总能量 DTE 可以衡量参数扰动后预报结果对参数的敏感程度，便于筛选出较为敏感的参数。定义如下：

$$DTE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + \kappa T'^2) \quad (1)$$

$u'$ ,  $v'$ ,  $T'$  为扰动试验与控制试验相应风速、温度的差值， $\kappa = 1 \times 10^{-5}$ 。

为定量分析参数变化对预报影响的敏感程度，图 4 给出了敏感性试验 DTE 随预报时间的变化曲线，DTE 曲线变化具有相似性，17-32h 扰动能量快速增长，在 32h 附近达到峰值，随后逐渐减小。SR 试验中 min 和 max 的 DTE 值较大，负扰动整体对预报影响大于正扰动；SS 与 SR 类似，整体来看 SS 试验 DTE 峰

值时刻早于 SR，这与降水集中时段雪晶粒子减少从而降低其参数值的扰动影响有关；SG 和 SM 试验中扰动能量与其扰动幅度间非线性变化关系，负扰动对预报影响更大；对 DIMAX 的扰动使得 DTE 存在明显的差异，仅有 SP 试验中正扰动影响大于负扰动。综合看来，SX-para3 DTE 值最小，SM-min DTE 值最大，各参数正负扰动影响存在较大差异，说明对扰动区间进行划分是有必要的。

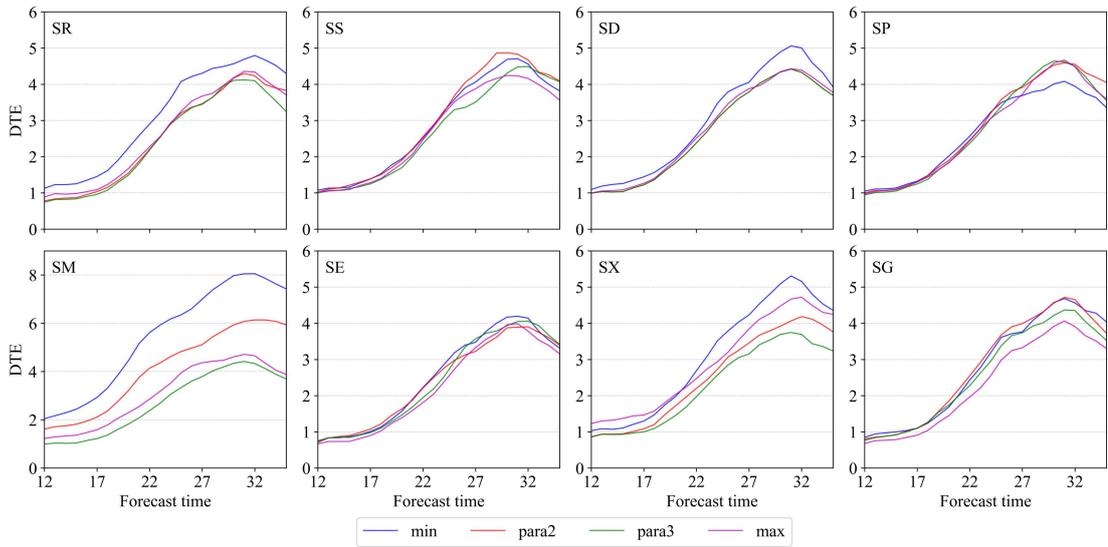


图 4 敏感性试验 DTE 随时间的演变

Fig. 4 Evolution of DTE in sensitivity test over time

参数敏感性试验的结果表明，参数间存在敏感性大小的差异，正负向的扰动对于敏感性也有不同的贡献。8 个选择的参数中，从降水评分、敏感性的时空分布等综合来看，N0R、N0S、DIMAX、XNCR 是相对较为敏感的参数，其中 N0R 与 XNCR 对于扰动幅度更加敏感。一个好的集合预报系统应在各方面综合性能优异，不仅仅在某些单一检验指标方面表现突出（苏翔和袁慧玲，2020），选择的参数中 PEAUT 和 N0G 的扰动虽然在降水的 RMSE 上显示出了较大的优势，但成员间扰动能量差异较小，缺乏集合多样性，PEAUT、EACRC 的扰动带来的影响较小，暂时不列为主要考虑的对象。

#### 4 参数集合扰动试验

##### 4.1 多参集合扰动方案设计

单参敏感性试验证明改变固定参数值可以改善降水预报，且在选择的 8 个参数中筛选出 4 个相对敏感的参数。考虑单参扰动改善有限，进行多参扰动试验，

比较不同参数、不同扰动范围组合扰动对于强降水预报效果的差异，寻找最优的多参组合方案。基于粒子转换与相互碰并过程导致的粒子含量变化、参数值变化引起的降水变化以及冷池发展等(Qiao et al., 2018)物理规律，分析物理参数之间的相关性和约束关系，探寻使模式误差增长最快的扰动参数及其伴随参数，进而研究多物理参数之间的扰动协同。

#### 4.2 参数扰动范围

参数扰动范围综合考虑现有研究中对云微物理参数的讨论 (Yussouf and Stensrud, 2012; Qiao et al., 2018; 徐致真等, 2019)，综合给出集合预报试验中参数扰动的范围 (见表 2)，通过伪随机数生成器在给定均值和上下界的情况下输出 20 个参数值，参数值的分布符合正态分布，将其随机分配给 20 个成员。

表 2 参数集合扰动试验各参数的扰动范围

Table 2 The disturbance range of each parameter in the parameter set disturbance test

Para	N0R	N0S	N0G	XNCR	DIMAX	DENG
units	$m^{-4}$	$m^{-4}$	$m^{-4}$	$m^{-3}$	m	$kg/m^3$
default	$8 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$3 \times 10^8$	$5 \times 10^{-4}$	500
min	$4 \times 10^6$	$1 \times 10^6$	$0.3 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$3 \times 10^{-4}$	300
max	$16 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$1 \times 10^9$	$8 \times 10^{-4}$	700

#### 4.3 多参集合扰动试验

参照前期的参数敏感性分析，根据参数的属性设置截断参数组合、霰相关参数组合，根据敏感性差异设置双敏感参数组合、四敏感参数组合等。单参的集合预报试验主要分析 N0R、N0S、DIMAX、XNCR 这 4 个相对敏感的参数，鉴于 N0R 与 DIMAX 的扰动均显示正、负向扰动的效果优于全范围扰动，故其他单参集合预报试验仅进行正负向扰动，具体的试验设置如表 3 所示。

表 3 多参组合扰动试验设置

Table 3 Multi-parameter combined perturbation test settings

Test Name	Test Description	Test Name	Test Description
CTRL	仅进行初值与侧边界扰动	MP_RS_1	N0R 负向扰动、N0S 负向扰动
MP_R_0	N0R 全范围扰动	MP_RS_2	N0R 负向扰动、N0S 正向扰动
MP_R_1	N0R 负向扰动	MP_RS_3	N0R 正向扰动、N0S 负向扰动
MP_R_2	N0R 正向扰动	MP_RS_4	N0R 正向扰动、N0S 正向扰动

MP_M_0	DIMAX 全范围扰动	MP_GD_0	N0G、DENG 全范围扰动
MP_M_1	DIMAX 负向扰动	MP_GD_1	N0G 全范围扰动、DENG 负向扰动
MP_M_2	DIMAX 正向扰动	MP_GD_2	N0G 全范围扰动、DENG 正向扰动
MP_S_1	N0S 负向扰动	MP_RSG_0	N0R、N0S、N0G 全范围扰动
MP_S_2	N0S 正向扰动	MP_RSG_1	MP_RS_2, N0G $\in [0.3 \times 10^6, 4 \times 10^6]$
MP_X_1	XNCR 负向扰动	MP_RSG_2	MP_RS_4, N0G $\in [0.3 \times 10^6, 4 \times 10^6]$
MP_X_2	XNCR 正向扰动	MP_RSG_3	MP_RS_3, N0G $\in [0.3 \times 10^6, 4 \times 10^6]$
MP_RM_0	N0R、DIMAX 全范围扰动	MP_RSMX_0	N0R、N0S、DIMAX、XNCR 全范围扰动
MP_RM_1	N0R 负向扰动、DIMAX 正向扰动	MP_RSMX_1	MP_RS_4+MP_M_1+MP_X_2
MP_RM_2	N0R 负向扰动、DIMAX 负向扰动	MP_RSGDMX_0	MP_RSMX_0+MP_GD_0
MP_RM_3	N0R 正向扰动、DIMAX 负向扰动	MP_RSGDMX_1	MP_RSMX_1+MP_GD_1
MP_RS_0	N0R、N0S 全范围扰动	MP_RSGDMX_2	MP_RSMX_1+MP_GD_2

