

陈雨潇, 徐致真, 陈静, 等. 2020. 随机参数扰动方法对中国冬季降水集合预报的影响 [J]. 大气科学, 44(5): 984–996. CHEN Yuxiao, XU Zhizhen, CHEN Jing, et al. 2020. Influence of Stochastically Perturbed Parameterization on Ensemble Forecasting of Winter Precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 984–996. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.19157

随机参数扰动方法对中国冬季降水集合预报的影响

陈雨潇¹ 徐致真² 陈静³ 李红祺³ 陈法敬³

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国气象科学研究院, 北京 100081

³ 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

摘 要 降水数值预报有很大的不确定性, 与降水预报密切相关的物理过程参数化方案中关键参数的不确定性是降水数值预报误差来源之一, 对这些参数引入随机扰动的随机参数扰动方法 (Stochastically Perturbed Parameterization, 简称 SPP 方法) 可以代表模式降水预报的不确定性, 是国际集合预报前沿研究领域。为了认识该方法能否代表中国冬季降水数值预报的不确定性, 为业务应用提供科学依据, 基于中国气象局中尺度区域集合预报模式 (Global/Regional Assimilation and Prediction System-Regional Ensemble Prediction System, 简称 GRAPES-REPS), 从对模式降水预报不确定性有较大影响的积云对流、云微物理、边界层及近地面层等四个参数化方案中选取了 16 个与降水密切相关的关键参数, 引入了随机参数扰动方法, 并通过 2018 年 12 月 12 日至 2019 年 1 月 12 日总计 31 天的冬季集合预报试验, 对比分析了 SPP 方法对等压面要素及降水的集合预报效果。结果显示: 在冬季应用 SPP 方法时, 等压面要素的概率预报技巧总体来说优于无 SPP 方法扰动的对比试验, 且对于低层、近地面要素的改进效果优于对中层等压面要素的改进; 但对降水概率预报而言, 尽管检验评分数值略优于对比预报试验, 但并未通过显著性检验, 这表明, 在东亚冬季风影响下, 随机参数扰动方法对中国冬季降水概率预报技巧没有明显的改进。究其原因, 可能是由于 SPP 方法主要代表对流性降水预报的不确定性, 而中国冬季降水过程主要与斜压不稳定发展有关, 模式降水以大尺度格点降水为主, 对流性降水较少, 故对冬季降水预报改进不明显, 这为业务集合预报模式中应用随机参数扰动方法提供了科学依据。

关键词 随机参数扰动方法 集合预报 中国冬季降水

文章编号 1006-9895(2020)05-0984-13

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.19157

Influence of Stochastically Perturbed Parameterization on Ensemble Forecasting of Winter Precipitation in China

CHEN Yuxiao¹, XU Zhizhen², CHEN Jing³, LI Hongqi³, and CHEN Fajing³

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ Numerical Weather Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Precipitation ensemble forecasting is characterized by great uncertainty, and the uncertainty of the parameters in the physical that is closely related to the precipitation forecast is one of the sources of its numerical prediction error. As

收稿日期 2019-05-05; 网络预出版日期 2020-04-27

作者简介 陈雨潇, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事集合预报研究. E-mail: chenyx01@outlook.com

通讯作者 陈静, E-mail: chenjing@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507405

Funded by National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2018YFC1507405)

a frontier research field in international ensemble forecasting, the stochastically perturbed parameterization (SPP) method has been developed to address the uncertainty of representative model precipitation forecasts. To determine whether this method can reflect the uncertainty of numerical predictions of winter precipitation in China and provide a scientific basis for business applications, we used the China Meteorological Administration's Global/Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES) mesoscale regional ensemble prediction model and selected 16 key parameters from four parameterization schemes. These parameters, e.g., cumulus convection, cloud microphysics, boundary layer, and near-surface layer, greatly influence the uncertainty of model precipitation forecasts. In this paper, we introduce the stochastically perturbed parameterization (SPP) method and describe the results of an ensemble prediction experiment conducted from December 12, 2018 to January 12, 2019, a total of 31 days. We compare and analyze the effect of the SPP method on the winter weather situation and precipitation ensemble prediction. The results show that with the addition of a test for the SPP method, the results of probability prediction techniques for precipitation and isobaric elements are better than the control predictions without the SPP method, and the improvement of low-level and near-surface elements is better than that of the iso-surface elements in the middle or upper floors. The precipitation prediction results obtained superior scores to those of the control prediction test, but because the improvement did not pass the test of significance, the differences were not statistically significant. The above results indicate that under the influence of the East Asian winter monsoon, the SPP method demonstrates no obvious improvement on the current prediction technique used for winter precipitation in China. The reason for this may be that the SPP method mainly represents the uncertainty of convective precipitation forecasting, whereas the winter precipitation process in China is mainly one characterized by the development of baroclinic instability. Because model precipitation is dominated by large-scale grid precipitation, and less convective precipitation, improvement in the winter precipitation forecast is not obvious. Thus, there is a scientific basis for applying the SPP method to the operation ensemble forecasting model.

