

# 基于 2118 台风“圆规”探讨模式扰动方案对台风区域集合预报的影响

邵端舟<sup>1,2</sup>, 张宇<sup>1,2\*</sup>, 徐建军<sup>1,3\*</sup>, 陈思奇<sup>1,4</sup>, 李家菁<sup>2</sup>, 胡嘉政<sup>2</sup>

1. 中国气象局-广东海洋大学南海海洋气象联合实验室, 湛江 524088

2. 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088

3. 广东海洋大学深圳研究院, 深圳 518000

4. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210000

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 2019YFC1510002, 国家自然科学基金项目 42130605、41705140, 广东省基础与应用基础研究基金项目 2019B1515120018, 深圳科技计划项目 JCYJ20210324131810029

**摘要:** 为了探讨不同模式扰动方案对台风区域集合预报的影响, 本文以 2021 年 18 号台风“圆规”为例, 基于 WRF 模式, 采用了多物理过程参数化方法 (MP)、随机变化参数扰动方法 (SPP) 和物理倾向随机扰动 (SPPT) 三种不同的方法, 设计了 EXP1 (MP)、EXP2 (SPP+SPPT) 和 EXP3 (MP+SPP+SPPT) 三组敏感性试验进行了比较研究。结果表明: 三组区域集合预报试验都能较好地模拟台风路径和台风增强的过程, 其中 EXP3 试验效果最好, EXP3 试验的路径偏差值为三组集合预报试验最小的, 其平均值为 52.8km, 而控制试验 CTRL (无模式扰动)、EXP1 和 EXP2 的平均值分别为 61.8、54.4 和 65.7km; 三组集合预报试验的扰动能量值基本都大于控制试验 CTRL, 且 EXP3 的扰动能量发展最快, 扰动能量值基本为最大的; 三组集合预报试验的 Brier 评分相较于控制试验 CTRL 有所改善, 且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验改善最大的, EXP1 和 EXP2 相对于 CTRL 试验的改善率为 45%和 48.76%, 而 EXP3 能达到 70%, EXP2 与 EXP1 的预报效果相当, EXP3 相较于 EXP1 和 EXP2 预报效果有所改善, 其相对于 EXP1 和 EXP2 的改善率达到 57.5%和 40%。

**关键词:** 区域集合预报, 台风, 多物理参数化组合方案 (MP), 随机参数扰动法 (SPP), 模式物理参数化倾向随机扰动法 (SPPT)

29 Comparison between Multi-Physics and Stochastic Approaches  
30 for the Typhoon Kompasu(2021)

31 Duanzhou Shao<sup>1,2</sup>, Yu Zhang<sup>1,2\*</sup>, Jianjun Xu<sup>1,3\*</sup>, Siqi Chen<sup>1,4</sup>, Jiajing Li<sup>2</sup>,  
32 Jiazheng Hu<sup>2</sup>  
33

34 1. CMA-GDOU Joint Laboratory for Marine Meteorology & South China Sea, Institute of Marine  
35 Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088,

36 2. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088,

37 3. Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518000,

38 4. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing  
39 210000,

40 **Funds:** National Key R & D Program of China (2019YFC1510002), the National Natural Science  
41 Foundation of China (42130605 and 41705140), Guangdong Basic and Applied Basic Science  
42 Research Foundation (2019B1515120018), and Shenzhen Science and Technology Program  
43 (JCYJ20210324131810029)

44 **Abstract:** In this study, three model perturbation schemes, the stochastically perturbed parameter  
45 scheme (SPP), stochastically perturbed physics tendencies (SPPT), and multi-physics process  
46 parameterization (MP), were used to represent the model errors in the regional ensemble prediction  
47 systems (REPS). To study the effects of different model perturbation schemes on Typhoon  
48 forecasting, three sensitive experiments using three different combinations (EXP1: MP, EXP2:  
49 SPPT + SPP, and EXP3: MP + SPPT + SPP) of the model perturbation schemes were set up based  
50 on the Weather Research and Forecasting (WRF)-V4.2 model for the Typhoon Kompasu (2021). The  
51 results show that for typhoon forecasting, ensemble forecasting experiments could simulate the  
52 process of typhoon intensification and the path of typhoon, and the simulation result of EXP3 was  
53 the best. The path bias of EXP3 was the smallest of the three ensemble forecast experiments with  
54 an average value of 52.8 km, while the values of CTRL, EXP1 and EXP2 were 61.8, 54.4 and 65.7  
55 km, respectively. For the perturbation energy, the perturbation energy of the three sets of ensemble  
56 prediction experiments were larger than the CTRL. The perturbation energy of EXP3 developed the  
57 fastest, and the perturbation energy was the largest. The Brier scores of the three sets of experiments  
58 improved the forecast results compared to the CTRL, and the Brier score values of EXP3 were the  
59 most improved of the three sets of experiments, with EXP1 and EXP2 showing improvements of  
60 45% and 48.76% relative to the CTRL, while EXP3 was able to reach 70%. The forecasts of EXP2  
61 and EXP1 were comparable, and EXP3 had improved the forecasts compared to EXP1 and EXP2,

62 and its improvement rate reached 57.5% and 40% relative to EXP1 and EXP2.

63 **Keywords:** Regional ensemble forecasting, Typhoon, multi-physics process parameterization  
64 method (MP), stochastically perturbed parameter scheme (SPP), Stochastically perturbed physics  
65 tendencies (SPPT)

## 66 1.引言

67 中尺度数值天气预报的核心问题是如何准确地预报出大气运动的真实状态(Berner et al.,  
68 2011)。随着中尺度模式的发展,对中尺度天气的预报有一定的提高,但初值的不确定性或  
69 模式中的微小不确定性会随着时间的推移发展为模式预报误差,因而中尺度天气预报的可预  
70 报性是有限的(Lorenz, 1969)。为了提高模式对中尺度天气的预报技巧,早在1965年,集合  
71 预报(Ensemble Prediction, EP)思想被Edward, N. Lorenz提出(Edward, 1965)。集合预报提供  
72 最有可能的天气演变状态,产生大气演变的概率预报,是解决数值天气预报不确定性的重要  
73 方法,也是数值预报领域的重要发展方向(谭燕, 2006)。

74 为了表示模式的初值的不确定性,最常见的方法是通过在模式的初始误差增长的方向上  
75 进行扰动,例如:奇异向量法(Molteni et al, 1993)或增长模繁殖法(Toth et al, 1993)。但是,  
76 即使运用上述的初值扰动方法,集合预报的离散度依然不足,低估了大气演变的不确定性,  
77 产生不可靠或者过度自信的集合预报(Buizza et al, 2005),且采用初值扰动方法构建的集合预  
78 报系统不能表现出由于模式误差或模式本身缺陷而造成的预报误差。

79 实际上,数值预报系统对模式误差也很敏感,尤其是次网格尺度物理过程参数化所造成  
80 的不确定性对系统的可预报性起着至关重要的作用(Palmer et al., 2001; 陈静等, 2003; 徐致  
81 真等, 2019b)。由于模式的不确定性主要来源于次网格尺度上物理过程的参数化过程和数值  
82 模式的截断误差,而这些误差和不确定性从本质上可能是随机的。为了表示这种对预报误差  
83 的随机贡献,集合预报系统现在通常使用模式随机物理扰动方法。模式随机物理扰动方法的  
84 原理是在模式物理参数化方案中引入随机扰动项来体现大气运动方程物理过程参数化方案  
85 中所存在的不确定性。如:在模式的某些参数值或相关项如倾向项、扩散项上引入一个随机  
86 过程或因子对其进行改变,以体现上述随机不确定性的作用。

87 目前表征模式随机物理扰动方法主要有三种(Jankov et al., 2017; 徐致真, 2019b): 1)随机  
88 动能后向散射补偿法(Stochastic kinetic-energy backscatter scheme, SKEB),代表小尺度能量  
89 导致的预报不确定性; 2)模式物理参数化倾向随机扰动法(Stochastically perturbed physics

90 tendencies , SPPT), 代表次网格物理过程参数化方案积分倾向项的不确定性; 3)随机参数扰  
91 动法(Stochastically perturbed parameter scheme, SPP), 代表模式次网格参数化方案中关键参数  
92 的预报不确定性。试验表明(Berner et al., 2009, 2011; Leutbecher et al., 2017), 模式随机物  
93 理扰动方法可以提高中尺度天气预报的概率预报技巧。

94 模式物理参数化倾向随机扰动法(SPPT)是基于参数化物理趋势中存在不确定性的假设,  
95 并且这种不确定性与累计物理趋势成正比(Buizza et al., 1999; Palmer et al., 2009)。因此, SPPT  
96 对每个时间步长的温度、湿度和风分量的累计物理趋势进行随机扰动。原始 SPPT 随机物理  
97 方法最初由 Buizza(1999)引入到 ECMWF IFS (The ECMWF Integrated Forecasting System)系  
98 统, 该方法假定参数化物理过程倾向主要误差与累计物理倾向成正比, 结果表明该方法增加  
99 了系统离散度, 改善了降水等要素概率预报技巧。Romine(2014)为提高集合预报的可靠性,  
100 运用模式物理参数化倾向随机扰动法(SPPT)表示模式误差, 进行集合预报试验: 相较于控制  
101 预报, SPPT 方法增加了集合预报的概率预报技巧。

102 大多数物理过程发生空间尺度太小, 如对流、边界层交换过程, 无法直接求解, 需参数  
103 化。这涉及大量经验、可调整的参数和阈值, 而给定这些参数及阈值通常带有主观性, 而随  
104 机参数扰动法(SPP)是对物理过程参数化方案中的不确定性关键参数或者变量进行随机扰动,  
105 从而提供了一种在特定参数化方案中表示不确定性的方法(Bowler et al., 2008; Hacker et al.,  
106 2011)。随机参数扰动法(SPP)用于扰动选定物理包中的参数, 如 GF 对流方案、MYNN 边界  
107 层方案和 RUC LSM 陆面参数化方案等, 且随机扰动参数方案能够把模式由于物理过程参数  
108 化方案所带来的模式不确定性直接表征出来。英国气象局最早在全球集合预报系统中开发了一个  
109 具有随机扰动参数的 RP (Random Parameters) 方法, 随后应用于对流尺度集合预报系  
110 统(Bowler, et al, 2008); ECMWF(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)也  
111 在随机扰动参数化方案框架下进行随机参数扰动法(SPP)的研究与应用(Ollinaho et al., 2016)。  
112 徐致真(2019a)基于 GRAPES 中尺度区域集合预报模式, 选取与降水预报不确定性密切相关的  
113 的积云对流、云微物理、边界层及近地面层参数化方案中的关键参数, 进行 2015 年 6-7 月  
114 总计 10d 的随机扰动集合预报试验, 结果表明, 随机参数扰动法(SPP)不仅能够有效提高集  
115 合概率预报效果, 还能够提高集合降水概率预报技巧。

116 在模式随机物理扰动方法的基础上, 前人大量开展不同随机物理扰动方法的比较试验:  
117 Berner (2015)用多种表示模式误差的方法, 评估运用混合模式扰动方法的中尺度集合预报的  
118 概率预报, 指出包含模式误差的集合预报方案, 显著改善了中尺度集合系统进行集合预报的

119 概率预报技巧。蔡沅辰(2017)使用 WRF 模式,分别基于 SPPT、SKEB 方法构造 3km 水平分  
120 辨率的风暴尺度集合预报系统,并在此基础上将两种方法结合构造混合模式的扰动方法,探  
121 讨了 SPPT+SKEB 组合对降水的影响;张涵斌(2019)发展了一种多物理过程组合(multi-physics,  
122 MPHY)与 SKEB 相结合的混合模式扰动方法(SKEB-MPHY),并进行敏感性试验。结果表  
123 明:对于高空动力场预报离散度的增长,SKEB 方法比 MPHY 方法占优,而低层温度预报  
124 离散度增长,MPHY 比 SKEB 扰动方法占优,混合模式扰动方法的扰动增长能力在三种方  
125 法中表现最好。Zhang(2022)针对地表和模式随机物理扰动方法开发了 f 扩张的 SPPT 方案以  
126 及在 SPPT 的基础上叠加了 SPP 方案,并评估了 2014-2016 年期间在中国登陆的 19 个热带气  
127 旋,试验表明三种新的试验方案对非增强型的热带气旋预报改善比增强型的更明显。

128 本文选取 2021 年 18 号台风“圆规”个例,基于 WRF 中尺度区域模式,采用多物理参  
129 数化组合方案、随机参数扰动法(SPP)和模式物理参数化倾向随机扰动法(SPPT),设计数值模  
130 拟敏感性试验,以期探讨多物理过程参数化方案组合和不同随机物理扰动方案对台风区域集  
131 合预报的影响。本文包括 5 部分内容:第 1 部分是模式随机物理扰动方法在集合预报中应用  
132 的主要研究进展;第 2 部分介绍了本文的数据与检验方法;第 3 部分是模式设置和试验方  
133 案;第 4 部分是集合预报试验结果分析;第 5 部分是对集合预报试验结果的总结与讨论。