注：试验名称由物理参数化方案、扰动参数（R:N0R S:N0S G:N0G D:DENG M:DIMAX X:XNCR）、序号构成，MP 表示云微物理参数化方案，试验描述中的全范围扰动为[ $\min$ ,  $\max$ ]，正向扰动为[ $\text{default}$ ,  $\max$ ]，负向扰动为[ $\min$ ,  $\text{default}$ ]。

#### 4.4 试验结果分析

扰动相同参数的试验为一小组，通过对比离散度、降水评分等的表现(图略)，MP\_M\_1、MP\_RM\_3、MP\_RS\_4、MP\_RSG\_2、MP\_RSMX\_1、MP\_RSGDMX\_2 分别为单参扰动、双敏感参数、双截断参数、多截断参数、四敏感参数、六敏感参数组合试验中表现最佳的方案，后续技巧的评估针对以上 6 类方案进行。值得注意的是，霰密度与霰粒子截断参数组合试验的表现相比 CTRL 均无明显提升，因为霰截断参数的扰动会影响霰粒子的大小，改变粒子间的碰并从而影响霰密度，即两个参数存在明确物理关系，同时扰动使得集合成员间的差异相对减小从而削弱预报能力。参考 Li 等（2019）提出的关于协同（Synergistic Effect）与拮抗效应（Antagonistic Effect）的定义与标准，结合本文的研究内容，两个及以上参数同时扰动导致预报技巧小于/大于各自扰动的情况即为拮抗/协同效应，对应地称参数间存在拮抗/协同作用。

##### 4.4.1 地面降水预报技巧评估

本文研究的降水时段为 18 日 00 时至 19 日 00 时，首先分析各组试验 24h 累积降水的模拟效果。均方根误差（RMSE）可以度量预报场与真实场的差异，本文用其来衡量集合平均预报的误差，定义为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [F(i,j) - O(i,j)]^2} \quad (2)$$

$F(i,j)$ 为集合预报场， $O(i,j)$ 为对应真实场， $m$ 和 $n$ 分别为径向和纬向格点数。

对各组试验 24h 降水均方根误差(图 5a)进行分析对比, CTRL 试验的 RMSE 降低至 28.3mm, 体现了初始场和侧边界扰动对于降水预报的改善。相比 CTRL, RMSE 降低最显著的是 MP\_RSMX\_1 和 MP\_M\_1 方案, 而 MP\_M\_1 与 MP\_RM\_3、MP\_RS\_4 与 MP\_RSG\_2 方案的对比说明参数间的相互作用可能导致预报效果的减弱, 抵消敏感参数在参数扰动中的优势; MP\_RM\_3 与 MP\_RSMX\_1 的对比说明敏感参数个数的增加可以有效制约参数相互作用的负作用。MP\_RSMX\_1 与 MP\_RSGDMX\_2 相比, 增加了敏感性相对较弱的 N0G 与 DENG, 两个参数的变化均影响霰粒子混合比, 约束关系较强, 参数增加的正贡献不敌参数间相互作用带来的负作用, 导致 6 参的扰动方案预报技巧降低。说明扰动的参数应避免选择拮抗关系强的参数, 超过阈值的参数个数其参数间的相互作用带来的负技巧会占据主导, 导致集合预报试验效果的下降。

ETS 评分体现集合预报场相对于实况降水场的预报能力,  $ETS > 0$  为有技巧预报,  $ETS = 1$  为理想状态。图 5b 为集合预报平均对不同等级降水的 ETS 评分, 小雨量级所有正向扰动雨滴截断参数的试验 ETS 都有所上升; 大雨量级所有试验均表现出正技巧, MP\_RM\_3 的 ETS 评分最高; 暴雨以上量级 MP\_RSMX\_1 方案表现最优, 截断参数的组合均不同程度降低了 ETS 评分。

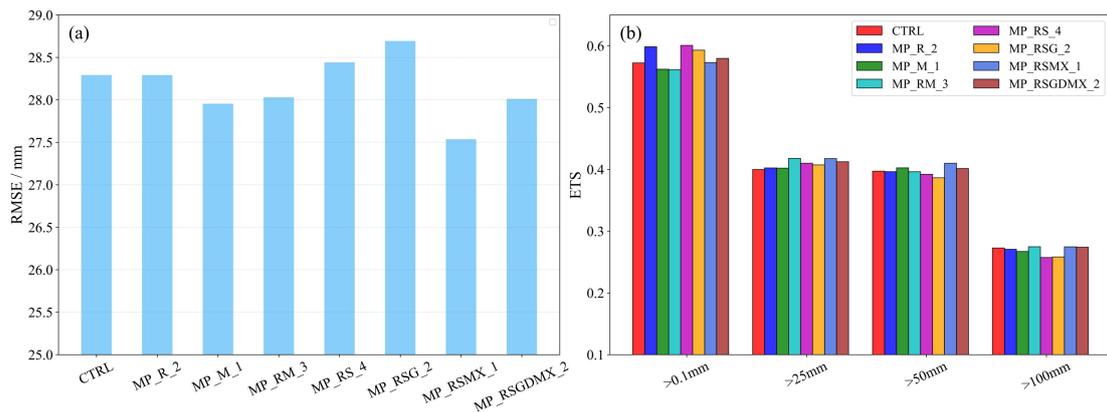


图 5 各组试验 24h 降水均方根误差的直方图 (a) 与不同降水量级的 24h ETS 评分 (b)

Fig. 5 Histogram of 24-h precipitation root mean square error (a) and 24-h ETS score of different precipitation levels (b) in each group of experiments

结合 BSS 评分（图 6）的结果来看，各组扰动试验在大雨量级的降水模拟中表现出不同程度的正技巧，MP\_RSMX\_1 在暴雨及以上量级的降水预报中均表现出较为稳定、明显的正技巧，而截断参数的组合不同程度出现了负技巧，验证了截断参数间亦存在拮抗效应，与上文均方根误差的分析结论吻合。

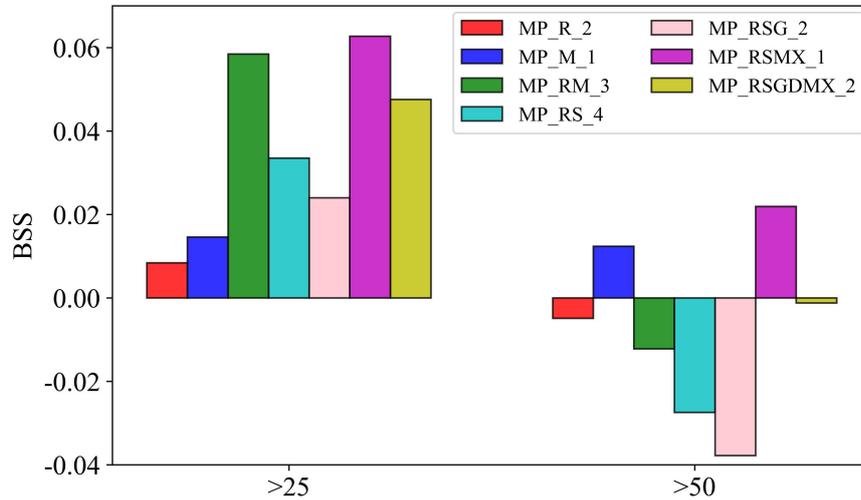


图 6 各组试验 24h 降水不同降水量级的 BSS 评分

Fig. 6 BSS scores of 24-hour precipitation of different precipitation classes were obtained in each group