Keywords Stochastically Perturbed Parameterization, Ensemble forecast, Winter precipitation in China

1 引言

由于大气运动的非线性混沌特性 (Lorenz, 1963), 在数值预报中初值或者模式的微小误差会对其产生很大的影响, 使得数值预报结果具有不确定性 (Leith, 1974)。对于降水、降雪等天气过程的复杂性, 预报结果的不确定性往往更加明显, 导致其数值预报准确率相对较低 (Roebber et al., 2004)。数值预报不确定性来源主要来自初值误差和模式误差, 集合预报是描述这两类误差的重要途径 (杜钧和陈静, 2010)。模式随机物理扰动方法是代表模式误差的主要途径, 可分为三类: 模式物理参数化倾向随机扰动方案 (Stochastically perturbed parameterization tendencies, 简称 SPPT; Buizza et al., 1999; Palmer et al., 2009)、随机动能补偿方案 (Stochastic Kinetic-energy Backscatter Scheme, 简称 SKEB; Shutts, 2005; Berner et al., 2009) 及随机参数扰动方法 (Stochastic Perturbed Parameterization, 简称 SPP; Ollinaho et al., 2017), 其中随机参数扰动方法 SPP 是国内外集合预报模式随机物理扰动方法的研究热点。

模式物理过程参数化方案, 如积云对流、边界

层、云微物理等, 对于准确预报中小尺度对流不稳定天气发生发展极为重要 (Ollinaho et al., 2017)。SPP 方法主要对这些物理过程中的降水敏感参数进行随机扰动, 可以较好代表夏季强对流天气降水的不稳定性特征, 国内外许多学者对此进行了研究 (陈静等, 2003b; Li et al., 2008; Bowler et al., 2008; Baker et al., 2014; Christensen et al., 2015; Leutbecher et al., 2017; Jankov et al., 2017; Ollinaho et al., 2017; 徐致真等, 2019)。SPP 方法需要解决两个关键问题 (Ollinaho et al., 2017)。第一个问题是如何构造随机函数, 早期随机函数的设计比较简单, 只随时间变化, 不随空间变化 (陈静等, 2003b; Bowler et al., 2008; Baker et al., 2014), 如陈静等 (2003b) 引入随时间变化的随机函数, 开展了华南中尺度暴雨随机参数扰动试验; Bowler et al. (2008) 基于英国的全球集合预报系统, 将选定的物理过程参数视为随机变量, 使用一阶自回归模型计算每个参数值, 开展了随机参数扰动试验; Baker et al. (2014) 使用随时间变化的一阶自回归模型来对参数化方案中的参数值进行了随机扰动试验。后期学者们对随机型的构造方法进行了深入改进, 随机型不仅随时间变化, 且具有空间变化特征。Li et al. (2008) 基

于 Lin and Neelin (2000) 的一阶马尔科夫过程, 构造了具有时空变化特征的随机函数, 并利用加拿大全球环境多尺度区域集合预报系统, 开展了云微物理和对流参数化方案随机扰动试验。第二个问题是如何选择扰动参数, Jankov et al. (2017) 基于 WRF 模式的快速更新集合预报系统进行了对 4 个参数的 SPP 扰动试验; Ollinaho et al. (2017) 和 Leutbecher et al. (2017) 基于 ECMWF 全球集合预报, 从中选取了 21 个参数, 开展了 SPP 方法的初步试验; 徐致真等 (2019) 基于 GRAPES 中尺度区域集合预报模式, 选取了 18 个参数进行了夏季时段 SPP 方法敏感性试验, 结果显示 SPP 方法对于夏季降水、等压面要素等集合预报结果有一定程度上的改进。

中国冬季低温、冻雨、暴雪等气象灾害频繁发生, 如 2008 年 1 月发生的大范围低温雨雪冰冻灾害等 (朱乾根, 1990; 李崇银等, 2008), 提高冬季降水预报准确率获得越来越多的重视。但是, 中国冬季降水天气背景及物理过程与夏季有较大差别。在夏季, 东亚盛行偏南风, 水汽输送充足 (Ding et al., 2008; 黄荣辉等, 2011), 大范围强降水大多由斜压不稳定和对流不稳定性共同发生发展所致 (王咏薇, 2004), 而在冬季, 东亚冬季风水汽输送相对较弱, 大范围降温降水过程通常由中高纬度斜压波和冷空气活动所致, 对流运动相对较弱 (朱乾根, 1990; 索渺清和丁一汇, 2009; 彭京备, 2012; 丁一汇等, 2013)。在集合预报模式中应用 SPP 方法, 对于冬季降水集合预报会有怎样的效果?