## 134 2. 数据与检验方法

### 135 2.1 数据

136 本文的区域集合预报试验使用美国国家环境预报中心(The National Centers for  
137 Environmental Prediction, NCEP)的全球集合预报 GEFS(The Global Ensemble Forecast System)  
138 作为初始值和侧边界条件。选取的全球集合预报 GEFS 包含 20 个集合成员,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,  
139 全球集合预报的起报时间为 2021 年 10 月 12 日 00 时(UTC),预报时效为 72 小时。

140 本文使用 ERA5(The 5th generation of ECMWF global climate reanalysis)数据进行地面和高  
141 空变量的检验,用作检验的 ERA5 数据时间分辨率为 1 小时,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。  
142 集合预报台风的检验资料来自中央气象台-台风网,包含台风“圆规”在整个模拟时间段的  
143 最大风速、最低气压和台风各个时刻所在位置的经纬度信息。

144

145

146 2.2 检验方法

147 2.2.1 离散度与均方根误差

148 离散度 (spread) 为集合成员与集合平均的标准偏差, 在一定范围内离散度越大越能包  
149 含真实大气的各种可能性。一般来说, 离散度太小, 容易出现系统性偏高或者偏低; 离散度  
150 太大, 会导致预报误差偏大, 预报可信度较低。均方根误差 (Root mean square error, RMSE)  
151 检验预报场与观测场之间的差异, 值越大则预报误差越大。对一个理想可信度高的集合预报  
152 系统, RMSE 与离散度应该有相同的幅度与变化率。即: 一个集合预报系统的可靠性可以用  
153 集合离散度在整个预报时段内与集合平均预报误差是否相等或者相近来衡(张凯锋等, 2020)。

154 离散度公式:

155 
$$S_{i,t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_{i,t}^n - \bar{f}_{i,y})^2} \quad (1)$$

156 式中  $f_{i,t}^n$  为第  $i$  个站点、第  $t$  个时间点和第  $n$  个集合成员预报、 $\bar{f}_{i,y}$  为集合平均预报,  $N$  为  
157 集合成员数。

158 预报误差公式:

159 
$$E_{i,t} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\bar{f}_{i,t} - obs_{i,t})^2} \quad (2)$$

160 式中  $obs_{i,t}$  第  $i$  个站点、第  $t$  个时次的实况,  $M$  为站点数。

161 2.2.2 扰动能量

162 本文将运用湿空气扰动总能量 (Moisture Turbulent Energy, MTE) 来对三组集合预报试验  
163 的扰动特征进行描述, 定义某个格点的扰动总能量为:

164 
$$MTE = \frac{1}{2} [u'^2(i, j, k) + v'^2(i, j, k)] + \frac{C_p}{T_r} T'^2(i, j, k) + \epsilon \frac{L^2}{C_p T_r} q'^2 \quad (3)$$

165 其中,  $u'$ 、 $v'$ 、 $T'$  和  $q'$  分别表示水平风场、温度和湿度的扰动, 扰动值定义为集合成员  
166 预报和集合平均之差,  $T_r$  为参考温度 (取值为 270K),  $C_p$  为干空气定压比热 (取值为  
167 1005.7K/kg), 参数的标准值  $\epsilon$  取为 1,  $L$  为单位质量气体凝结潜热 (取值为  $2.5104 \times 10^6$  J/kg),

168 i、j 分别代表水平东西向和南北向的格点数，k 为垂直层数。(Palmer et al., 1998; Ehrendorfer  
169 et al., 1999)

### 170 2.2.3 Brier 评分

171 Brier 评分 (Brier Score) 是集合预报中常用的评分方法，是由 Brier(Brier et al., 1950)定  
172 义的一种均方概率误差，其能够描述集合概率与真实观测概率的偏差程度。Brier 分数的值  
173 始终介于 0.0 和 1.0 之间，其中分数为 1.0 表明集合预报系统的准确性最差，具有完美预  
174 报技巧的 Brier 评分值为 0.0，并且 Brier 评分值越小，说明集合预报系统的准确性越高。计  
175 算公式如下：

$$176 \text{BRIER SCORE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2 \quad (4)$$

177 其中 N 为站点数， $P_n$  是第 n 个站点的 6h 累计降水的集合预报概率； $O_n$  是第 n 个站点的  
178 观测频率，如果观测大于设定的阈值，则  $O_n$  的值为 1，反之则为 0。

## 179 3. 模式设置和试验方案

### 180 3.1 模式设置

181 本文区域集合预报试验采用 WRF 模式版本号为 4.2，区域设置为分辨率为  $9\text{km} \times 9\text{km}$ ，  
182 垂直层数为 50 层模式面，模式层顶为 50hPa；模式模拟区域范围  $8^{\circ}97' - 30^{\circ}07' \text{N}$ 、 $99^{\circ}64' -$   
183  $130^{\circ}55' \text{E}$  (图 1)，覆盖华南、南海大部分区域，共有  $361 \times 264$  个格点。该集合预报包括 20  
184 个扰动成员预报，采用的背景侧边界条件为 NCEP 全球集合预报资料 (Global Ensemble  
185 Forecast System, GEFS)，分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。本文试验时段为 2021 年 10 月 12-15 日连续三  
186 天，从 10 月 12 日 00UTC 开始起报，模式预报时效 72h。

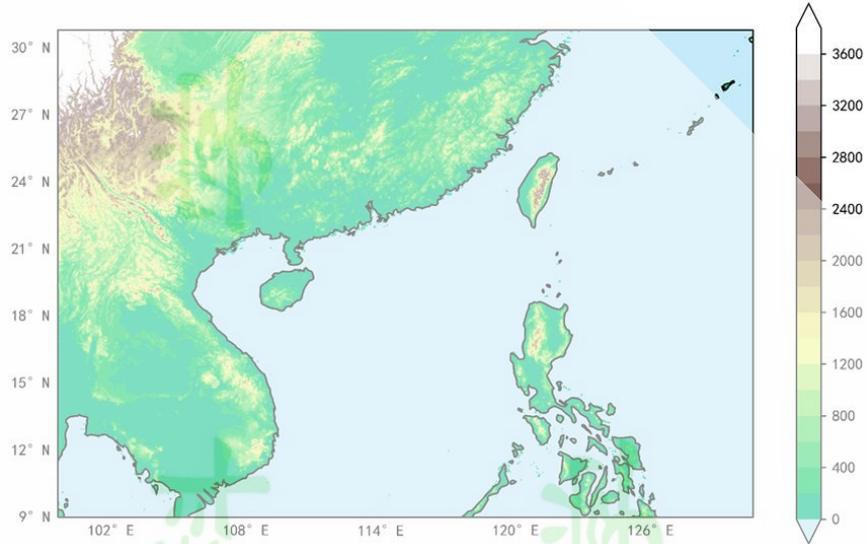


图 1 集合预报试验模拟区域范围 填色为海拔高度

Fig. 1 Range of the simulated area of the ensemble forecast experiment showing altitude in-formation.

### 3.2 试验方案

敏感性试验设计如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental setup

试验	模式扰动方法	参考
CTRL	无	Hacker et al., 2011a
EXP1	MP	Hacker et al., 2011b
EXP2	SPP + SPPT	Jankov et al., 2017
EXP3	MP + SPP + SPPT	Zhang 2022

多物理参数化方案 (EXP1: 仅 MP): 每个集合成员都使用了不同的物理参数化方案的组合。本文中使用了五种微物理参数化方案: WRF single-moment 6-class 方案、Thompson 方案、the Morrison double-moment 方案、Eta 方案和 P3 方案(Hong et al., 2006; Thompson et al., 2008; Morrison et al., 2009, 2015); 表面层参数化方案使用了 The revised MM5 方案、Eta similarity 方案和 MYNN 方案(Jimenez et al., 2012; Janjic et al., 1996); 长波辐射参数化方案: RRTM Longwave 方案、CAM Longwave 方案和 RRTMG Longwave 方案(Mlawer et al., 1997; Collins et al., 2004; Iacono et al., 2008); 三种短波辐射参数化方案: Dudhia Shortwave 方案、CAM Shortwave 方案和 RRTMG Shortwave 方案(Dudhia et al., 1989; Collins et al., 2004; Iacono et al., 2008)。集合成员参数化方案配置如表 2 所示:

203

表 2 集成员参数化方案配置

204

Table 2 Parameterization scheme configuration of the multiphysical process combination.

集成员	微物理	长波辐射	短波辐射	表面层
01	<b>WSM6</b>	RRTM	Dudhia	<b>RMM5</b>
02	Thompson	CAM	CAM	Eta
03	Morrison	<b>RRTMG</b>	<b>RRTMG</b>	<b>MYNN</b>
04	Eta	RRTM	Dudhia	RMM5
05	P3	CAM	CAM	Eta
06	WSM6	RRTMG	RRTMG	MYNN
07	Thompson	RRTM	Dudhia	RMM5
08	Morrison	CAM	CAM	Eta
09	Eta	RRTMG	RRTMG	MYNN
10	P3	RRTM	Dudhia	RMM5
11	WSM6	CAM	CAM	Eta
12	Thompson	RRTMG	RRTMG	MYNN
13	Morrison	RRTM	Dudhia	RMM5
14	Eta	CAM	CAM	Eta
15	P3	RRTMG	RRTMG	MYNN
16	WSM6	CAM	CAM	MYNN
17	Thompson	RRTM	Dudhia	Eta
18	Morrison	RRTMG	RRTMG	RMM5
19	Eta	CAM	CAM	MYNN
20	P3	RRTM	Dudhia	Eta

205

SPP 和 SPPT 方法的组合 (EXP2: SPP+SPPT): 采用单一物理参数化方案 (表 2 参数化

206

方案配置中的加粗部分) 加上随机参数扰动法(SPP)和模式物理参数化倾向随机扰动法

207

(SPPT), 进行集合预报试验 (表 3 SPP+SPPT 试验方案的扰动参数, 下同);

208

表 3 SPP+SPPT 试验方案的扰动参数

209

Table 3 Summary of namelist parameter settings for model stochastic physical perturbation methods

210

Perturbed parameter in SPPT&SPP	Name
lengthscale_sppt	1500 000m
timescale_sppt	216 000s
gridpt_stddev_sppt	0.5
stddev_cutoff_sppt	2.0
spp_conv	1
lengthscale_spp_conv	150 000m
timescale_spp_conv	21600s
gridpt_stddev_spp_conv	0.3
stddev_cutoff_spp_conv	3.0
spp_pbl	1

lengthscale_spp_pbl	700 000m
timescale_spp_pbl	21600s
gridpt_stddev_spp_pbl	0.15
stddev_cutoff_spp_pbl	2.0
spp_lsm	1
lengthscale_spp_lsm	50 000m
timescale_spp_lsm	86400s
gridpt_stddev_spp_lsm	0.3
stddev_cutoff_spp_lsm	3.0

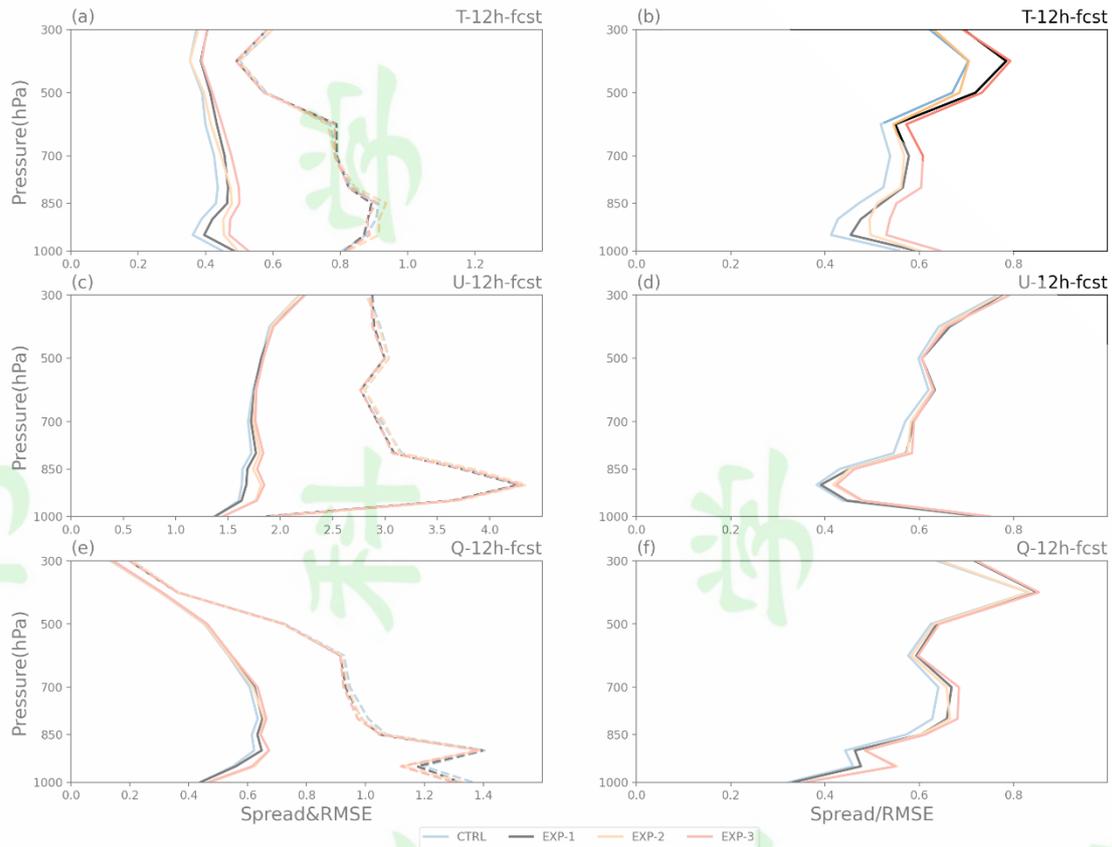
211 MP、SPP 和 SPPT 方法的组合 (EXP3: MP+SPP+SPPT): 采用不同物理参数化方案组合  
 212 的方式, 得到不同集合成员的物理参数化方案 (表 2 集合成员参数化方案配置), 加上随机  
 213 参数扰动方法 (SPP) 和物理倾向随机扰动 (SPPT), 进行集合预报试验;