图 7 为强降水中心降水的时间演变，CTRL 对预报 12-20h 与 27-32h 的小时雨强模拟偏低，20 个成员的包络线未涵盖两个时段的真值。MP\_M\_1、MP\_RM\_2、MP\_RM\_3、MP\_RSMX\_1、MP\_RSGDMX\_2 对这一问题有效修正，尤其是预报后期预报技巧得到明显改善，成功将观测的雨强峰值包络。强降水集中时段物理过程发生剧烈，故参数扰动对于强对流发生的时空区域影响显著，联合初值扰动与侧边界扰动对于较长预报时效的个例模拟具有重要意义。

以上降水预报技巧的对比分析表明，所有试验中 MP\_RSMX\_1 预报效果最佳，各项评估指标的优势明显，特别在暴雨和大暴雨的降水预报中表现出较为稳定、明显的正技巧。MP\_RSGDMX\_2 相比 MP\_RSMX\_1 预报技巧提升不大，而截断参数的组合不同程度出现了负技巧，说明截断参数之间存在制约关系，使得双截断、三截断参数的组合试验效果相比单独扰动雨滴截断参数无明显优势。参数扰动对于强对流发展旺盛的时空区域影响显著，可以有效改善雨强预报。

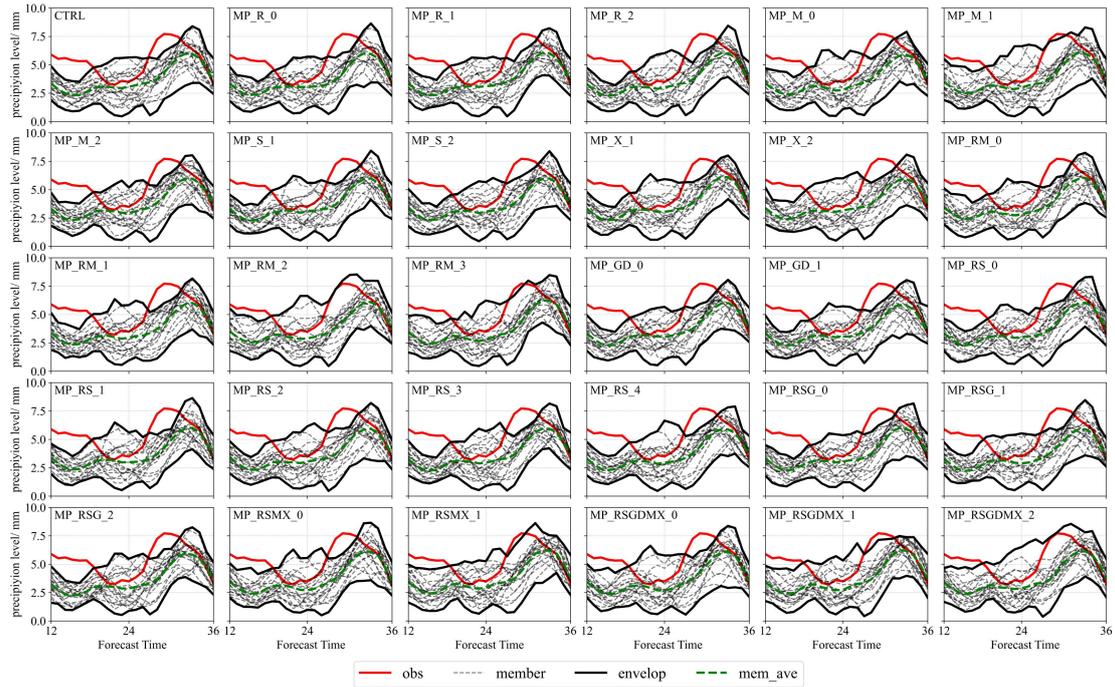


图 7 强降水区域 (31-32.5°N, 114-118°E) 逐小时降水量随时间的演变

Fig. 7 Time evolution of hourly precipitation in the central area of heavy precipitation (31-32.5°N, 114-118°E)

#### 4.4.2 大气变量的预报技巧分析

参数组合扰动有效改善了降水预报，下文对大气变量的预报技巧展开分析。集合预报系统应使成员尽可能多的包含大气的可能状态，要求成员在一定范围内尽可能发散。离散度 Spread 定义为：

$$spread = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{N} \sum_{mem=1}^N [f_{mem}(i, j) - \overline{f(i, j)}]^2 \right\}} \quad (3)$$

N 为集合成员个数， $f_{mem}(i, j)$  代表不同成员的预报场， $\overline{f(i, j)}$  为集合平均，m 和 n 分别为径向和纬向的格点数。

图 8 为不同层次大气要素的离散度技巧，由于模式扰动起作用需要时间，暂不考虑预报前 12h。参数扰动方案使中层大气要素的集合离散度与 CTRL 的差距逐渐增加，与降水集中时段剧烈的物理过程相关，此时参数扰动对于预报的影响更显著，而集合离散度的增大也将增加集合成员包含真值的可能性，从而提高集合预报技巧，其中 4 参和 6 参敏感区间组合扰动试验的 spread 相比其他方案提升幅度显著。对流层中层 500hPa 各大气要素的 spread 较早到达峰值，尤其是水汽混合比在预报 22h 后离散度急剧下降，同时段 850hPa 的水汽混合比的 spread 仍

然处于上升阶段，与降水集中时段水汽向下层的输送有关。参数扰动有效提升了多数要素的集合离散度，但几乎所有方案 500hPa 温度与 850hPa 经向风的离散度相较 CTRL 反而降低，前者在预报后期尤为明显。

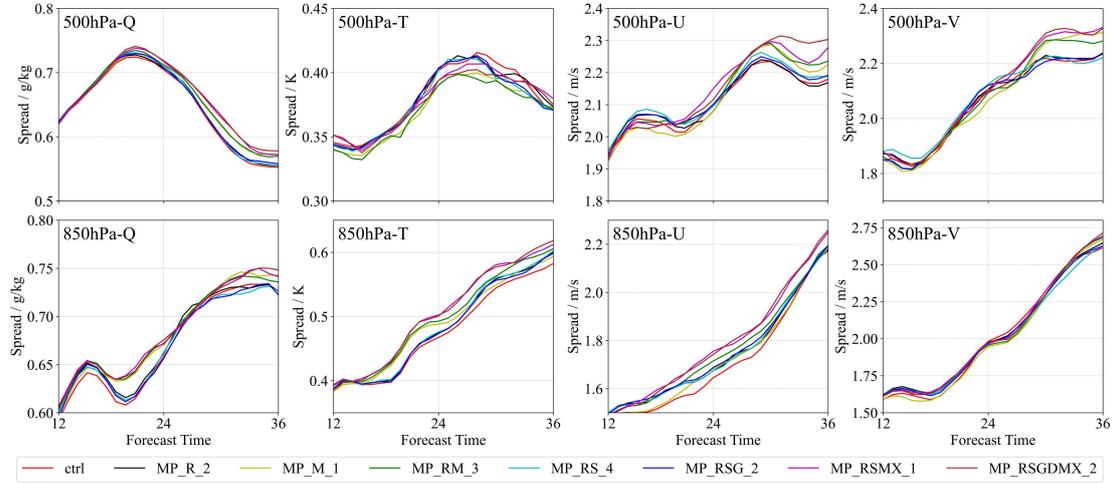


图 8 不同参数组合扰动试验大气变量的离散度时间演变

(第一行为 500hPa，第二行为 850hPa，自左至右分别为 Q、T、U、V)

Fig. 8 Dispersion time evolution of atmospheric variables in different parameter combinations perturbation experiment(The first row is 500hPa, the second row is 850hPa, Q, T, U, V from left to right)

离散度应当与均方根误差相匹配，spread 与 RMSE 比值为 1 时说明集合系统性能优秀，小于 1 说明离散度估计不足，预报误差过大，成员在一定范围内越发散越能表征大气的各种可能性。大气变量的 spread/RMSE 时间演变(图 9)显示，参数的增加和扰动区间的选择提高了大气要素预报的可靠性，除 500hPa 温度与 850hPa 径向风外其他变量做到了降低误差的同时提高离散度技巧。从不同层次的表现来看，低层对于参数扰动的响应更加明显，表现为不同方案的 spread/RMSE 比值曲线分布更加疏散，中层 500hPa 除了 T，其他大气变量的曲线分布较为密集，曲线间出现明显差异的时段也较后。对比离散度与误差的分布来看，这种现象出现的原因可能是物理量在不同层次本身量级存在差异导致的某一层误差增量加大，亦或是参数影响的物理过程发生的层次存在主次之分，导致扰动的影响存在较大区别。截断参数的扰动试验出现了负技巧，与其本身的性质有关，在强对流活动中截断参数的变化量级较大，扰动范围的缩小反而使得其对真值的捕捉能力下降。