因此, 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随机扰动, 通过 2018 年 12 月 12 日至 2019 年 1 月 12 日总计 31 天的随机扰动集合预报试验, 分析 SPP 方法对冬季降水集合预报结果的影响, 为进一步在业务集合预报模式中应用随机参数扰动方法提供科学依据。

2 试验模式、SPP 方法简介和试验设计

2.1 集合预报试验模式

试验采用水平分辨率 10 公里的 GRAPES 区域集合预报系统, 预报区域为中国大陆区域 (15°~65°N, 70°~145°E), 垂直坐标采用地形追随高度坐标, 垂直层次为 50 层, 初值扰动场由多尺度混

合初值扰动方法产生 (张涵斌等, 2014; 马旭林等, 2018), 侧边界扰动由 T639 全球集合预报提供, 起报时间为每日的 00:00 (协调世界时, 下同), 预报时效 48 h, 集合预报成员为 15 个。每个集合预报成员具有相同的物理过程, 包括对流参数化方案为 Kain-Fritsch (new eta) (Kain, 2004) 方案, 云微物理方案为 WSM6 (Hong et al., 2006), 边界层方案为 MRF (Hong et al., 1996), 近地面层方案为 Monin-Obukhov (Beljaars, 2010), 长波辐射方案为 RRTM 长波方案 (Mlawer et al., 1997), 短波辐射方案为 Dudhia 短波方案 (Dudhia et al., 1989), 陆面过程为 Noah 陆面过程方案 (王莉莉等, 2013)。

2.2 SPP 随机参数扰动方法简介

2.2.1 SPP 随机参数扰动方法简介

参考徐致真等 (2019) 研究工作, 引入统一的对数正态分布表达式描述所有关键参数的分布, 如公式 (1) 所示:

$$\xi = \exp[\Psi_{(\lambda, \phi, t)}] \hat{\xi}, \quad \Psi \sim N(\mu, \sigma^2), \quad (1)$$

其中, $\hat{\xi}$ 为关键参数未扰动前的默认值, ξ 为扰动后的关键参数, $[\Psi_{(\lambda, \phi, t)}]$ 为高斯分布的三维随机函数 $\psi(\lambda, \phi, t)$ (均值 $\mu=0$, 标准差 $=\sigma$) 经过拉伸函数改进后的随机函数。 $[\Psi_{(\lambda, \phi, t)}]$ 定义如下:

$$\Psi_{(\lambda, \phi, t)} = \mu + \left\{ 2 - \frac{1 - \exp\left[\beta\left(\frac{\psi - \mu}{\psi_{\max} - \mu}\right)^2\right]}{1 - \exp\beta} \right\} (\psi_{(\lambda, \phi, t)} - \mu), \quad (2)$$

其中, β 取为常数, 其值为 -1.27, $\psi_{\max}$ 表示随机场 $\psi_{(\lambda, \phi, t)}$ 的上下边界。而三维随机函数 $\psi_{(\lambda, \phi, t)}$ 是袁月等 (2016) 发展的基于一阶马尔可夫链随机过程沿水平方向的球谐函数的展开, 并且具有空间结构和时间相关特征的三维随机场。其定义如下:

$$\psi_{(\lambda, \phi, t)} = \mu + \sum_{l=L_{\min}}^{L_{\max}} \sum_{m=-l}^l a_{l,m}(t) Y_{l,m}(\lambda, \phi), \quad (3)$$

其中, $a_{l,m}(t)$ 为时间相关随机场谱系数, 变量 λ 、 ϕ 和 t 分别表示经度, 纬度和时间, $Y_{l,m}(\lambda, \phi)$ 为球谐函数, l 和 m 代表总水平波数和纬向波数, L 为随机场的水平截断尺度。 $a_{l,m}(t)$ 如公式 (4) 所示:

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

其中, Δt 为集合预报系统的积分时间步长, τ 是随机场的失时间相关的时间尺度, $r_{l,m}(t)$ 均方差为 1, 均值为零的高斯分布随机过程。

经以上方法构造出的随机扰动值随空间和时间变化, 使各个关键参数具有相互独立的随机扰动场, 且可保证每个参数在其合理的统计经验范围内变动。

2.2.2 关键参数选取

根据前文所述, 研究采用的模式对流参数化为 Kain-Fritsch 方案, 边界层参数化为 MRF 方案, 云微物理参数化为 WSM6 方案, 近地面层参数化为 Monin-Obukhov 方案。根据徐致真等 (2019) 研究工作, 曾选取四个参数化方案中一共 18 个关键参数进行随机扰动。本研究考虑到中国冬季对流活动较夏季来说相对偏弱, 积云对流物理过程参数化方案对降水影响不如夏季敏感, 于是并未选择其中的夹卷质量通量率乘数和触发函数垂直速度阈值这两个参数, 最终从四个参数化方案中选取了 16 个与降水有关的关键参数进行随机扰动 (详见表 1)。

2.3 试验设计

本研究设计了 2 组试验, 第 1 组是控制试验, 集合预报成员仅考虑初值扰动方法生成, 未进行模式扰动, 第 2 组试验是对 16 个关键参数进行随机扰动 (如表 2 所示)。失时间相关系数是决定随机型的一个重要影响参数, 即随机型随时间产生变化

的更新频率, 失时间相关系数的值越大, 两个时次间随机场相关性越大, 随时间变化的频率越低。而截断波数代表随机扰动场的空间尺度, 截断波数越大, 扰动的空间尺度越小。本文基于徐致真等 (2019) 的研究结果, 同样选择较大的失时间相关系数 $\tau=12$ h, 较小的截断波数 $L=20n$ 作为本试验随机型的时间和空间相关尺度。