#### 214 4. 集合预报结果检验

##### 215 4.1 离散度与均方根误差

216 图 2 是预报时刻 12h 的各变量离散度和均方根误差随气压层的变化。对于温度、水平纬  
 217 向风和湿度 T、U、Q, 三组集合预报试验 (EXP1、EXP2 和 EXP3) 在预报时刻 12h 的离散度  
 218 (spread) 较控制试验 CTRL 有所增大; 在 900hPa 附近, 三组集合预报试验明显大于 CTRL,  
 219 且 EXP3 的离散度是最大的, 其值分别为 0.47、1.84 和 0.67, 而 CTRL 的值为 0.38、1.63 和  
 220 0.62; 对于温度和湿度, EXP3 的均方根误差 (RMSE) 明显小于其他几组试验; 对于水平纬  
 221 向风, 三组集合预报试验和控制试验的均方根误差相差不大; 这表明模式随机物理扰动方法  
 222 和多物理参数化组合方案预报都能增加集合离散度。

223 集合预报系统的可靠性可以用集合离散度在整个预报时段内与集合平均预报误差是否  
 224 相等或者相近来衡。对于温度和湿度, EXP3 的 spread/rmse 较 EXP1 和 EXP2 更接近于 1, 在  
 225 500hPa 附近的 T, EXP3 的 spread/rmse 为 0.733, 而 CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为 0.67、  
 226 0.719 和 0.685; 对于水平纬向风, 三组集合预报试验的 spread/rmse 相比于控制试验更大,  
 227 但三组集合预报试验和控制试验的 spread/rmse 相差不大; 综上所述, 模式随机物理扰动方  
 228 法和多物理参数化组合方案预报对某些变量变量预报效果相当, 如水平纬向风。模式随机物  
 229 理扰动方法加上多物理参数化组合方案 (EXP3) 总体的预报效果相对多物理参数化组合方案  
 230 (EXP1) 和模式随机物理扰动方法 (EXP2) 好, 这也表明当前集合预报系统中的模式误差仍  
 231 然过于复杂, 无法单独用单个方案表示。



232

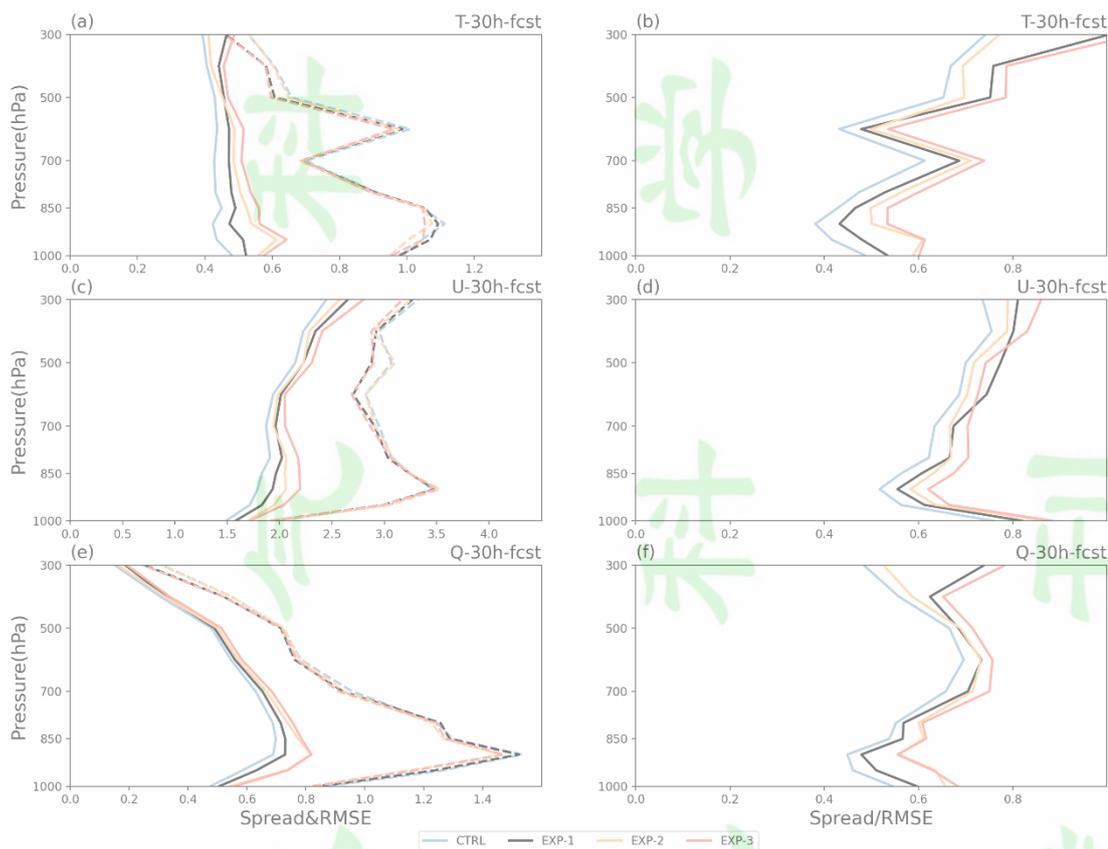
233 图 2 预报时刻 12h 的各变量离散度和均方根误差；左侧（图 a、c、e）：温度、水平纬向风和湿度的  
 234 离散度、均方根误差随气压层的变化（实线为离散度，虚线为均方根误差）；右侧（图 b、d、f）：温度、  
 235 水平纬向风和湿度的离散度与均方根误差的比值随气压层的变化

236 Fig. 2 Spread and root-mean-square error (RMSE) of each variable at the forecast moment 12h; left side (Fig.  
 237 a, c, e): variation of spread and RMSE of temperature, horizontal latitudinal wind and humidity with pressure  
 238 layer (solid line is spread, dashed line is RMSE); right side (Fig. b, d, f): variation of spread and RMSE of  
 239 temperature, horizontal latitudinal wind and humidity with pressure layer

240 图 3 是预报时刻 30h 的各变量离散度和均方根误差随气压层的变化。对于温度、水平纬  
 241 向风和湿度，三组集合预报试验（EXP1、EXP2 和 EXP3）在预报时刻 30h 的离散度（spread）  
 242 明显大于控制试验 CTRL，尤其是 900hPa 附近，且 EXP3 的离散度最大，其值为 0.56、2.19  
 243 和 0.81，而 CTRL 的值仅为 0.42、1.78 和 0.68；对于温度、水平纬向风和湿度，EXP3 的均方  
 244 根误差（RMSE）小于其他几组试验，但三组集合预报试验和控制试验的 RMSE 相差不大。

245 对于温度和湿度，EXP3 的 spread/rmse 较 EXP1 和 EXP2 更接近于 1，在 500hPa 的值分  
 246 别为 0.78 和 0.71；对于 U，三组集合预报试验的 spread/rmse 相比于控制试验更大，但三组

247 集合预报试验和控制试验的 spread/rmse 相差不大;总的来说,多物理参数化组合方案(EXP1)  
 248 和模式随机物理扰动方法(EXP2)预报效果相当,且在地表附近,模式随机物理扰动方法优  
 249 于多物理参数化组合方案的预报效果。模式随机物理扰动方法中的随机参数扰动法(SPP)  
 250 用于扰动特定物理包(如GF对流方案、MYNN边界层方案和RUC LSM陆面参数化方案等)  
 251 中的参数,陆面过程扰动相对高空而言,扰动更加深厚,对地面预报改进比对高空的预报改  
 252 进更多。



253

254

图3 同图2,但预报时刻为30h

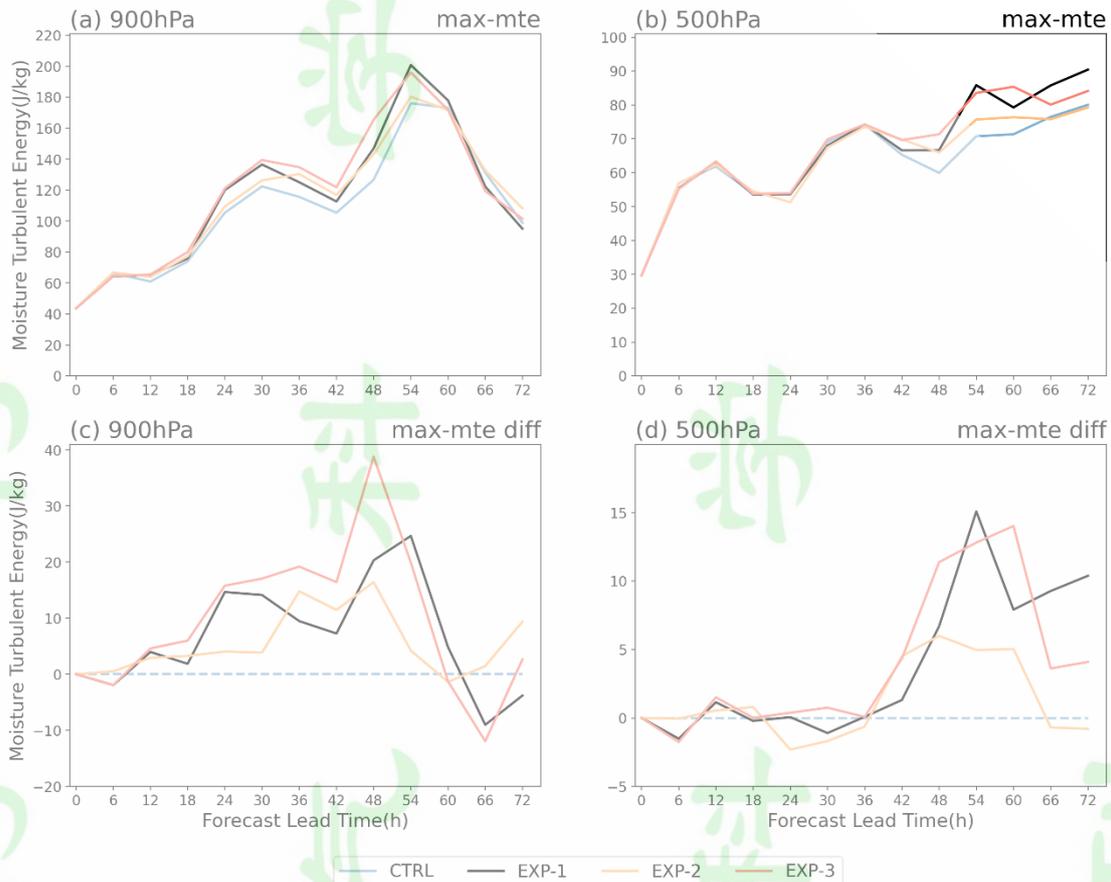
255

Fig. 3 As in Fig. 2, but the forecast time is 30h

#### 256 4.2 扰动能量

257 图4是900hPa和500hPa的湿扰动能量(最大值)随时间的变化。总的来说,三组集合  
 258 预报试验的湿扰动能量都大于控制试验CTRL,并且EXP3的湿扰动能量值为三组集合预报试  
 259 验发展最快的,其30h在900hPa和500hPa附近的值分别为139.47和69.85,而CTRL的值  
 260 仅为122.42和69.10;从三组集合预报试验与控制试验CTRL的湿扰动能量差值来看:在  
 261 900hPa,前60h三组集合预报试验的湿扰动能量差值都大于控制试验CTRL,且EXP3的湿扰