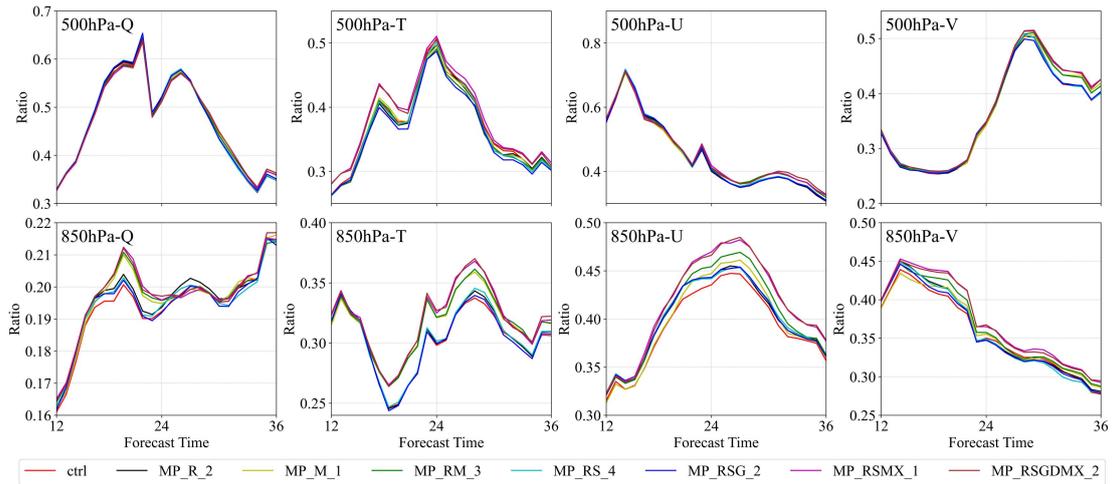


图9 同图8，但为离散度与均方根误差比值的时间演变

Fig. 9 same as Fig. 8, but showing the time evolution of the ratio of dispersion to root mean square error

以上对大气变量的预报技巧表明，低层温湿场、风场对于参数扰动的响应更明显，所有组合试验中 MP\_RSMX\_1 和 MP\_RSGDMX\_2 对于预报的改善效果较优，只扰动截断参数的几组试验相比 CTRL 有的变量（Q、T）出现了负技巧，参数的增加和扰动区间的选择对于预报技巧的提升有积极作用，但不敏感参数的增加和其扰动范围的选择对于预报技巧的提升十分有限，反而参数间的相互作用和拮抗关系会导致集合成员间的差异相对减少，导致部分相关物理量预报能力的下降，与降水预报技巧评估的结论一致。

#### 4.4.3 扰动影响的时空差异

不同参数扰动方案对预报的改善侧重点不同，随着参数的增加和不同参数的组合，扰动对预报的影响有何差异，这部分主要对扰动影响的时空演变进行分析。

图 10 给出了各组合方案 DTE 平均值与极值随预报时效的变化，可以看到 MP\_RSGDMX\_2 相比 MP\_RSMX\_1 方案 DTE 的均值无明显提升，预报前期一度低于四参扰动方案，敏感性较差的截断参数的加入对于截断参数扰动试验扰动的发生发展没有大的贡献，一度产生负技巧。截断参数的组合扰动表现垫底，单独扰动雨滴截断参数的效果最差，说明单纯扰动截断参数产生的扰动有限，即使后期得到发展，其量级也不敌其他方案产生的扰动。DTE 在预报 30h 附近达到饱和，随后参数扰动对于预报的影响逐渐减小，因为降水集中时段大气物理过程发展相对剧烈，物理量的变化范围扩大导致 DTE 增加，而模拟后期降水系统

逐渐偏离模拟区域。极值曲线表明，截断参数组合扰动的影响十分有限，多参数扰动可以一定程度上克服同类型参数的局限性。各组合方案 DTE 在预报前期的差距较小，在预报 17h 后急剧增长，试验间的差异逐渐体现，4 参和 6 参试验相比其他试验不仅在全时段都保持较高的扰动影响，在到达峰值后扰动能力的减弱也相对缓慢。

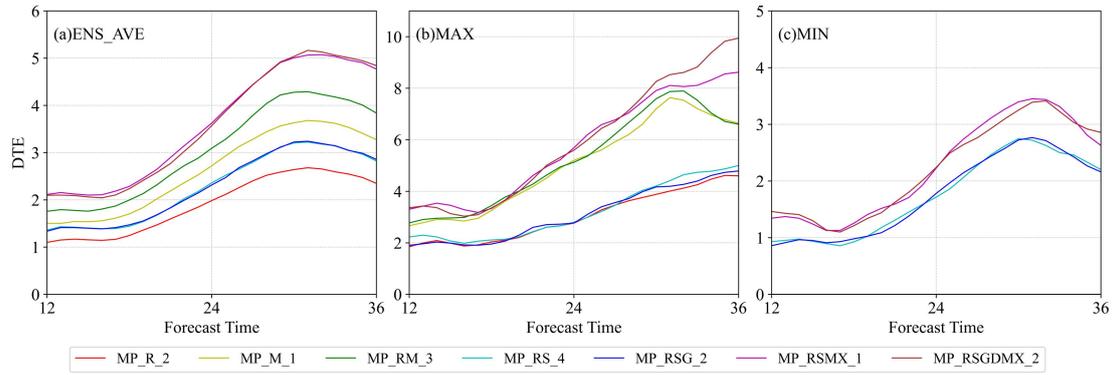


图 10 各组试验 500hPaDTE 平均值 (a)、最大值 (b)、最小值 (c) 的时间演变

Fig. 10 Time evolution of the mean, maximum, and minimum DTE in each group of experiments

通过前文的分析，扰动能量在预报 32h 附近达到峰值，选择这一时刻进行参数组合扰动影响空间分布的研究，500hPa 各方案的 DTE 空间分布显示(图 11)，只扰动雨滴截断参数的试验其扰动中心范围较小，位于安徽六安东侧，XNCR、NOS 单独扰动的结果类似，扰动中心呈点状分布，江苏盐城亦出现了较为明晰的扰动中心。DIMAX 的扰动则使安徽中部出现了带状的扰动中心，其位置与降水的大值带对应较好，扰动范围相比其他三个单参扰动试验明显向西北角扩大延伸。组合参数扰动这种现象更加明显，但敏感参数 NOR 与 DIMAX 的组合扰动相比双截断参数的组合表现更加突出，不仅实现扰动范围的扩大，扰动中心的强度也有所增强。霰截断参数的加入反而减弱了六安、盐城的扰动中心强度，证明了前文参数的相互作用对扰动能量存在抑制的结论。MP\_RSMX\_1 与 MP\_RSGDMX\_2 的扰动中心强度、范围相比 CTRL 提升显著，相较 MP\_RSMX\_1 对于 MP\_RM\_3 的改变而言，MP\_RSGDMX\_2 方案 2 个参数的增加带来的扰动能量变化不大。4 参和 6 参扰动试验在湖北中部出现新发展起来的扰动中心，是参数间相互作用的结果，但相比霰相关参数加入带来的负作用，MP\_RSMX\_1 更多体现的是参数相互作用带来的正贡献，凸显参数选择的重要性。低层 850hPa

的 DTE 分布也得到类似结论，湖北中部新发展起来的扰动中心在该层次形态更清晰。为了集合预报获得更好的预报效果，参数间的约束作用是必须考虑的因素，扰动范围也需要大量测试。