试验时段为 2018 年 12 月 12 日至 2019 年 1 月 12 日, 共计 31 天, 其中有三次重要的天气过程。第一次天气过程是 2018 年 12 月 12 日至 2018 年 12 月 15 日相对稳定的槽后高压系统导致冷空气入侵, 山东半岛、东北、内蒙, 新疆地区出现降雪; 第二次天气过程是 2018 年 12 月 26~30 日的强冷空气入侵, 冷涡东移南下, 整个南方地区出现一次明显的雨雪过程; 第三次天气过程是 2019 年 1 月 6~9 日, 南支槽东移和热带风暴帕布的合并, 南方地区再次出现非常明显的降水过程。表明所选试验时段可以较好地代表中国地区冬季降水的多种天气背景及流型, 第 3 节中的检验结果均是这 31 天集合预报试验检验评分的统计平均, 下面不再赘述。

2.4 检验方法

试验预报检验资料采用国家气象信息中心多源降水融合合格点分析资料 (宇婧婧等, 2015) 和 GRAPES 区域等压面同化分析场资料, 降水预报

表 1 物理参数化方案中所选取的关键参数

Table 1 Key parameters selected in the physical parameterization schemes

物理过程	关键参数	代码定义	默认值	随机扰动范围
边界层物理过程	临界理查森数	BRRCR	0.5	[0.25, 0.75]
边界层物理过程	动量扩散系数的廓线指数	PFAC	2	[1, 3]
边界层物理过程	表面层顶部普朗特数系数	CFAC	7.8	[3.9, 15.6]
边界层物理过程	冯-卡尔曼常数	KARMAN	0.4	[0.38, 0.42]
近地面层物理过程	热量/水汽交换系数的乘数	XKA	2.4×10^{-5}	$[1.2 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}]$
近地面层物理过程	海面粗糙度参数	CZO	0.0156	[0.01, 0.026]
云微物理过程	雪/云水粒子碰并系数	EACRC	1	[0.6, 1]
云微物理过程	霰密度	DENG	500	[300, 700]
云微物理过程	海上云含量	XNCR	3.0×10^8	$[1.0 \times 10^7, 1.0 \times 10^9]$
云微物理过程	雨截距参数(单位: m^{-4})	N0R	8.0×10^6	$[5.0 \times 10^6, 1.2 \times 10^7]$
云微物理过程	云雨自动转换效率	PEAUT	0.55	[0.35, 0.85]
云微物理过程	云冰直径的有限最大值(单位: m)	DIMAX	5.0×10^{-4}	$[3.0 \times 10^{-4}, 8.0 \times 10^{-4}]$
积云对流物理过程	下沉气流通量乘数	PD	1	[0.5, 2]
积云对流物理过程	USL(updraft source layer)以上下沉起始高度	PH	150	[50, 350]
积云对流物理过程	对流有效位能平均耗尽时间	TIMEC	2400	[1800, 3600]
积云对流物理过程	云下层中的最大湍流动能(TKE)值(单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)	TKEMAX	5	[3, 12]

注: 各个参数的默认值和随机扰动范围均出自于文献中标定的统计经验值及范围。

表 2 SPP 方案对冬季降水的试验设计

Table 2 The experiments about winter raining for random patterns in SPP

试验名称	模式物理扰动方案
CTL	无
SPP	扰动16个关键参数, $\tau=12\text{ h}$, $L=20n$

检验指标采用相对作用特征曲线面积 (area under relative operating characteristic curve, 简称 AROC) 和概率预报技巧评分 (Brier Score, 简称 BS), 等压面预报检验采用集合预报的一致性 (即集合离散度—集合平均均方根误差比值)、离群率 (outlier; Du, 2007)。评估变量选择为 250 hPa、500 hPa 和 850 hPa 上温度和经纬向风, 以及地面的 2 m 温度、10 m 经纬向风。

3 试验结果分析

3.1 降水 AROC 评分、BS 评分及个例分析

AROC 评分是降水概率预报技巧的常用评分, AROC 评分值越高, 代表预报技巧越强, 完美的预报 AROC 等于 1。图 1a 和 b 是 SPP 方案试验和控制预报试验的 12 h 累积降水不同降水阈值 (0.1 mm 和 5 mm) AROC 评分随预报时效演变 (冬季降水量少, 大于 15 mm 降水阈值的 AROC 统计评分在一个月试验内只有少量个例, 不具有参考价值)。从图中可以看出, 对于 0.1 mm 和 5 mm 降水阈值的 AROC 评分, 除小雨量级 (0.1 mm) 12 h 和中雨量级 (5 mm) 48 h 略低于控制预报, 其余预报时效均优于控制预报。但上述 AROC 评分结果均未通过 75% 的置信水平 t 检验 (如图 1c), 在统计学意义上看, 两组试验结果相当。

BS 评分可评估降水概率预报技巧, 当 $BS=0$ 时表示预报完全正确, 当 $BS=1$ 时, 表示预报完全不正确。图 2a、b 分别是逐 12 h 降水 BS 评分在小雨、中雨量级上随预报时效的变化。从图 2a 可见, 在小雨量级 (阈值 0.1 mm), SPP 方案的 BS 评分在 0~48 h 的预报时效均优于无扰动的控制预报, 从图 2b 可见, 对于中雨量级 (阈值 5 mm), 在预报时效 0~36 h (36~48 h) 之间, SPP 试验的 BS 评分持平或者略优于 (略差于) 控制预报, 这与 AROC 降水评分的表现是一致的。但上述 BS 评分结果也均未通过 75% 的置信水平 t 检验, 在统计学意义上看, 两组试验结果是相当的。