262 动能差值明显大于 EXP1 和 EXP2 的。

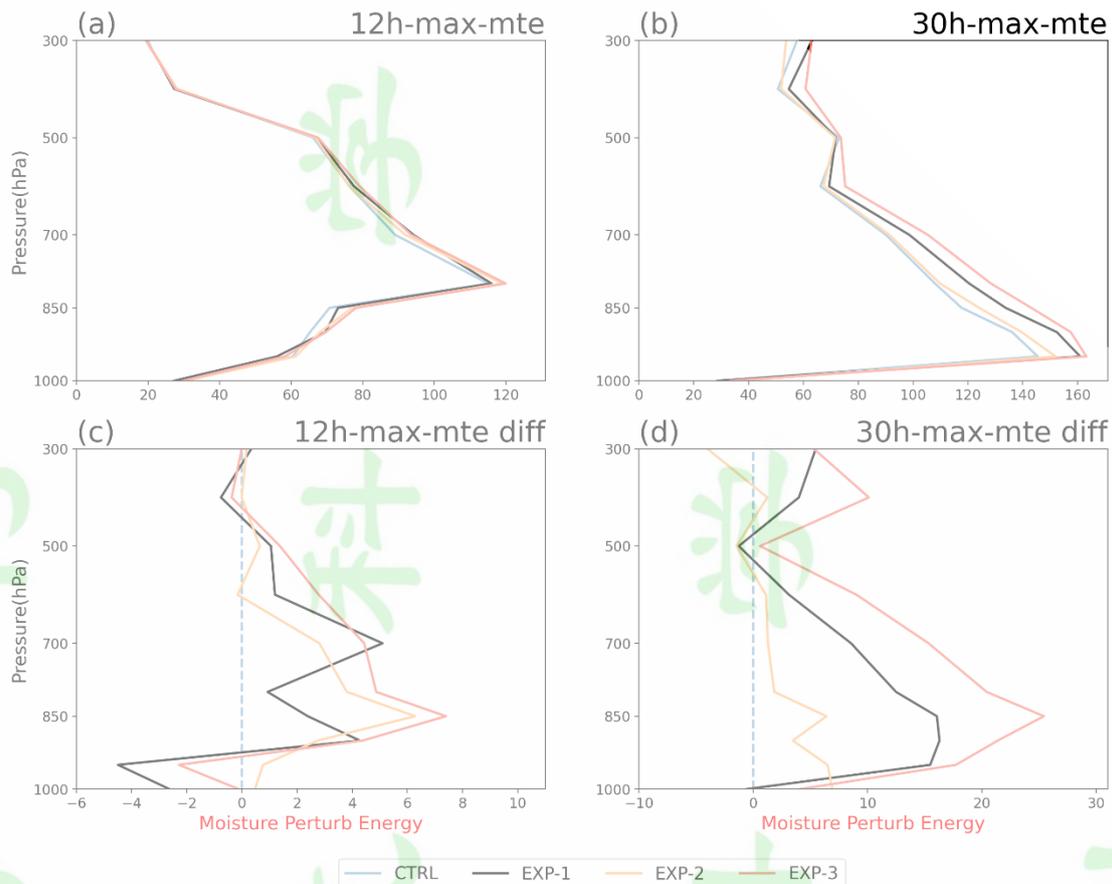


263

264 图 4 900hPa 和 500hPa 的湿扰动能量（最大值）随时间的变化（a、b），三组集合预报试验（EXP1、  
265 EXP2 和 EXP3）与控制试验 CTRL 的差值随时间的变化（c、d）

266 Fig. 4 Variation of moisture turbulent energy (maximum) at 900hPa and 500hPa with time (a, b), and  
267 variation of the difference between three sets of ensemble forecast experiments (EXP1, EXP2 and EXP3) and  
268 control experiment with time (c, d)

269 图 5 是预报时刻 12h、30h 的最大湿扰动能量随气压层的变化。总的来说，三组集合预  
270 报试验的湿扰动能量都大于控制试验 CTRL，并且 EXP3 的湿扰动能量值为三组集合预报试验  
271 最大的，其 12h、30h 在 900hPa 附近的值分别为 69.66 和 157.53，而 CTRL 的值仅为 65.27 和  
272 136.14；从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的湿扰动能量差值来看，三组集合预报试验  
273 的湿扰动能量差值基本都大于控制试验 CTRL，EXP3 的湿扰动能量差值明显大于 EXP1 和 EXP2  
274 的，并且在地表附近相差最大；其 12h 和 30h 在 950hPa 附近的差值分别为 4.38 和 21.38，  
275 而 EXP1 和 EXP2 的值为 4.27、16.28 和 2.75 和 3.54。



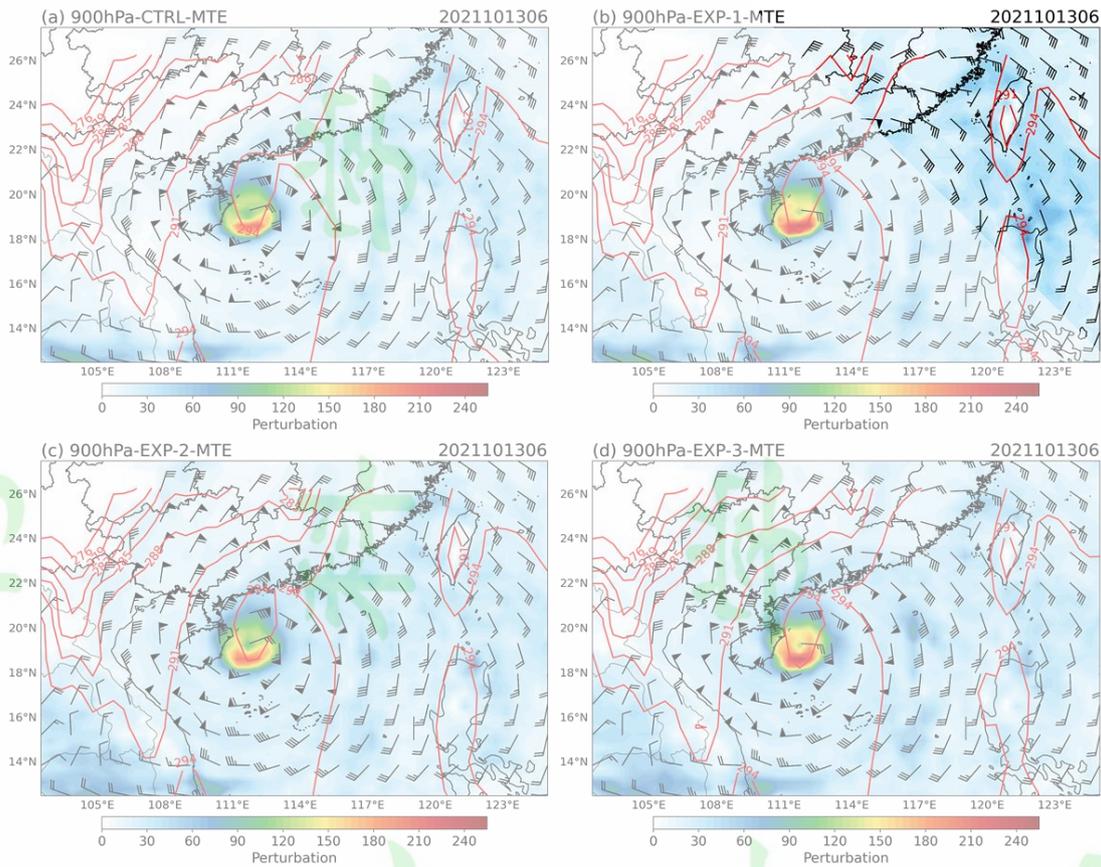
276

277 图 5 预报时刻 12h 和 30h 的湿扰动能量（最大值）随气压层的变化（a、b），三组集合预报试验  
 278 （EXP1、EXP2 和 EXP3）与控制试验 CTRL 的差值随气压层的变化(c、d)

279 Fig. 5 Variation of moisture turbulent energy (maximum) with pressure layer for 12h and 30h of forecast  
 280 time (a, b), and variation of difference between three sets of ensemble forecast experiments (EXP1, EXP2 and  
 281 EXP3) and control experiment with pressure layer(c, d)

282 图 6 是预报时刻 30h 的三组集合预报试验（EXP1、EXP2 和 EXP3）与控制试验 CTRL 在  
 283 900hPa 的湿扰动能量空间分布图。如图所示，台风圆规的风速大值区位于海南东部、粤西  
 284 南部的南海海面上，并且该区域存在温度的大值中心，三组集合预报试验的湿扰动能量大值  
 285 区均与该区域相联系。EXP3 的湿扰动能量明显高于控制试验 CTRL、EXP1 和 EXP2，其最大  
 286 值为 250.02J/kg，明显高于 CTRL 的 216.14 J/kg；CTRL、EXP1 和 EXP2 的扰动能量发展相差不  
 287 大，但 EXP1 的湿扰动能量值略大于 CTRL 和 EXP2。

288



289

290 图 6 预报时刻 30h 的三组集合预报试验 (EXP1、EXP2 和 EXP3) 与控制试验 CTRL 在 900hPa 的湿扰动  
 291 能量空间分布图, 红色等值线为温度, 风羽表示 uv 风, 填色为湿扰动能量的值

292

Fig. 6 The distribution of moisture turbulent energy at 900hPa for three sets of ensemble forecast

293

experiments (EXP1, EXP2 and EXP3) with control experiment at forecast time 30h, red contours are temperature,

294

wind plume indicates uv wind, filled color is the value of the moisture turbulent energy

295

图 7 是预报时刻 30h 的三组集合预报试验 (EXP1、EXP2 和 EXP3) 与控制试验 CTRL 在

296

500hPa 的湿扰动能量空间分布图。三组集合预报试验的湿扰动能量都大于控制试验 CTRL,

297

EXP3 的湿扰动能量最大值为 81.22 J/kg, 而 CTRL、EXP1 和 EXP2 的值为 56.31 J/kg、58.24 J/kg

298

和 70.01 J/kg; 从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的湿扰动能量差值来看, 三组集合预报

299

试验的湿扰动能量差值基本都大于控制试验 CTRL, EXP3 的湿扰动能量差值大于 EXP1 和 EXP2,

300

其值为 24.91 J/kg, 而 EXP1 和 EXP2 的为 1.95 J/kg 和 13.7 J/kg。由此说明, 单单使用模式随

301

机物理扰动方法或者多物理参数化组合方案所激发的扰动能量太弱, 并不能完美地描述强降

302

水天气过程的能量发展状况, 而模式随机物理扰动方法加上多物理参数化组合方案 (EXP3)