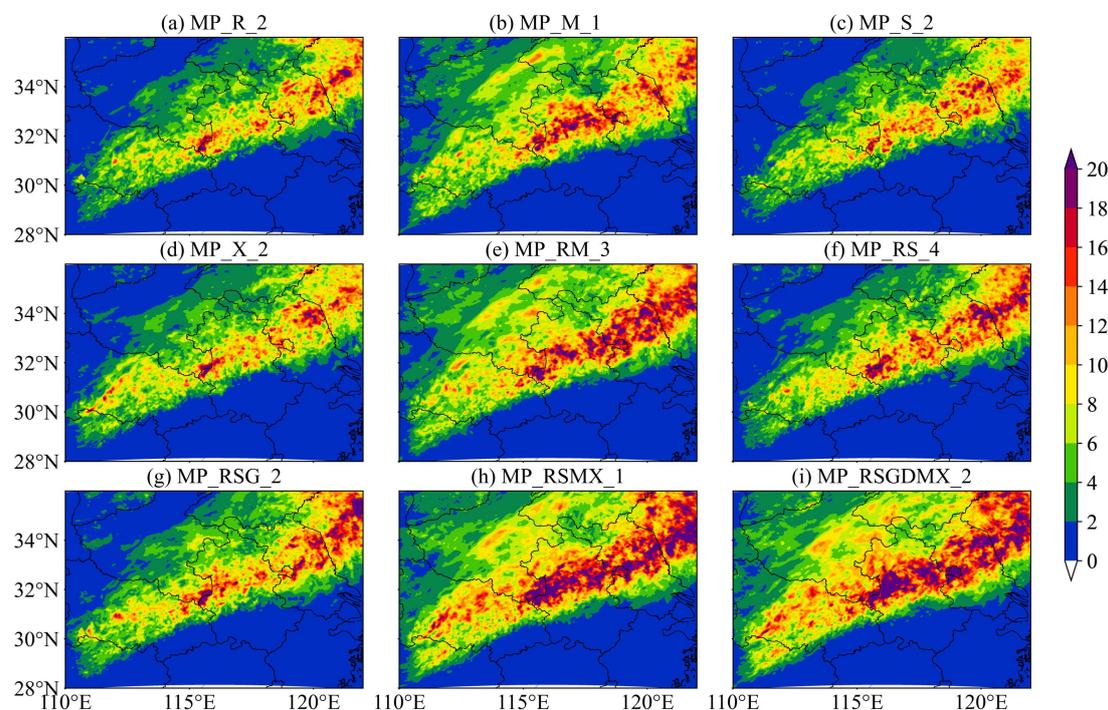


图 11 500hPa 各组试验 DTE 峰值时刻的水平分布

Fig. 11 Horizontal distribution of DTE peak time in each group of experiments at 500hPa

以上分析表明，敏感参数、相互约束关系较弱的参数的加入会使得扰动对预报的影响不断增强，敏感性较弱、与已有参数拮抗作用强的参数的增加会使得扰动对预报的影响不升反降，故而在保证参数呈协同关系的基础上增加参数个数，以达到有效合理提高集合预报效果。

就参数集合扰动试验的结果来看，参数对于预报技巧的贡献不仅因自身的敏感性、扰动区间的敏感性存在大小之分，也因为参数间的相互作用出现正负之分，这一结论无论在大气要素还是地面降水的预报都得到充分体现，且两者具有较好的一致性。参数扰动对于 U、V、Q 的离散度均有较大的提升，T 的离散度技巧改善相对有限，低层相比高层响应更加明显。不仅回答了扰动哪些参数、如何扰动才能提高集合预报技巧的问题，也提出了考虑参数约束关系进行初边值与模式协同扰动的新思路。

## 5 不同参数化方案的联合参数扰动试验

前文的工作针对云微物理参数化方案进行，预报技巧得到了显著提升，在模式的模拟中，边界层方案的作用也十分重要，故下文考虑进行两个参数化方案的联合参数扰动。参数的选择方面，参考已有研究选择了临界理查森数（BRCR）、计算动量扩散系数的廓线指数（PFAC）、表面层顶部普朗特系数（CFAC）三个对降水有显著影响的参数(Hong and Pan, 1996; Di et al., 2015)进行联合参数扰动试验，具体的扰动范围与默认值如表 4 所示。

表 4 边界层方案的参数选择和扰动范围

Table 4 Parameter selection and disturbance range of boundary layer scheme

Code	Default	Disturbance range
BRCR	0.5	[0.25,0.75]
CFAC	7.8	[3.9,15.6]
PFAC	2	[1,3]

具体的试验设计见表 5，与云微物理方案的参数扰动研究类似，首先进行扰动区间的敏感性测试，综合对比不同区间离散度与 spread/RMSE 等评价指标的表现确定适宜的扰动范围。结果显示，临界理查森数负扰动、动量扩散系数的廓线指数正扰动表现相对较优，对低层湿度的预报技巧改善尤其显著；普朗特数系数正负扰动差距不大，正扰动略占优势，但由于自身的敏感性不强导致其对离散度的贡献远不如其他两个参数，对于物理量预报的改善主要体现在中层 500hPa。基于前文的结论，独立性较强的扰动参数的增加对于大气变量和降水的预报有积极效果，故直接进行边界层参数的三参组合扰动和两方案的联合扰动试验。出于计算成本的考量，联合扰动试验以云微物理方案的 MP\_RSMX\_1 试验和边界层扰动进行，首先进行 MP\_RSMX\_1 与边界层三个参数全范围扰动的联合试验来测试联合扰动的可行性。

表 5 联合扰动试验设置

Table 5 combined perturbation test settings

Test Name	Test Description
PBL_B_1	BRCR 负向扰动, $BRCR \in [0.25,0.5]$
PBL_B_2	BRCR 正向扰动, $BRCR \in [0.5,0.75]$
PBL_P_1	PFAC 负向扰动, $PFAC \in [1,2]$

PBL_P_2	PFAC 正向扰动, PFAC ∈ [2,3]
PBL_C_1	CFAC 负向扰动, CFAC ∈ [3.9,7.8]
PBL_C_2	CFAC 正向扰动, CFAC ∈ [7.8,15.6]
PBL_BPC_0	BRCR、PFAC、CFAC 全范围扰动
MPBL_0	在 MP_RSMX_1 上叠加边界层三个参数的全范围扰动
MPBL_1	在 MP_RSMX_1 上叠加边界层三个参数的敏感范围扰动

注: PBL 表示边界层方案, MPBL 表示联合扰动, 正向扰动为[default, max], 负向扰动为[min, default]。(B:BRCR P:PFAC C:CFAC)

首先就试验结果展开分析。图 12 给出了不同参数扰动方案大气要素离散度与均方根误差比值的时间演变, 综合来看云微物理方案的参数扰动效果优于边界层方案的参数扰动, MPBL\_1 在所有试验中表现最佳, 说明方案的联合扰动亦显示出协同效应, 可以取得更优的预报。虽然 MPBL\_0 在低层水汽混合比和温度场的预报上技巧表现优于 MPBL\_1, 但整体来看, 边界层方案三个参数的敏感范围扰动相比全范围扰动预报效果更理想, 同时联合扰动在低层的大气要素技巧提升更显著, 这一点与云微物理方案参数扰动的结论一致。

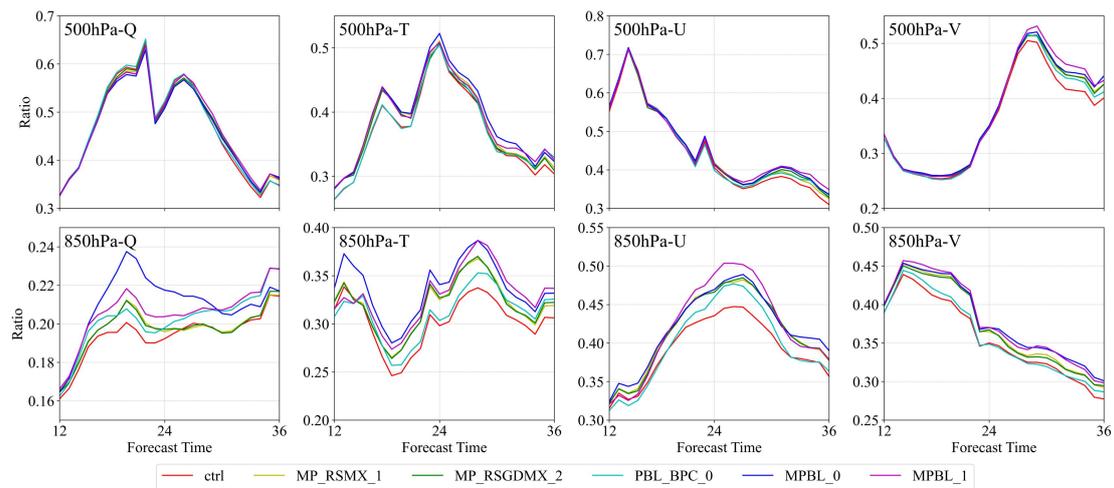


图 12 不同参数化方案参数扰动试验离散度与均方根误差比值的时间演变

(第一行为 500hPa, 第二行为 850hPa, 自左至右分别为 Q、T、U、V)