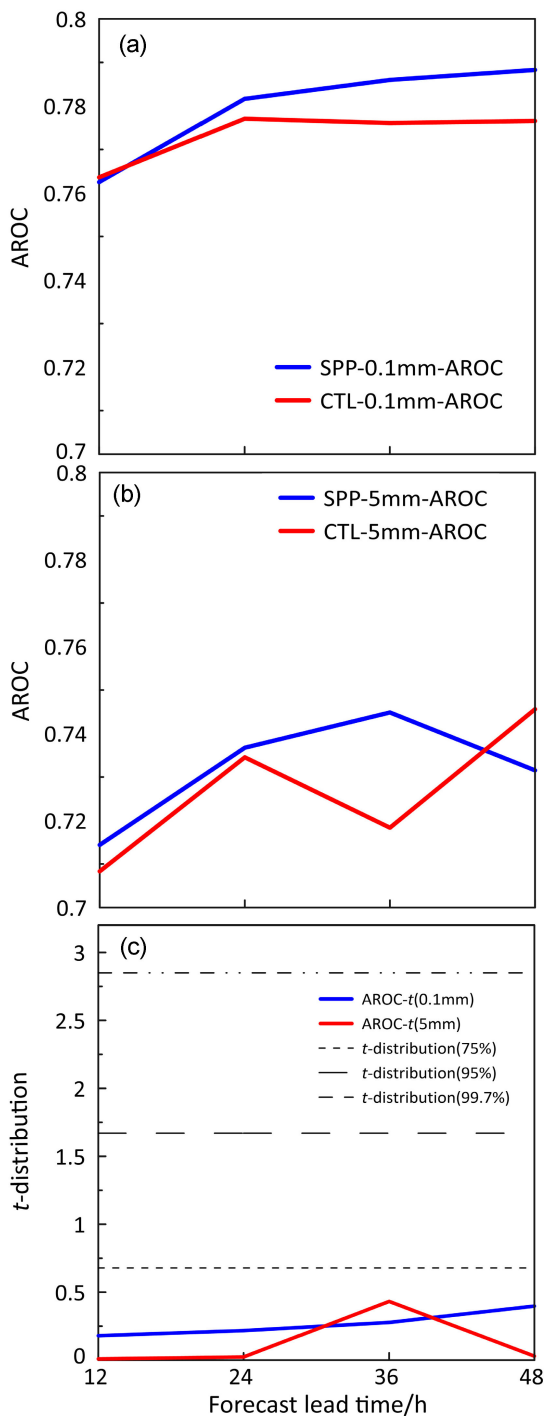


图 1 SPP 试验和控制预报试验的 12 h 累积降水 (a) 0.1 mm 和 (b) 5 mm 降水阈值 AROC 评分随预报时效的演变及 (c) 相应置信水平 t 检验在不同时刻的检验值 (三条虚线分别表示通过置信水平 75%、95% 和 99.7% 检验时的 t 阈值)

Fig. 1 Ensemble mean AROC scores of (a,b) variation of 12-h accumulated precipitation with forecast hour in the SPP scheme and control experiments with (a) 0.1-mm and (b) 5-mm precipitation threshold, and (c) t -test of significance for different values at different times. The three dashed lines in (c) indicate the t -threshold when tested for significance at 75%, 95%, and 99.7%

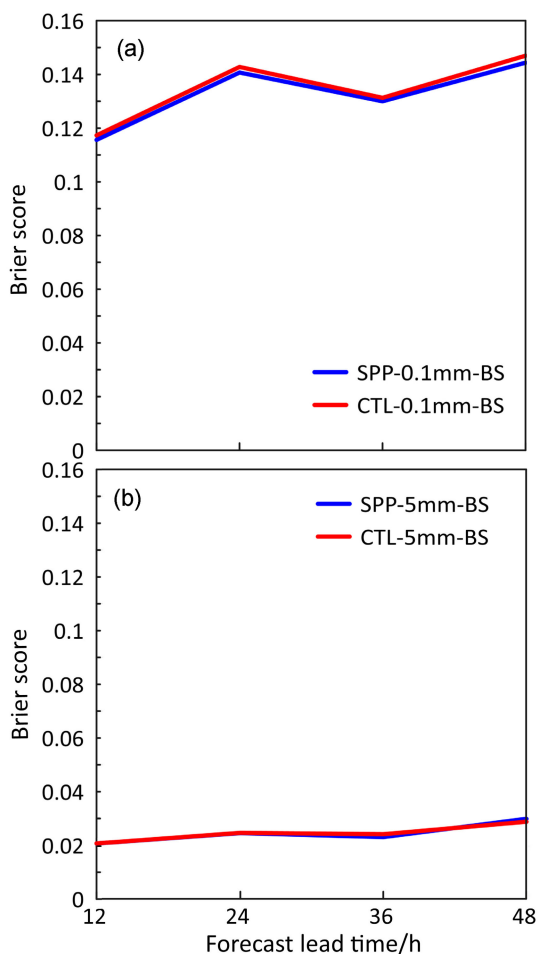


图2 SPP 试验和控制预报试验的 (a) 0.1 mm 和 (b) 5 mm 降水阈值 BS 评分随预报时效的演变

Fig. 2 Ensemble mean Brier scores of (a,b) in the SPP scheme and control experiments with (a) 0.1-mm and (b) 5-mm precipitation threshold