303

可以很好地解决这个问题。

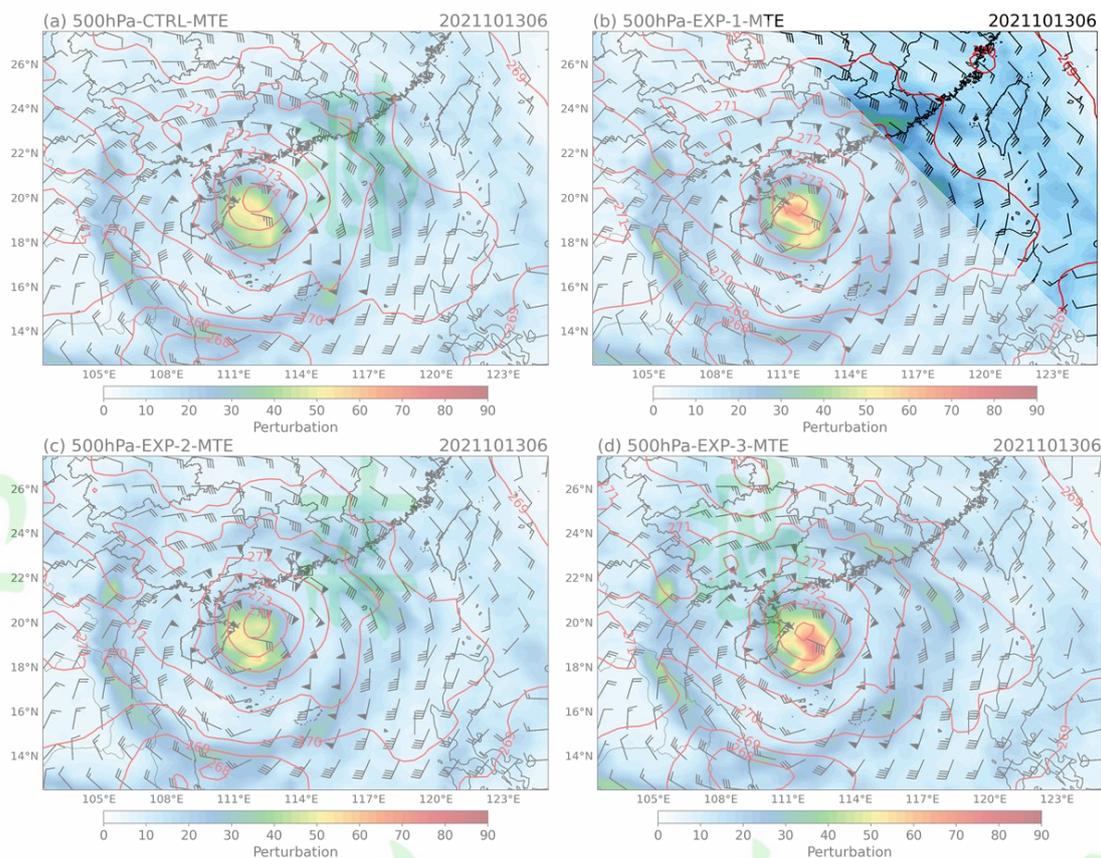


图7 同图6，但为500hPa的

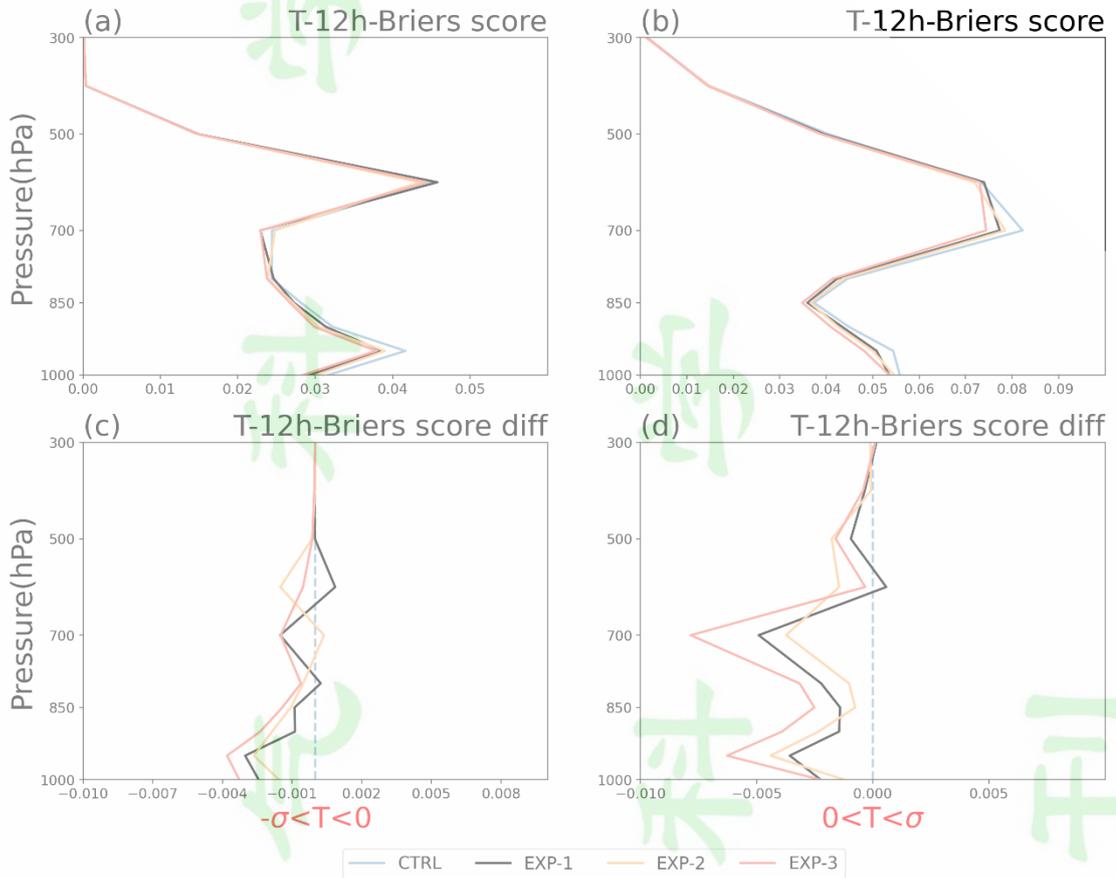
Fig. 7 As in Fig. 6, but for the 500hPa

### 4.3 Brier 评分

图8是预报时刻12h变量T的Brier评分随气压层的变化，其中a为阈值是 $-\sigma < T < 0$ 的事件，b为阈值是 $0 < T < \sigma$ 的事件， $\sigma$ 为T的气候标准偏差。当 $-\sigma < T < 0$ 时，三组集合预报试验的Brier评分基本都小于控制试验CTRL，并且EXP3的Brier评分值为三组集合预报试验最小的，其12h在950hPa附近的值分别为0.0378，CTRL、和EXP2的值分别为0.0416、0.0386和0.039；从三组集合预报试验与控制试验CTRL的Brier评分差值来看，EXP3的Brier评分差值明显大于EXP1和EXP2的，并且在地表附近相差最大，其12h在950hPa附近的值分别为0.0038；在预报时刻12h，EXP2与CTRL的变量T的Brier评分差值与EXP1相差不大。

当 $0 < T < \sigma$ 时，三组集合预报试验的Brier评分基本都小于控制试验CTRL，并且EXP3的Brier评分值为三组集合预报试验最小的，其12h在950hPa附近的值分别为0.048，而CTRL、EXP1和EXP2的值分别为0.054、0.0508和0.05；从三组集合预报试验与控制试验CTRL的Brier评分差值来看，EXP3的Brier评分差值明显大于EXP1和EXP2的，并且在地表附近相

319 差最大，其 12h 在 950hPa 附近的值为 0.0038；在预报时刻 12h，EXP2 和 EXP1 与控制试验  
 320 CTRL 的 Brier 评分差值相差不大。



321

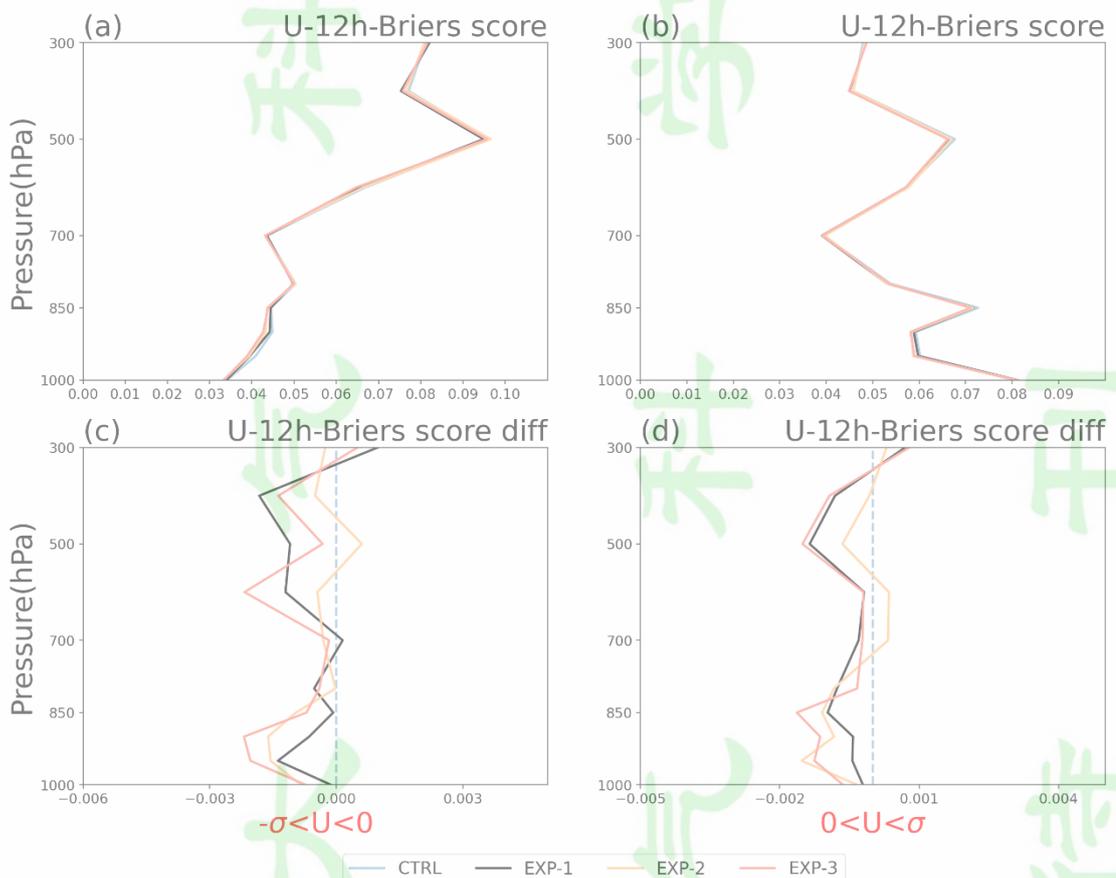
322 图 8 预报时刻 12h 变量 T 的 Brier 评分随气压层的变化 (a 为阈值是  $-\sigma < T < 0$  的事件, b 为阈值是  
 323  $0 < T < \sigma$  的事件), 三组集合预报试验 (EXP1、EXP2 和 EXP3) 与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值随气压  
 324 层的变化 (c 为阈值是  $-\sigma < T < 0$  的事件、d 为阈值是  $0 < T < \sigma$  的事件),  $\sigma$  为 T 的气候标准偏差

325 Fig. 8 Variation of Brier score of variable T with pressure layer at the forecast time 12h (the threshold of a  
 326 is  $-\sigma < T < 0$ , and b with a threshold of  $0 < T < \sigma$ ), variation of Brier score difference with pressure layer for three sets  
 327 of experiments (EXP1, EXP2 and EXP3) and control experiment (the threshold of c is  $-\sigma < T < 0$ , and d with a  
 328 threshold of  $0 < T < \sigma$ ),  $\sigma$  is the climate standard deviation of T

329 图 9 是预报时刻 12h 变量 U 的 Brier 评分随气压层的变化, 其中 a 为阈值是  $-\sigma < U < 0$  的  
 330 事件, b 为阈值是  $0 < U < \sigma$  的事件,  $\sigma$  为 U 的气候标准偏差。当  $-\sigma < U < 0$  时, 三组集合预报试验  
 331 的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL, 并且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验最小  
 332 的; 从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看, EXP3 的 Brier 评分差值明  
 333 显大于 EXP1 和 EXP2 的, 并且在地表附近相差最大, 其 12h 在 950hPa 附近的值分别为 0.0020,

334 而 EXP1 和 EXP2 的为 0.0013 和 0.0016；在预报时刻 12h，EXP2 与 CTRL 的变量 U 的 Brier 评  
 335 分差值与 EXP1 相差不大。

336 当  $0 < U < \sigma$  时，三组集合预报试验的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL，并且 EXP3 的  
 337 Brier 评分值为三组集合预报试验最小的，其 12h 在 950hPa 附近的值分别为 0.058，而 CTRL  
 338 的值分别为 0.060；从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看，EXP3 的  
 339 Brier 评分差值基本都大于 EXP1 和 EXP2 的；在预报时刻 12h，EXP2 与 CTRL 的变量 T 的 Brier  
 340 评分差值与 EXP1 相差不大，但在 800hPa 以上，EXP1 的 Brier 评分差值小于 EXP2。



341

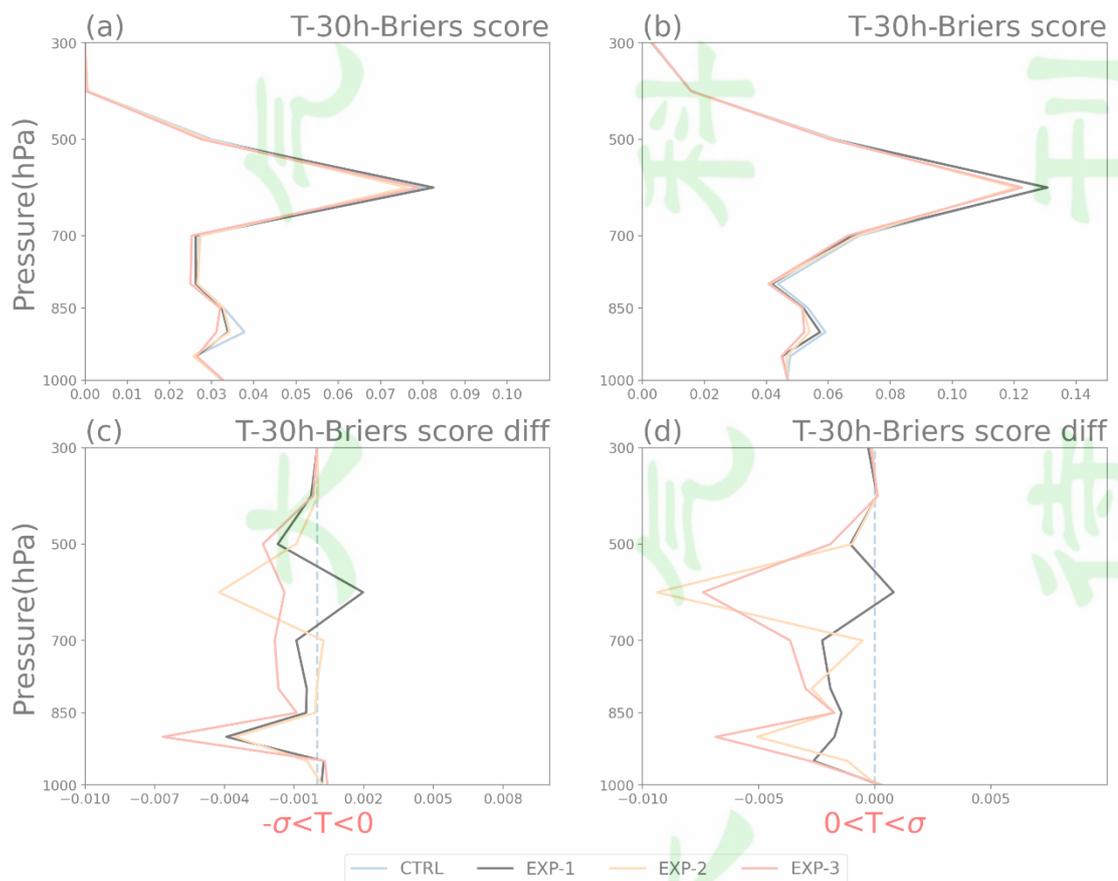
342 图 9，同图 8，但为变量 U 的；且  $\sigma$  为 U 的气候标准偏差