Fig. 12 Time evolution of the ratio of spread and RMSE of parameter perturbation test for different parameterization schemes(The first row is 500hPa, the second row is 850hPa, Q, T, U, V from left to right)

图 13 为强降水中心的雨强模拟, 边界层参数的单独扰动 PBL\_BPC\_0 对于雨强模拟的两个“偏差”改善不大, 对降水速率峰值的把握更好。联合后的参数扰动对雨强预报后期的改善效果显著, 但相比云微物理方案的单独扰动, 预报前期的预报技巧下降, 说明相比两个参数化方案的单独参数扰动, 联合扰动结合了

两者的优势，既有效减弱了雨强模拟两个时段的偏差，又在一定程度上提高了对雨强极端状况的预报。

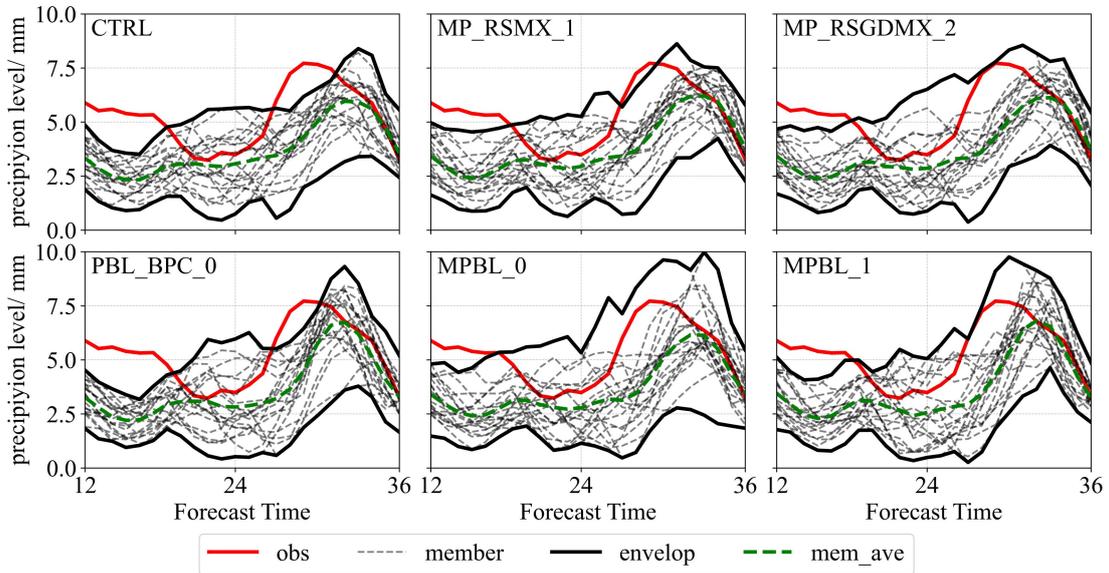


图 13 强降水区域 (31-32.5°N, 114-118°E) 逐小时降水量随时间的演变

Fig. 13 Hour-by-hour precipitation evolution of the heavy precipitation center (31-32.5°N, 114-118°E)

对流尺度集合成员的平均预报会平滑掉成员的极端情况，使得预报效果总体来看误差减小，但对于极端事件并不敏锐，概率预报是对未来某气候要素或天气要素在一定取值范围内出现的概率所作的预报，最大程度地包含实际大气要素可能发生的各种情况，相对更具科学性。接下来就不同试验大暴雨降水的概率预报（图 14）展开分析，相比 CTRL 和云微物理与边界层方案单独的参数扰动，联合扰动试验有效缩小了漏报区域，边界层的参数扰动使得东伸的雨带有所收缩，更契合实况，但对西部点状雨带的模拟不友好，造成了点状雨带间的合并，这一点在 PBL\_BPC\_0 和 MPBL\_1 试验中都有体现。但相比 CTRL 试验，联合参数扰动成功包含了更大范围的目标区域。结合 RMSE 来看，MPBL\_1 的 RMSE 降低至 27mm，云微物理方案参数扰动的 RMSE 最低为 27.5mm，直观体现出联合扰动方案在降水预报方面的优越性。

上述联合参数的扰动试验确定了边界层方案三个参数扰动的适宜范围，其中 BRCC 负扰动与 PFAC 正扰动对于低层湿度场的预报改善明显，CFAC 正扰动的改善体现在中层物理量的预报。边界层三个参数之间制约关系弱，在离散度技巧

方面表现协同，参数的增加有效提升离散度，验证了前文云微物理方案参数扰动的结论。联合扰动方案对于大气变量和降水预报技巧的提升均有正贡献，结合了两个方案参数扰动的优势，体现出物理方案间的协同。

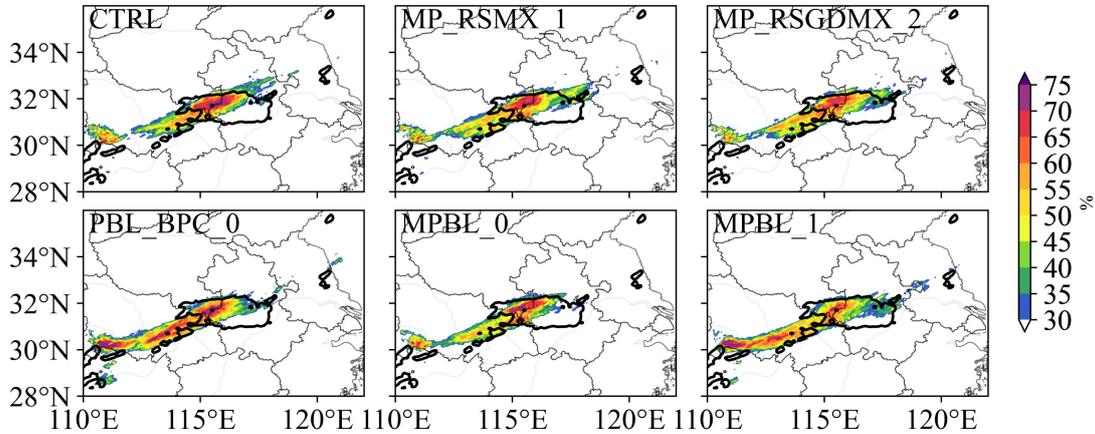


图 14 各组方案 24h 累积降水大暴雨概率预报(黑色等值线: 24h 降水达 100mm 的区域)

Fig. 14 Probability forecast of 24-hour cumulative precipitation and heavy rain in each group of schemes

(the black contour line is the area where the actual rainstorm level up to 100mm)

## 6 结论

物理过程是影响数值模式定量降水预报结果的重要模块，尤其是微物理过程和边界层过程，其经验性参数的取值给数值预报带来了很大的预报不确定性。本文基于 WRF 模式，对 2020 年一次梅雨锋暴雨过程进行了多参数物理扰动集合预报试验，基于参数的敏感性特征及扰动范围的敏感性进行了多组集合预报试验，对比分析不同参数及不同扰动范围的组合对预报结果的影响，并针对微物理方案和边界层方案中的敏感参数设计和测试了联合扰动方案，主要结论如下：

(1) 目前选用 WSM6 方案进行参数扰动时常选用的 8 个参数中，云冰直径的有限最大值 (DIMAX)、海上云滴浓度 (XNCR)、雨滴截断参数 (NOR)、雪晶截断参数 (NOS) 为相对敏感的参数。其中 DIMAX 越小，云水向雨水转变的速率越快，XNCR 影响云水转换率，较大的 XNCR 能使更多云水转化为雨水，较大的雨滴和雪晶截断参数则会减小降水粒子大小，加强低层蒸发率，从而显著影响降水过程，DIMAX 负扰动、NOR 正扰动、NOS 正扰动、XNCR 正扰动相比统计经验全范围扰动表现出更高的集合预报技巧。