选取 2019 年 1 月 3 日 00:00 至 1 月 4 日 00:00 的降水个例 (图 3a), 对比分析 SPP 试验与控制试验降水预报结果。本次降水是在孟加拉湾低压槽带来的水汽与北方弱冷空气共同影响下, 给我国南方和中东部地区造成了一次大范围雨雪天气过程, 其中河南北部、山东中南部等地出现部分降雪或雨夹雪, 安徽南部、湖北东部、江西西北部、湖南中北部、贵州东南部、广西中部等地出现中雨 (大于 10 mm) 或大雨 (大于 25 mm)。图 3b, c, d 分别是控制预报 (mem00)、两组试验集成员 1 (mem01) 的 24 h 降水预报结果。与图 3a 对比可见, 三组预报基本能预报出本次降水过程的雨带, 控制试验的两组预报未报出广东和贵州的小雨, SPP 试验 (图 3d) 则预报出贵州北部有小雨, 且

湖南地区的小雨范围与实况更为接近。由此个例可见, 尽管 SPP 试验降水预报结果相较于控制试验在局部地区有改进, 但总体而言两组试验的降水预报结果相当。

综合 AROC、BS 评分以及个例分析结果可见, 应用 SPP 方法对冬季降水概率预报技巧的改进有限。究其原因, 可能是由于中国冬季降水过程主要与斜压不稳定发生发展有关, 模式降水以大尺度格点降水为主, 对流性降水较少, 而 SPP 方法是针对次网格物理过程参数化中的关键参数进行扰动, 主要代表对流性降水预报的不确定性, 故应用 SPP 方法对于冬季降水预报的效果并无明显改进。

3.2 等压面要素一致性分析

集合离散度 (ensemble spread) 可以用来衡量集合预报成员发散程度, 集合离散度越大, 代表集合预报系统的发散度越大, 越能表现出的真实大气的不确定性。集合平均均方根误差 (RMSE) 用来衡量集合预报成员与真实观测场之间的误差大小, 集合平均均方根误差越小, 代表集合预报越接近于实际大气状况。而一致性 (consistency) 则是集合离散度与集合平均均方根误差的比值, 一个理想的集合预报系统, 其一致性越接近于 1 越好, 反映系统的可靠性越高 (袁月等, 2016)。图 4 是 SPP 试验与控制试验的各个等压面要素一致性随预报时效的演变图, 图 5 是各变量一致性经过置信水平 t 检验在不同时刻的检验值。从图 4 中可以看出对于 250 hPa 等压面上的温度和经纬向风, SPP 试验的一致性与控制预报试验大致相当, 但对于 500 hPa、850 hPa 以及地面的各个等压面要素, SPP 试验的一致性在一定程度上均高于控制预报试验。从图 4a2, b2, c2 可以看到, 对于 500 hPa 的温度 t 以及经纬向风 u 、 v , SPP 试验每个时次的一致性均略优于控制预报试验, 但改进较小, 且并未通过 75% 的置信水平 t 检验 (如图 5a, b, c 所示), 这在统计学上是不显著的; 对于 850 hPa 经纬向风 (图 4b3, c3), SPP 试验每个时次的一致性均优于控制预报试验, 改进幅度中等, 且在 12 h、24 h、36 h 时次通过了 75% 的置信水平 t 检验 (如图 5b, c 所示); 对于 850 hPa 温度 (图 4a3), SPP 试验每个时次的一致性均优于控制预报试验, 改进幅度较大, 在 4 个时次均通过 75% 的置信水平 t 检验 (如图 5a 所示); 对于 10 m 纬向风 u (图 4d2), SPP 试验每个时次的一致性均优于控制预报试验,