343 Fig. 9 As in Fig. 8, but for the variable U; and  $\sigma$  is the climate standard deviation of U

344 图 10 是预报时刻 30h 变量 T 的 Brier 评分随气压层的变化，其中 a 为阈值是  $-\sigma < T < 0$  的  
 345 事件，b 为阈值是  $0 < T < \sigma$  的事件， $\sigma$  为 T 的气候标准偏差。当  $-\sigma < T < 0$  时，三组集合预报试验  
 346 的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL，并且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验最小  
 347 的，其 30h 在 900hPa 附近的值分别为 0.031，CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为 0.0377、0.0338

348 和 0.0342；从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看，EXP3 的 Brier 评分  
 349 差值明显大于 EXP1 和 EXP2 的，并且在地表附近相差最大，其 30h 在 950hPa 附近的差值分  
 350 别为 0.0066，而 EXP1 和 EXP2 的为 0.039 和 0.035；在预报时刻 30h，EXP2 与 CTRL 的变量 T  
 351 的 Brier 评分差值与 EXP1 相差不大，但在 600hPa 时，EXP1 和 EXP2 的 Brier 评分差值相差较  
 352 大，EXP2 的值大于 EXP1。

353 当  $0 < U < \sigma$  时，三组集合预报试验的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL，并且 EXP3 的  
 354 Brier 评分值为三组集合预报试验最小的，其 30h 在 950hPa 附近的值分别为 0.052，而 CTRL  
 355 的值分别为 0.059；从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看，EXP3 的  
 356 Brier 评分差值基本都大于 EXP1 和 EXP2 的，尤其是 900hPa，EXP3 的 Brier 评分差值为 0.00684，  
 357 而 EXP1 和 EXP2 的为 0.0017 和 0.005；在预报时刻 30h，EXP2 与 CTRL 的变量 T 的 Brier 评分  
 358 差值与 EXP1 相差不大，但在 600hPa 时，EXP1 和 EXP2 的 Brier 评分差值相差较大，EXP2 的  
 359 值大于 EXP1。



360

361

图 10，同图 8，但为预报时刻 30h 的

362

Fig. 10 As in Fig. 8, but for the forecast time 30h

363 图 11 是预报时刻 30h 变量 U 的 Brier 评分随气压层的变化, 其中 a 为阈值是  $-\sigma < U < 0$  的  
364 事件, b 为阈值是  $0 < U < \sigma$  的事件,  $\sigma$  为 U 的气候标准偏差。当  $-\sigma < U < 0$  时, 三组集合预报试验  
365 的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL, 并且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验最小  
366 的, 其 30h 在 900hPa 附近的值分别为 0.039, CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为 0.041、0.040  
367 和 0.040; 从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看, EXP3 的 Brier 评分  
368 差值明显大于 EXP1 和 EXP2 的, 并且在地表附近相差最大, 其 30h 在 950hPa 附近的差值分  
369 别为 0.0031, 而 EXP1 和 EXP2 的为 0.012 和 0.017; 在预报时刻 30h, EXP2 与 CTRL 的变量 T  
370 的 Brier 评分差值与 EXP1 相差不大, 但在 800hPa 以上时, EXP1 和 EXP2 的 Brier 评分差值相  
371 差较大, EXP1 的值大于 EXP2。

372 当  $0 < U < \sigma$  时, 三组集合预报试验的 Brier 评分基本都小于控制试验 CTRL, 并且 EXP3 的  
373 Brier 评分值为三组集合预报试验最小的, 其 30h 在 900hPa 附近的值分别为 0.058, 而 CTRL  
374 的值为 0.091; 从三组集合预报试验与控制试验 CTRL 的 Brier 评分差值来看, EXP3 的 Brier  
375 评分差值基本都大于 EXP1 和 EXP2 的, 尤其是 900hPa, EXP3 的 Brier 评分差值为 0.0028,  
376 而 EXP1 和 EXP2 的为 0.0012 和 0.0011; 在预报时刻 30h, EXP2 与 CTRL 的变量 T 的 Brier 评  
377 分差值与 EXP1 相差不大, 但在 600hPa 之上, EXP1 和 EXP2 的 Brier 评分差值相差较大, EXP1  
378 的值大于 EXP2。

379 综上所述, 多物理参数化组合方案 (EXP1) 和模式随机物理扰动方法 (EXP2) 的 Brier 评  
380 分结果相差不大, 预报效果相当; 在地表附近, 模式随机物理扰动方法优于多物理参数化组  
381 合方案的预报效果, 如 12h 的 U; 使用模式随机物理扰动方法加上多物理参数化组合方案  
382 (EXP3) 的 Brier 评分结果最好, 这也表明当前集合预报系统中的模式误差仍然过于复杂,  
383 无法单独用单个方案表示。

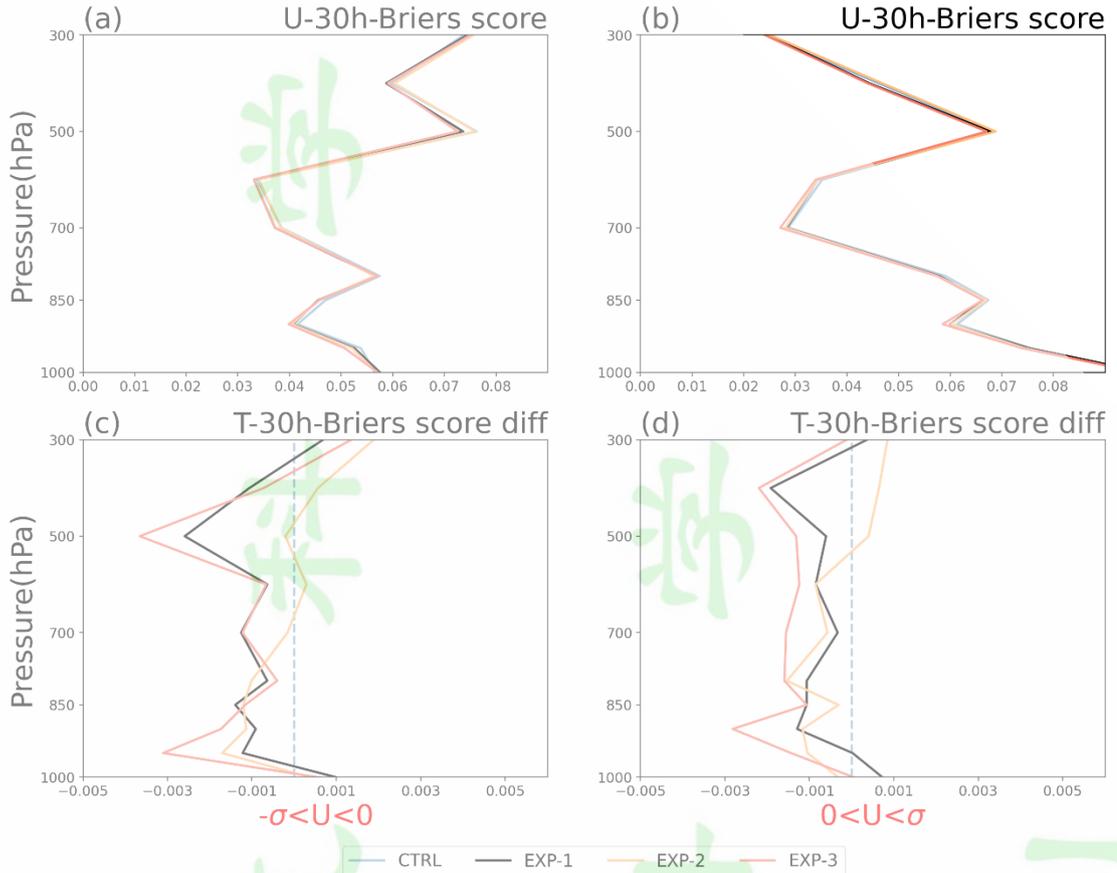
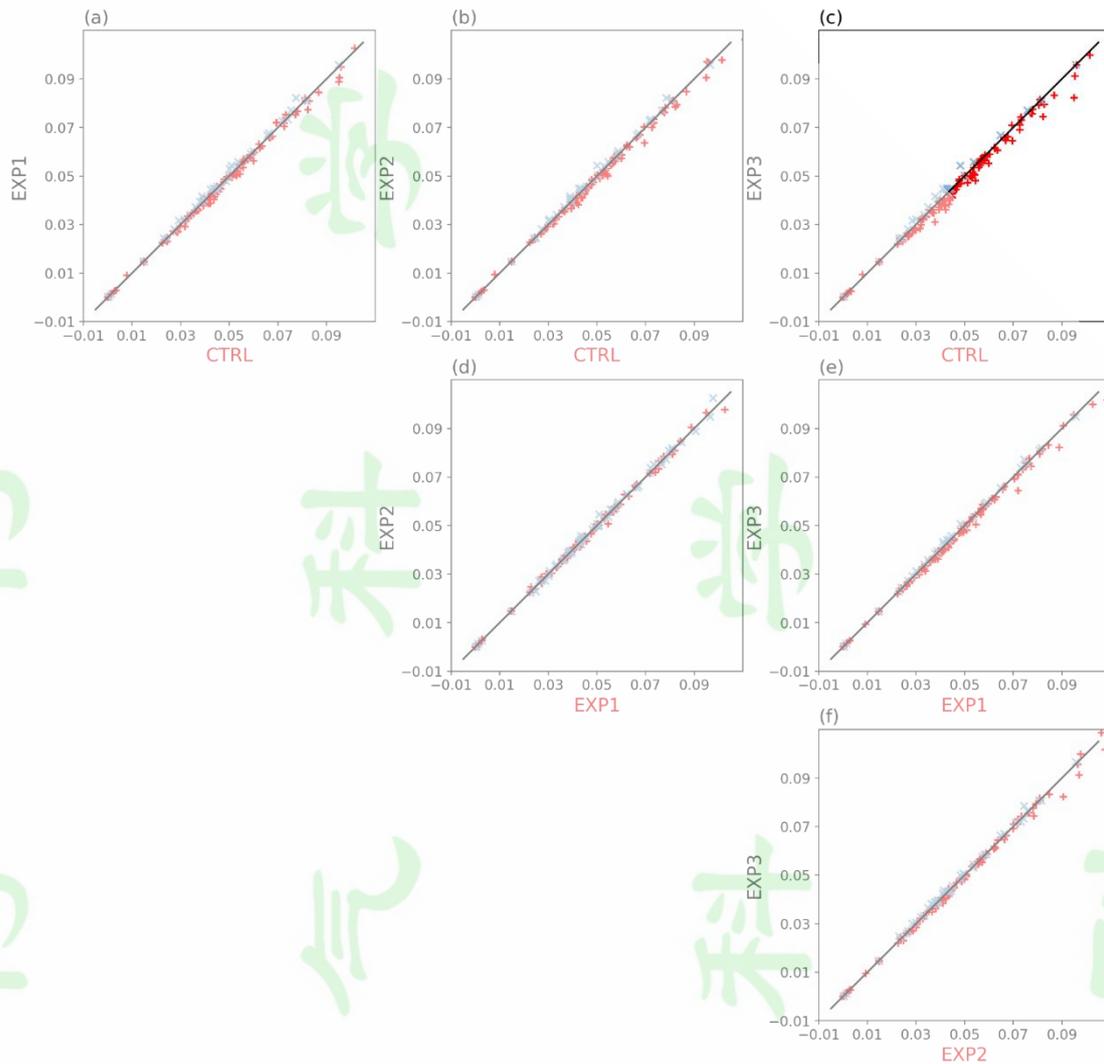


图 11 ， 同图 9 ， 但为预报时刻 30h 的

Fig. 11 As in Fig. 9, but for the forecast time 30h

387 图 12 为模式扰动方案对区域集合预报结果评估图，图中散点为 4 个预报时刻（12h、  
 388 18h、24h、30h）、2 个预报变量（T、U）、2 个阈值（ $-\sigma < T < 0$ 、 $0 < T < \sigma$ ）和 10 层气压层，总  
 389 共 160 个点。根据图 a-c，三组集合预报试验的 Brier 评分相较于控制试验 CTRL 有所改善，  
 390 并且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验改善最大的，其相对于控制实验的 Brier 评分  
 391 值改善的点有 134 个，而 EXP1 和 EXP2 改善的点的分别为 116 和 119（表 4）；EXP1 和 EXP2  
 392 相对于 CTRL 试验的改善率为 45%和 48.76%，而 EXP3 能达到 70%（表 5）；根据图 d-e，EXP2  
 393 与 EXP1 的预报效果相当，而 EXP3 相较于 EXP1 预报效果改善明显，其相对于 EXP1 的 Brier  
 394 评分值改善的点有 126 个，改善率达到 57.5%；根据图 f，EXP3 明显改善了 EXP2 的预报效  
 395 果，其相对于 EXP2 的 Brier 评分值改善的点有 112 个，改善率达到 40%。



396

397 图 12 模式扰动方案对区域集合预报结果评估图，图 a-c 为 EXP1、EXP2 和 EXP3 相对于控制试验 CTRL  
 398 的 Brier 评分值，图 d-e 为 EXP2 和 EXP3 相对于 EXP1 的 Brier 评分值，图 f 为 EXP3 相对于 EXP2 的 Brier  
 399 评分值，图中散点为 4 个预报时刻（12h、18h、24h、30h）、2 个预报变量（T、U）、2 个阈值（ $-\sigma < T < 0$ 、  
 400  $0 < T < \sigma$ ）和 10 层气压层的值，总共 160 个点。Brier 评分值越小，集合预报系统的准确性越高，故图中对  
 401 角线以下的点为纵轴的试验相对横轴的试验改善（即图中红色的“+”号为纵轴的试验相对横轴的试验改  
 402 善），对角线以上的点为纵轴的试验相对横轴的试验没有改善（即图中蓝色的“×”号为纵轴的试验相对  
 403 横轴的试验改善）。

404 Fig. 12 Evaluation of regional ensemble forecast results applying the model stochastic physical perturbation  
 405 methods, (a-c) show the Brier score values of EXP1, EXP2 and EXP3 relative to the control experiment, (d-e) show  
 406 the Brier scores of EXP2 and EXP3 relative to EXP1, (f) shows the Brier score of EXP3 relative to EXP2, The  
 407 scattered points in the figure are the values of 4 forecast moments (12h, 18h, 24h, 30h), 2 forecast variables (T,  
 408 U), 2 thresholds ( $-\sigma < T < 0$ ,  $0 < T < \sigma$ ) and 10 layers of pressure layers, for a total of 160 points. The smaller the

409 value of Brier score, the higher the accuracy of the ensemble forecasting system, so the points below the diagonal  
 410 in the figure are the improvement of the experiment on the vertical axis relative to the experiment on the  
 411 horizontal axis, (i.e., the red "+" sign in the figure is the experiment improvements of the experiment on the  
 412 vertical axis relative to the horizontal axis), The experiment with the point above the diagonal as the vertical axis  
 413 did not improve relative to the experiment with the horizontal axis (i.e., the blue "x" marks in the figure show the  
 414 improvement of the experiment with the vertical axis relative to the experiment with the horizontal axis).