(2) 针对云微物理方案的多参数物理扰动试验中，在适宜区间扰动上述 4

个敏感参数的 MP\_RSMX\_1 方案，在降水预报的离散度技巧中呈现出较明显的改进作用，在降低集合平均预报误差的同时有效提升了集合离散度，减小了暴雨概率预报的空报率，同时提升了湿度场、纬向风、低层温度场、对流层中层经向风的集合离散度，是云微物理参数扰动方案中表现最优的方案。

(3) MP\_RM\_3 相较 MP\_R\_2、MP\_M\_1 离散度技巧有所提升，说明相互独立的参数（如雨滴截断参数 NOR 和云冰直径的有限最大值 DIMAX）联合扰动后呈协同作用，有效改进集合预报结果。存在较强约束关系的参数（如霰截断参数与霰密度）扰动后呈拮抗作用，导致扰动后预报效果存在不升反降的可能。截断参数组合方案的结果显示随着截断参数个数的增加，预报技巧并未有效提升。说明在选取物理过程中的扰动参数时，应优先考虑呈协同关系或制约关系较弱的敏感参数，避免采用依赖关系较强，扰动后可能产生拮抗作用而使扰动衰减的参数。

(4) 边界层选择的 BRCR（临界理查森数）、PFAC（动量扩散系数的廓线指数）、CFAC（普朗特数系数）三个参数中，BRCR、PFAC 对扰动相对敏感，CFAC 敏感性较弱，但三个参数同时扰动时显著改善了 850hPa 湿度场的预报，呈现协同作用，改善了集合预报效果，可见协同参数的增加对于预报技巧的提升有积极意义，该结果与微物理过程参数扰动试验相一致。

(5) 微物理方案与边界层方案参数的联合扰动方案结合了两个方案参数扰动的优势，对于大气变量和降水预报技巧的提升均有正贡献，说明不同参数化方案的参数扰动带来的离散度技巧可以叠加，尤其在适宜范围扰动多个参数化方案的制约关系较弱或呈协同关系的敏感参数时，多参数扰动可以取得更优的效果。

目前的参数扰动研究多探究扰动某（几）个参数对于特定物理量的影响，多参数扰动也以 SPP 方法为主，基本上没有考虑参数间的依赖关系对扰动的影响。本文的研究结果表明，扰动参数的选择应以敏感参数为先，并给出 WSM6 方案的 4 个较敏感参数，提出考虑参数间依赖关系、扰动范围的多参数扰动更有利于集合预报效果的提升，为今后参数扰动中如何选择扰动参数、如何扰动、如何协调参数间的扰动提供了有价值的参考。但参数间的依赖关系相当复杂，如何进行定量表示仍需进行大量工作来探明，且该结论基于一次梅雨锋暴雨个例，是否适用于同类型降水也需进一步探讨。

参考文献:

- Baker L H, Rudd A C, Migliorini S, et al. 2014. Representation of model error in a convective-scale ensemble prediction system[J]. *Nonlinear Proc Geophys*, 21(1): 19-39.
- Bouttier F, Vié B, Nuissier O, Raynaud L. 2012. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140: 3706–3721.
- 陈静, 陈德辉, 颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展[J]. *应用气象学报*, (04): 497-507. Chen Jing, Chen Dehui, Yan Hong. 2002. A brief review on the development of ensemble prediction system[J]. *Chinese Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, (04): 497-507.
- 陈静, 李晓莉. 2020. GRAPES 全球/区域集合预报系统 10 年发展回顾及展望[J]. *气象科技进展*, 10(02): 9-18+29. Chen J, Li X L. 2020. The Review of 10 Years Development of the GRAPES Global/Regional Ensemble Prediction[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 10(02): 9-18+29.
- 陈涛, 张芳华, 于超, 马杰, 张夕迪, 沈晓琳, 张芳, 罗琪. 2020. 2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. *气象*, 46(11): 1415-1426. Chen Tao, Zhang Fanghua, Yu Chao, Ma Jie, Zhang Xidi, Shen Xiaolin, Zhang Fang, Luo Qi. 2020. Synoptic Analysis of Extreme Meiyu Precipitation over Yangtze River Basin During June-July 2020[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 46(11): 1415-1426.
- Di Z, Duan Q, Gong W, Wang C, Gan Y, Quan J, Li J, Miao C, Ye A, Tong C. 2015. Assessing WRF model parameter sensitivity: A case study with 5 day summer precipitation forecasting in the Greater Beijing Area[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42: 579– 587.
- Fu P, Zhu K, Zhao K, et al. 2019. Role of the Nocturnal Low-level Jet in the Formation of the Morning Precipitation Peak over the Dabie Mountains[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36: 15-28.
- Fu S, Yu F, Wang D, et al. 2013. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the mei-yu period of 2010[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 56: 282–300.
- 高文华, 赵凤生, 胡志晋, 等. 2012. CAMS 云微物理方案的改进及与 WRF 模式耦合的个例研究[J]. *地球物理学报*, 55(02): 396-405. Gao Wenhua, Zhao Fengsheng, Hu Zhijin, et al. 2012. Improved CAMS cloud microphysics scheme and numerical experiment coupled with WRF model [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 55(02): 396-405.
- 顾小祥, 李国平. 2019. 云微物理方案对一次高原切变线暴雨过程数值模拟的影响[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 41(03): 526-536. Gu Xiaoxiang, Li Guoping. 2019. Impact of cloud microphysics schemes on numerical simulation of a plateau shear line rainstorm event[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition (in Chinese)*, 41(03): 526-536.

- 郭淳薇, 杨慧玲, 成丹. 2018. 不同微物理方案中云凝结核数浓度对北京一次暴雨过程影响的对比研究[J]. 干旱气象, 36(06): 979-989. Guo Chunwei, Yang Huiling, Cheng Dan. 2018. Effects of Cloud Condensation Nuclei Concentration on a Heavy Rainstorm Case in Beijing Using Different Cloud Microphysical Schemes [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 36(06): 979-989.
- Hacker J P, Snyder C, Ha S Y, et al. 2011. Linear and non-linear response to parameter variations in a mesoscale model [J]. Tellus, 63(A): 429-444.
- Hong S, Pan H. 1996. Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model[J]. Mon. Wea. Rev., 124(10): 2322-2339.
- Jiang H L, Feingold G, Sorooshian A. 2010. Effect of aerosol on the susceptibility and efficiency of precipitation in warm trade cumulus clouds [J]. J Atmos Sci, 67(11): 3525-3540.
- Johannesson G, Lucas D, Qian Y, et al. 2014. Sensitivity of precipitation to parameter values in the community atmosphere model version 5. United States: Sandia National Lab.
- 康延臻, 靳双龙, 彭新东, 等. 2018. 单双参云微物理方案对华北“7·20”特大暴雨数值模拟对比分析[J]. 高原气象, 37(2): 481-494. Kang Yanzhen, Jin Shuanglong, Peng Xindong, et al. 2018. Comparative Analysis of Single-Moment and Double-Moment Microphysics Schemes in WRF on the Torrential Rainfall Event in North China During 19-21 July, 2016 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(2): 481-494.
- Li J, F Zheng, C Sun, J Feng and J Wang. 2019. Pathways of Influence of the Northern Hemisphere Mid-high Latitudes on East Asian Climate: A Review [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 36: 902-921.
- 李祥, 张立凤, 王敬团. 2020. 梅雨锋暴雨预报对分辨率与积云参数化的敏感性[J]. 暴雨灾害, 39(6): 637-646. Li Xiang, Zhang Lifeng, Wang Jingnan. 2020. The sensitivity of the prediction of Meiyu torrential rainfall to model resolution and cumulus parameterization [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 39(6): 637-646.
- 李艳伟, 全鑫, 张泽锋. 2018. CCN 数浓度及参数化方案对一次层云降水过程影响的数值研究[J]. 大气科学学报, 41(03): 404-415. Li Yanwei, Quan Xin, Zhang Zefeng. 2018. Numerical research of CCN concentration and its parameterization scheme's influence on a stratiform precipitation process [J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(03): 404-415.
- 李喆, 马占山, 刘奇俊, 等. 2019. GRAPES 双参数云微物理方案的改进和云降水个例模拟研究: GRAPES\_SCM 对热带对流云个例的模拟研究[J]. 气象, 45(06): 756-765. Li Zhe, Ma Zhanshan, Liu Qijun, et al. 2019. The Improvement of GRAPES Double Moment Cloud Scheme and Case Study of Cloud Precipitation: Modeling Study of Tropical Convective Cloud via GRAPES\_SCM [J]. Meteorology (in Chinese), 45(06): 756-765.