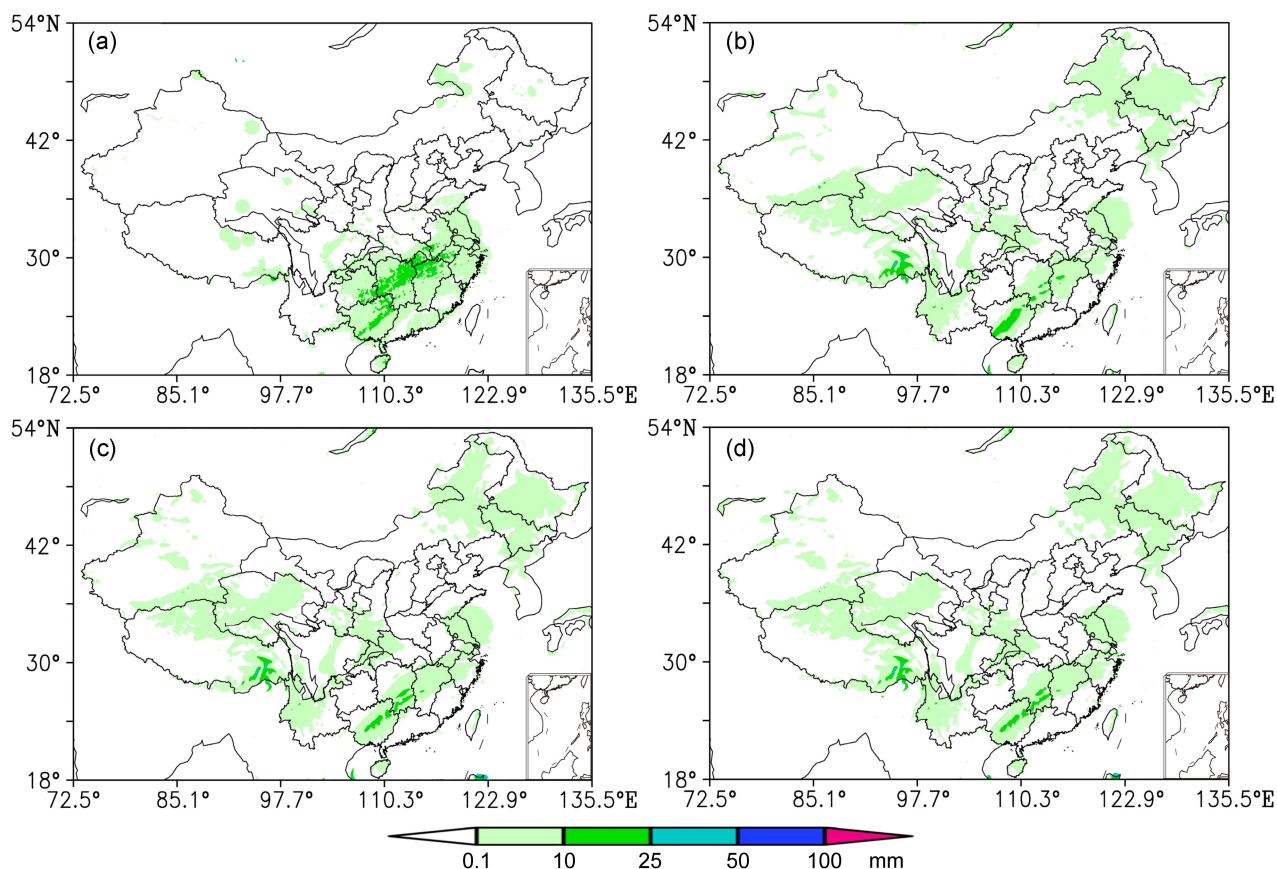


图3 2019年1月3日00:00至1月4日00:00 (a) 24 h 累积降水实况 (单位: mm) 以及 (b) 控制预报 (mem00)、(c) 控制试验和 (d) SPP 试验集成员1 (mem01) 的 24 h 预报降水量 (单位: mm)

Fig. 3 (a) Observed 24-h accumulated precipitation (units: mm), (b) control test (mem00) and member 01 (mem01) of (c) control test and (d) SPP test of accumulated forecast precipitation in 24 h (units: mm)

改进幅度中等, 在 4 个时次均通过 75% 的置信水平 t 检验 (图 5d); 对于 10 m 经向风 v (图 4d3), SPP 试验每个时次的一致性均优于控制预报试验, 改进幅度中等, 在 12 h、24 h、36 h 时次通过 75% 的置信水平 t 检验 (图 5d); 对于 2 m 温度, SPP 试验每个时次的一致性均由于控制预报试验, 改进幅度中等, 在 12 h、24 h、36 h 时次通过 95% 的置信水平 t 检验, 48 h 通过 75% 的置信水平 t 检验 (图 5d), 这在统计学上是显著的。综上所述分析, 应用 SPP 方法对于不同等压面要素的一致性的影响不完全一致, 其一致性相较于控制试验, 在高层二者相当, 在中低层有一定程度上的改进, 尤其对于地面要素来说改进较为明显。其原因可能由于 SPP 方法是对物理过程参数化方案中的参数直接扰动, 而这些相关参数往往是直接影响大气层中低层及地面, 所以等压面要素一致性的改进在中低层及地面较为明显。

3.3 outlier 评分分析

outlier 评分表示集合预报系统的离群率, 其值越小, 概率预报越准确, 系统就越可靠。图 6 为两组试验的 outlier 评分随预报时效的演变图, 图 7 为各变量 outlier 评分经过置信水平 t 检验在不同时刻的检验值。可以看出结果类似于一致性评分, 即在高层两者 outlier 评分相当, 在中低层及地面上 SPP 试验 outlier 评分均优于控制预报试验。在 500 hPa 经纬向风 u 、 v 的 outlier 演变图 (图 6b2, c2) 中可以看到, SPP 试验的 outlier 值在各个时次略优于控制预报试验, 但改进幅度微小, 且只有在 36 h 通过了 75% 的置信水平 t 检验 (图 7b, c); 对于 500 hPa 的温度 (图 6a2), SPP 试验的 outlier 值与控制预报试验大致相当; 但对于 850 hPa 的经纬向风以及温度, SPP 试验的 outlier 值在各个时次均优于控制预报试验 (图 6a3, b3, c3), 改进较为明显, 并都通过了各个时次的 75% 的置信水平 t 检