415 表 4 模式扰动方案对区域集合预报结果评估表；括号里为改善或没有改善的点占总数的比例，单位（%）

416 Table 4 Table of the assessment of the model stochastic physical perturbation methods on the results of the  
 417 regional ensemble forecasts; the percentage of the total number of points that improved or did not improve in  
 418 parentheses, in (%)

	EXP1 better	EXP1 worse	EXP2 better	EXP2 worse	EXP3 better	EXP3 worse
CTRL	116(72.5)	44(27.5)	119(74.38)	41(25.62)	134(85)	27(15)
EXP1			90(56.25)	70(43.75)	126(78.75)	34(21.25)
EXP2					112(70)	48(30)

419 表 5 模式扰动试验相互之间的改善率，单位（%）

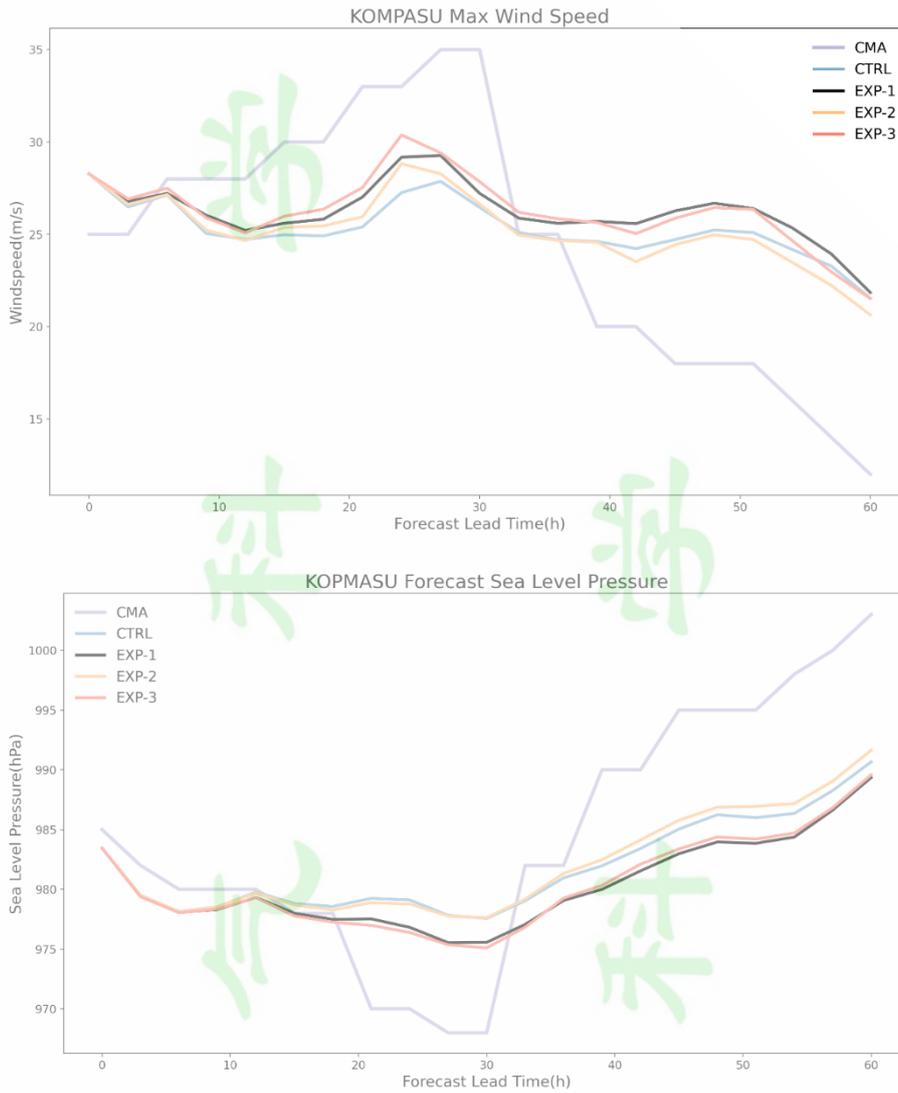
420 Table 5 Improvement rate of experiments against each other, in (%)

	EXP1	EXP2	EXP3
CTRL	45	48.76	70
EXP1		12.5	57.5
EXP2			40

421

#### 422 4.4 台风路径和强度分析

423 图 13 为台风圆规模拟最大风速、最低气压与实况对比图。三组集合预报试验模拟出来  
 424 的风速大小基本一致，都是先略低于实况，而后略高于实况；台风圆规在模拟的初始时刻风  
 425 速为 25m/s 左右；在预测的第 30 小时左右，风速达到最大（35m/s 左右），而模拟试验预测  
 426 的风速低于实际情况，并且 EXP3 预测的风速最接近实况。初始时刻台风圆规在洋面上的最  
 427 低气压为 985hPa，之后逐渐增强，最低气压达到 968hPa，登陆后台风强度逐渐减弱。总的  
 428 来说，三组模拟试验都能模拟台风增强的过程，但对台风强度的模拟偏弱，三组试验中 EXP3  
 429 的模拟结果最好。



430

431

432

图 13 台风“圆规”模拟最大风速、最低气压与实况对比

433

Fig. 13 Comparison of the simulated maximum wind speed and minimum pressure of the typhoon

434

“Kompasu” compare with the observation

435

图 14 为台风圆规模拟路径与实况对比图。三组集合预报试验对台风圆规的模拟效果较

436

好，基本能够模拟出台风圆规的路径，以及趋势走向。开始时数值预报系统的三组模拟试验

437

对台风圆规的模拟基本一致；随着台风圆规的增强，三组试验对台风圆规的路径的模拟偏北，

438

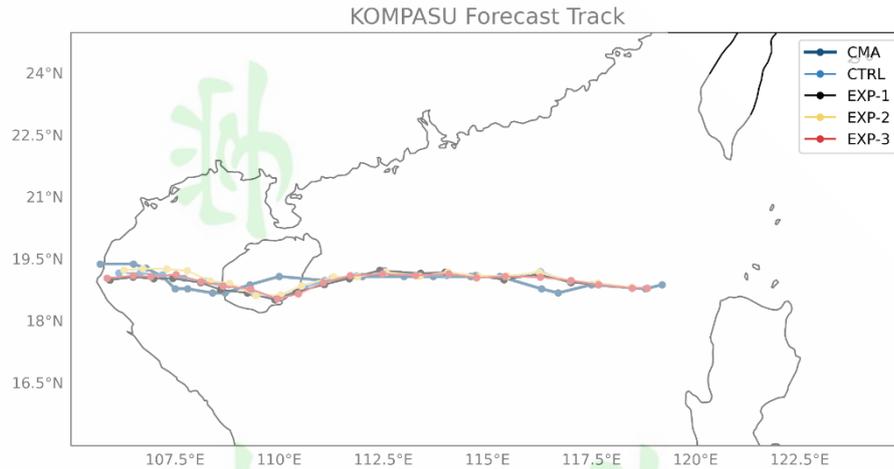
但 EXP3 的偏北程度更小，而后三组试验又逐渐趋于实况；随着台风圆规的登陆海南岛，三

439

组试验对台风圆规的路径的模拟偏南；总体而言，三组试验中 EXP3 对台风圆规路径模拟结

440

果最好。



441

442

图 14 台风“圆规”模拟路径与实况对比

443

Fig. 14 Comparison of the simulated path of typhoon “Kompasu” compare with the observation

444

图 15 为台风圆规模拟路径与实况路径偏差图。总体而言，三组集合预报试验对台风圆

445

规模拟路径与实况路径偏差较小，对台风圆规路径的模拟效果较好。开始时数值预报系统的

446

三组模拟试验对台风圆规的路径偏差模拟基本一致；随着台风圆规的发展，三组试验对台风

447

圆规的路径偏差模拟均小于 15km，但 EXP3 的路径偏差程度更小；从台风圆规模拟路径与实

448

况路径偏差的箱型图来看，除去异常值，EXP3 的路径偏差值为三组集合预报试验最小的，

449

其平均值为 52.8km，CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为 61.8、54.4 和 65.7km；三组集合预报

450

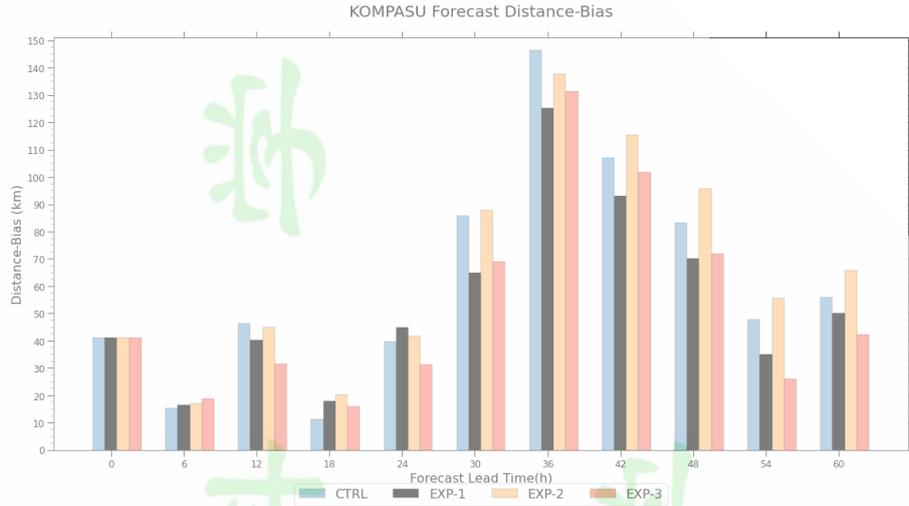
试验中 EXP3 随预报时间变化的路径偏差值的中位数为 41.0km，而 CTRL、EXP1 和 EXP2 的值

451

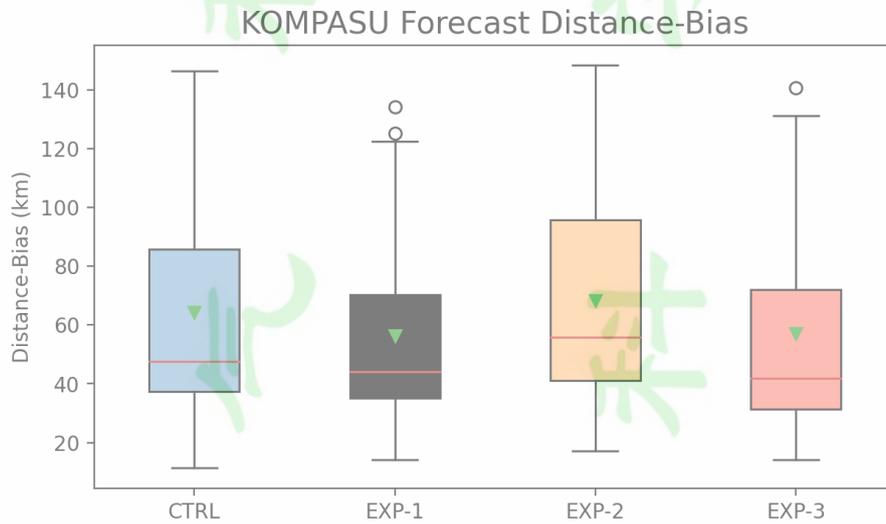
分别为 47.7、44.7 和 55.7km。总体而言，三组试验中 EXP3 对台风圆规路径模拟结果最好。

452

453



454



455

456 图 15 台风“圆规”模拟路径与实况路径偏差，其中箱线图是不同预报时刻的路径偏差分布

457 Fig. 15 The deviation of the simulated path of the typhoon “Kompasu” compare with the actual path, where

458 the Box-plot is the distribution of the deviation of the path at different forecast times