- 刘晓莉, 王琼. 2018. 雨滴和霰谱形参数对江淮地区强降水影响的数值研究[J]. 大气科学学报, 41(04): 513-524. Liu Xiaoli, Wang Qiong. 2018. Numerical study on the influence of rain and graupel size distribution shape on heavy rainfall in the Yangtze-Huaihe Region[J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(04): 513-524.
- 罗丽萍. 2018. 中国东部地区强对流冰雹过程数值模拟和机理分析[D]. 南京大学博士学位论文. Luo Liping. 2018. Numerical simulation and mechanism of hailstorm system over Eastern China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Nanjing University.
- Morales A, Morrison H, Posselt D J. 2018. Orographic Precipitation Response to Microphysical Parameter Perturbations for Idealized Moist Nearly Neutral Flow[J]. J. Atmos. Sci., 75(6): 1933-1953.
- Qiao X, Wang S, Min J. 2018. The Impact of a Stochastically Perturbing Microphysics Scheme on an Idealized Supercell Storm[J]. Mon. Wea. Rev., 146(1): 95-118.
- Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi S, et al. 2010. Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over Southeast India[J]. Ann Geophys., 28: 603-619.
- Raynaud L, Bouttier F. 2016. Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale[J]. Q.J.R. Meteorol. Soc., 142: 854-866.
- 石荣光, 刘奇俊, 马占山. 2015. 利用 GRAPES 模式研究气溶胶对云和降水过程的影响[J]. 气象, 41(03): 272-285. Shi Rongguang, Liu Qijun, Ma Zhanshan. 2015. Numerical Simulation of Aerosol Effects on Cloud and Precipitation Using GRAPES Model[J]. Meteorology (in Chinese), 41(03): 272-285.
- 苏翔, 袁慧玲. 2020. 集合预报统计学后处理技术研究进展[J]. 气象科技进展, 10(02): 30-41. Su Xiang, Yuan Huiling. 2020. The Research Progress of Ensemble Statistical Postprocessing Methods[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 10(02): 30-41.
- 苏翔, 康志明, 庄潇然, 等. 2021. 2020 年梅雨期暴雨雨带预报不确定性分析[J]. 气象, 47(11): 1336-1346. Su X, Kang Z M, Zhuang X R, et al. 2021. Uncertainty analysis of heavy rain belt forecast during the 2020 Meiyu period [J]. Meteor Mon(in Chinese), 47 (11): 1336-1346.
- 童颖睿, 闵锦忠. 2022. 云微物理方案参数扰动对华北“7.20”暴雨的集合预报试验[J]. 气象科学, 42(02): 213-224. Tong Yingrui, Min Jinzhong. 2022. Ensemble forecast experiment of North China "7.20" torrential rain by cloud microphysics scheme parameters disturbance[J]. Meteorological Science (in Chinese), 42(02): 213-224.
- 王洪, 尹金方, 王东海. 2014. 单双参云微物理方案对华南暴雨的模拟对比分析[J]. 高原气象, 33(05): 1341-1351. Wang Hong, Yin Jinfang, Wang Donghai. 2014. Comparative Analysis of Single-Moment and

- Double-Moment Microphysics Schemes on a Local Heavy Rainfall in South China[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(05): 1341-1351.
- 王坤, 张飞民, 孙超, 等. 2014. WRF-WSM3 微物理方案在青藏高原地区暴雪模拟中的改进及试验[J]. *大气科学*, 38(01): 101-109. Wang Kun, Zhang Feimin, Sun Chao, et al. 2014. Development and Validation of WRF-WSM3 scheme in Simulation of Snowstorm in the Tibet Plateau[J]. *Atmospheric Science (in Chinese)*, 38(01): 101-109.
- 王文君, 朱彬, 杨素英, 等. 2018. 两类双参数云微物理方案对夏季强降水事件模拟能力的对比研究[J]. *大气科学学报*, 41(06): 721-730. Wang Wenjun, Zhu Bin, Yang Suying, et al. 2018. Comparison and analysis of strong precipitation simulation capability of Morrison and Milbrandt-Yau two-moment cloud microphysical schemes[J]. *Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(06): 721-730.
- White B, Gryspeerdt E, Stier P, et al. 2017. Uncertainty from the choice of microphysics scheme in convection-permitting models significantly exceeds aerosol effects[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17: 12145–12175.
- 伍华平, 束炯, 顾莹, 等. 2009. 暴雨模拟中积云对流参数化方案的对比试验[J]. *热带气象学报*, 25(2): 175-180. Wu Huaping, Shu Jiong, Gu Ying, et al. 2009. The Effects of Different Cumulus Parameterization Schemes in WRF on Heavy Rainfall in Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25(2): 175-180.
- 肖柳斯, 张华龙, 张旭斌, 冯璐, 谌志刚, 戴光丰. 2021. 基于 CMA-TRAMS 集合预报的“5·22”极端降水事件可预报性分析[J]. *气象学报*, 79(6): 956-976. Xiao Liusi, Zhang Hualong, Zhang Xubin, Feng Lu, Chen Zhigang, Dai Guangfeng. 2021. Predictability analysis of the extremely heavy rainfall in the Pearl River Delta on 22 May 2020 using CMA-TRAMS-based ensemble prediction system[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 79(6): 956-976.
- 徐渊, 闵锦忠, 庄潇然. 2022. 基于对流尺度集合模拟的长江中下游暖区对流过程的可预报性研究[J]. *高原气象*, 41(03): 684-697. Xu Yuan, Min Jinzhong, Zhuang Xiaoran. 2022. Predictability Study of Warm-sector Convective Event over the Middle-lower Reaches of the Yangtze River: Based on Convection-allowing Ensemble Simulation[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 41(03): 684-697.
- 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(05): 849-868. Xu Zhizhen, Chen Jing, Wang Yong, et al. 2019. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction[J]. *Chinese Journal of Meteorology (in Chinese)*, 77(05): 849-868.
- 尹金方, 王东海, 翟国庆. 2014. 区域中尺度模式云微物理参数化方案特征及其在中国的适用性[J]. *地球*

- 科学进展, 29(2): 238-249. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing. 2014. A study of Characteristics of the Cloud Microphysics Parameterization Schemes in Mesoscale Models and its Applicability to China[J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 29(2): 238-249.
- 尹金方. 2013. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构建[D]. 浙江大学博士学位论文. Yin Jinfang. 2013. The Study on Observation and Parameterization of Cloud-Precipitation Microphysical Properties over East Asia[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Zhejiang University.
- Yussouf N, Stensrud D J. 2012. Comparison of Single-Parameter and Multiparameter Ensembles for Assimilation of Radar Observations Using the Ensemble Kalman Filter[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140(2): 562-586.
- Zhang F Q, Snyder C, Rotunno R. 2003. Effects of moist convection on mesoscale predictability[J]. *J. Atmos. Sci.*, 60(9): 1173-1185.
- 周志敏, 崔春光, 胡扬, 等. 2021. 一次梅雨锋暴雨过程数值模拟的云微物理参数化敏感性研究[J]. *大气科学*, 45(6): 1292-1312. Zhou Zhimin, Cui Chunguang, Hu Yang, et al. 2021. Sensitivity of Microphysical Parameterization on the Numerical Simulation of a Meiyu Front Heavy Rainfall Process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(6): 1292-1312.
- 朱格利, 林万涛, 曹艳华. 2014. 用 WRF 模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析[J]. *大气科学*, 38(3): 513-523. Zhu Geli, Lin Wantao, Cao Yanhua. 2014. Numerical Simulation of a Rainstorm Event over South China by Using Various Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model and Its Performance Analysis[J]. *Atmospheric Science (in Chinese)*, 38(3): 513-523.