459 **5. 总结与讨论**

460 本文以 2021 年 18 号台风“圆规”为例，基于 WRF 模式，采用随机参数扰动法(SPP)和  
 461 模式物理参数化倾向随机扰动法(SPPT)，展开三组集合预报试验。为了检验评估三组集合预  
 462 报试验对台风的预报能力，对各组试验的 Brier 评分、扰动能量及台风相关检验进行对比分  
 463 析，得到如下结果：

464 (1) 对于预报变量的离散度和均方根误差，多物理参数化组合方案（EXP1）和模式随  
 465 机物理扰动方法（EXP2）预报效果相当，且在地表附近，模式随机物理扰动方法优于多物理

466 参数化组合方案的预报效果。模式随机物理扰动方法加上多物理参数化组合方案 (EXP3) 总  
467 体的预报效果相对多物理参数化组合方案 (EXP1) 和模式随机物理扰动方法 (EXP2) 好, 这  
468 也表明当前集合预报系统中的模式误差仍然过于复杂, 无法单独用单个方案表示。

469 (2) 对于扰动能量, 三组集合预报试验 (EXP1、EXP2 和 EXP3) 的湿扰动能量值基本都  
470 大于控制试验 CTRL, 且 EXP3 的扰动能量发展最快, 扰动能量值基本为最大的。由此说明,  
471 单单使用模式随机物理扰动方法或者多物理参数化组合方案所激发的扰动能量太弱, 并不能  
472 完美地描述强降水天气过程的能量发展状况, 而模式随机物理扰动方法加上多物理参数化组  
473 合方案 (EXP3) 可以很好地解决这个问题。

474 (3) 对于模式扰动方案结果评估, 三组集合预报试验的 Brier 评分相较于控制试验 CTRL  
475 有所改善, 且 EXP3 的 Brier 评分值为三组集合预报试验改善最大的, EXP1 和 EXP2 相对于  
476 CTRL 试验的改善率为 45% 和 48.76%, 而 EXP3 能达到 70%; EXP2 与 EXP1 的预报效果相当,  
477 而 EXP3 相较于 EXP1 和 EXP2 预报效果改善明显, 其相对于 EXP1 和 EXP2 的改善率达到 57.5%  
478 和 40%。

479 (4) 对于台风的预报, 集合预报试验都能模拟台风增强的过程, 以及台风的路径, 但  
480 对台风强度的模拟偏弱, 三组试验中 EXP3 的模拟结果最好; EXP3 的路径偏差值为三组集合  
481 预报试验最小的, 其平均值为 52.8km, CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为 61.8、54.4 和 65.7km;  
482 EXP3 随预报时间变化的路径偏差值的中位数为 41.0km, 而 CTRL、EXP1 和 EXP2 的值分别为  
483 47.7、44.7 和 55.7km。

484 本文仅仅是探讨了运用模式随机物理扰动方法和多物理参数化组合方案的集合预报对  
485 预报效果的影响, 并未设置单一模式随机物理扰动方法的对照试验 (如单独使用 SPP 或者  
486 SPPT), 试验结果的说服力还有待提高; 在个例的选取也存在一定的不足, 本文只选取了南  
487 海的一次台风过程进行集合预报试验, 选取的个例太少, 模拟的时间段太短, 个例的代表性  
488 不足。今后还需注意本文的局限性, 在后续的研究中, 同时考虑更多的台风个例; 同时, 本  
489 文也只是探讨了模式随机物理扰动方法和多物理参数化组合方案的优劣, 从能量扰动发展的  
490 角度简要分析了孰优孰劣的原因, 并未进行深入探讨, 在后续工作中需要从物理过程参数化  
491 方案、精细化分析等角度开展研究。本文研究中, 由于计算资源的限制, 模式的水平分辨率为  
492 9km, 反应台风的对流过程的能力一般, 在后续研究中可以适当增加模拟的分辨率; 集合  
493 预报的集合成员仅为 20 个, 以后的集合预报实验可以适当增加集合成员。

## 参考文献

494

- 495 Berner J, G Shutts, M Leutbecher, and T Palmer. 2009. A spectral stochastic kinetic energy  
496 backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble  
497 prediction system [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66, 603 - 626.
- 498 Berner J, Ha S Y, Hacker J P, Fournier A, & Snyder C. 2011. Model Uncertainty in a Mesoscale  
499 Ensemble Prediction System: Stochastic versus Multiphysics Representations [J]. *Monthly*  
500 *Weather Review.*, 139(6):1972-1995.
- 501 Berner J, Fossell K R, Ha S Y, Hacker J P, & Snyder C. 2015. Increasing the Skill of  
502 Probabilistic Forecasts: Understanding Performance Improvements from Model-Error  
503 Representations [J]. *Monthly Weather Review.*, 43(4):1295-1320.
- 504 Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, Robertson K B, & Beare S E. 2008. The MOGREPS short-range  
505 ensemble prediction system. *Quart [J]. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 703 - 722.
- 506 Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, Pellerin G, Wei M, & Zhu Y. 2005. A comparison of the  
507 ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1076 -  
508 1097.
- 509 Buizza R, Milleer M, Palmer T N. 1999. Stochastic representation of model uncertainties  
510 in the ECMWF Ensemble Prediction System [J]. *Quarterly Journal of the Royal*  
511 *Meteorological Society.*, 125(560).
- 512 Brier G W. 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability [J].  
513 *Mon. Wea. Rev.*, 78:1-3
- 514 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 [J]. *高*  
515 *原气象*, 36(2) : 407-423. CAI Yuanchen, MIN Jinzhong, ZHUANG Xiaoran. 2017. Comparison  
516 of Different Stochastic Physics Perturbation Schemes on a Storm-Scale Ensemble Forecast  
517 in a Heavy Rain Event [J]. *Plateau Meteorology.*, 36(2) : 407-423.
- 518 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验 [J]. *气象学报*,  
519 61(4):432-446. Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. THE UNCERTAINTY OF MESOSCALE  
520 NUMERICAL PREDICTION OF SOUTH CHINA HEAVY RAIN AND THE ENSEMBLE SIMULATIONS [J]. *Acta*  
521 *Meteorologica Sinica.*, 61(4):432-446.
- 522 Collins, William D., et al. 2004. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM  
523 3.0). NCAR Tech. Note NCAR/TN - 464+STR. 214 pp.
- 524 Dudhia J. 1989. Numerical study of convection over Brier served during the Winter Monsoon  
525 Experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077 - 3107.
- 526 Ehrendorfer M, Errico R M, Raeder K D. 1999. Singular-Vector Perturbation Growth in a  
527 Primitive Equation Model with Moist Physics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences.*,  
528 56(11):1627-1648.
- 529 Hacker J P, and Coauthors. 2011a. The U.S. Air Force Weather Agency's mesoscale ensemble:  
530 Scientific description and performance results [J]. *Tellus.*, 63A, 625 - 641.
- 531 Hacker J P, Snyder C M, Ha S-Y, & Pocerlich M. 2011b. Linear and nonlinear response to  
532 parameter variations in a mesoscale model [J]. *Tellus.*, 63A, 429 - 444.
- 533 Hong S-Y, and J-O J Lim. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)  
534 [J]. *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129 - 151.
- 535 Iacono M J, J S Delamere, E J Mlawer, M W Shephard, S A Clough, and W D Collins. 2008.

536 Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative  
537 transfer models [J]. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103.

538 Janjic Z I. 1996. The surface layer in the NCEP Eta Model. Eleventh conference on numerical  
539 weather prediction, Norfolk, VA, 19 - 23 August 1996. Amer Meteor Soc, Boston, MA, pp  
540 354 - 355.

541 Jankov, I.; Berner, J.; Beck, J.; Jiang, H.; Olson, J.B.; Grell, G.; Smirnova, T.G.;  
542 Benjamin, S.G.; Brown, J.M. 2017. A Performance Comparison between Multi-Physics and  
543 Stochastic Approaches Within a North American RAP Ensemble. *Mon. Weather Rev.*, **145**,  
544 1161 - 1179

545 Jimenez Pedro A, Jimmy Dudhia J Fidel Gonzalez - Rouco, Jorge Navarro, Juan P Montavez, and  
546 Elena Garcia - Bustamante. 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation  
547 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 898 - 918.

548 Leutbecher M, and Coauthors. 2017. Stochastic representations of model uncertainties at  
549 ECMWF: State of the art and future vision. *Quart [J]. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2315-  
550 2339.

551 Lorenz E N . 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J].  
552 *Tellus A.*, **17**(3):321-333.

553 Lorenz, E. N.. 1969. The predictability of a flow which possesses many scales of motion [J].  
554 *Tellus.*, **21**, 289 - 307.

555 Mlawer Eli J, Steven J Taubman, Patrick D Brown, M J Iacono, and S A Cloug. 1997. Radiative  
556 transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the  
557 longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663 - 16682.

558 Molteni F, and T N Palmer. 1993. Predictability and finite-time instability of the northern  
559 winter circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 269 - 298.

560 Morrison H, G Thompson, V Tatarskii. 2009. Impact of Cloud Microphysics on the Development  
561 of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One - and  
562 Two - Moment Schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991 - 1007.

563 Morrison, Hugh , and J A Milbrandt. 2014. Parameterization of cloud microphysics based on  
564 the prediction of bulk ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized  
565 tests [J]. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 287-311.

566 Ollinaho P, Lock S J, Leutbecher M, et al. 2016. Towards process-level representation of  
567 model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble  
568 [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.*, **143**(702):408-422.

569 Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, & Buizza R. 1998. Singular vectors, metrics, and  
570 adaptive observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences.*, **55**(4):633-653.

571 Palmer, Brankovic T, Buizza C, Chessa R, & Ferranti P. 2001. A review of predictability and  
572 ECMWF forecast performance, with emphasis on Europe [J]. *Ecmwf*.

573 Palmer T N, R Buizza, F Doblas-Reyes, T Jung, M Leutbecher, G Shutts, M Steinheimer, and A  
574 Weisheimer. 2009. Stochastic Parametrization and Model Uncertainty [J]. *ECMWF Technical*  
575 *Memorandum.*, 598.

576 Romine G S, Schwartz C S, Berner J, Fossell K R, Snyder C, Anderson J L, & Weisman M L.  
577 2014. Representing Forecast Error in a Convection-Permitting Ensemble System [J].  
578 *Monthly Weather Review.*, **142**(12):4519-4541.

579 谭燕. 2006. 中尺度强降水天气集合预报技术的研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Tan Yan.  
580 2006. Research on mesoscale intense precipitation weather ensemble forecasting  
581 techniques [D]. M.S. thesis(in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.  
582 Thompson, Gregory, Paul R Field, Roy M Rasmussen, William D Hall. 2008. Explicit Forecasts  
583 of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II:  
584 Implementation of a New Snow Parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095 - 5115.  
585 Toth Z, and E Kalnay. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations  
586 [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2317 - 2330.  
587 徐致真, 陈静, 王勇, 李红祺, 陈法敬, 范宇恩. 2019a. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性  
588 试验. *气象学报*, 77(5): 849-868. Xu Zhizhen, Chen Jing, Wang Yong, Li Hongqi, Chen  
589 Fajing, Fan Yuen. 2019a. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed  
590 parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction [J].  
591 *Acta Meteorologica Sinica.*, 77(5): 849-868.  
592 徐致真. 2019b. 基于 GRAPES 区域模式的集合预报随机参数扰动方法研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士  
593 学位论文. Xu Zhizhen. 2019b. Research on the stochastically perturbed parameterization  
594 based on GRAPES regional ensemble prediction system [D]. M.S. thesis(in Chinese),  
595 Chinese Academy of Meteorological Sciences.  
596 张涵斌, 范水勇, 陈敏, 孙鑫. 2019. 区域集合预报基于 SKEB 和多物理过程的混合模式扰动方法研究  
597 [J]. *气象*, (1):12. Zhang Hanbin, Fan Shuiyong, Chen Min, Sun Xin. 2019. Study on a  
598 Synthetic Model Perturbation Method Based on SKEB and Multi-Physics for Regional  
599 Ensemble Forecast [J]. *Meteorological Monthly.*, (1):12.  
600 张凯锋, 王东海, 张宇, 吴珍珍, 李国平. 2020. 动力降尺度和多物理参数化方案组合对华南前汛期降水  
601 集合预报的影响研究 [J]. *热带气象学报*, 36(05):668-682. Zhang Kaifeng, Wang Donghai, Zhang  
602 Yu, Wu Zhenzhen, Li Guoping. 2020. STUDY ON IMPACTS OF DYNAMIC DOWNSCALING AND MULTI-  
603 PHYSICAL PARAMETERIZATION SCHEME COMBINATION ON ENSEMBLE FORECAST OF ANNUALLY FIRST  
604 RAINY SEASON IN SOUTH CHINA [J]. *Journal of Tropical Meteorology.*, 36(05):668-682.  
605 Zhang X. 2022. Impacts of New Implementing Strategies for Surface and Model Physics  
606 Perturbations in TREPS on Forecasts of Landfalling Tropical Cyclones [J]. *Adv. Atmos.*  
607 *Sci.* 1-26.  
608