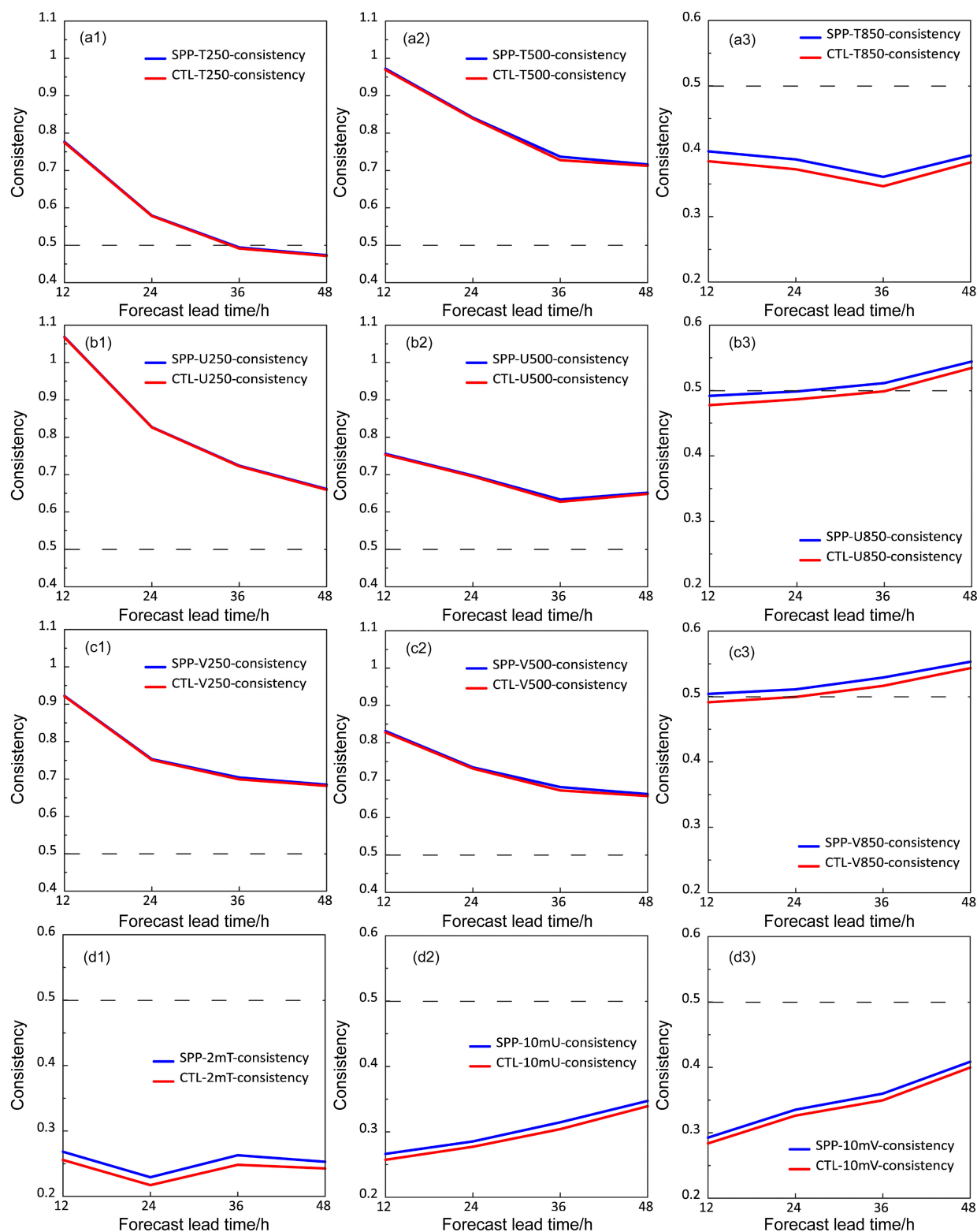


图4 SPP 试验和控制预报在 250 hPa (左列)、500 hPa (中间列)、850 hPa (右列) 等压面各变量的一致性 (集合离散度与集合平均均方根误差比值) 随预报时效的演变: (a1-a3) 不同层次的温度场; (b1-b3) 不同层次的纬向风; (c1-c3) 不同层次的经向风; (d1-d3) 地面 2 m 温度、10 m 纬向风及经向风

Fig. 4 Variation of each variable at 250 hPa (left column), 500 hPa (middle column), and 850 hPa (right column) in consistency (ratio of the spread to the RMSE) with forecast hour in the SPP scheme and control experiments: (a1-a3) Different temperature field levels, (b1-b3) different zonal wind levels, (c1-c3) different meridional wind levels, and (d1-d3) 2-m temperature, 10-m zonal wind, 10-m meridional wind

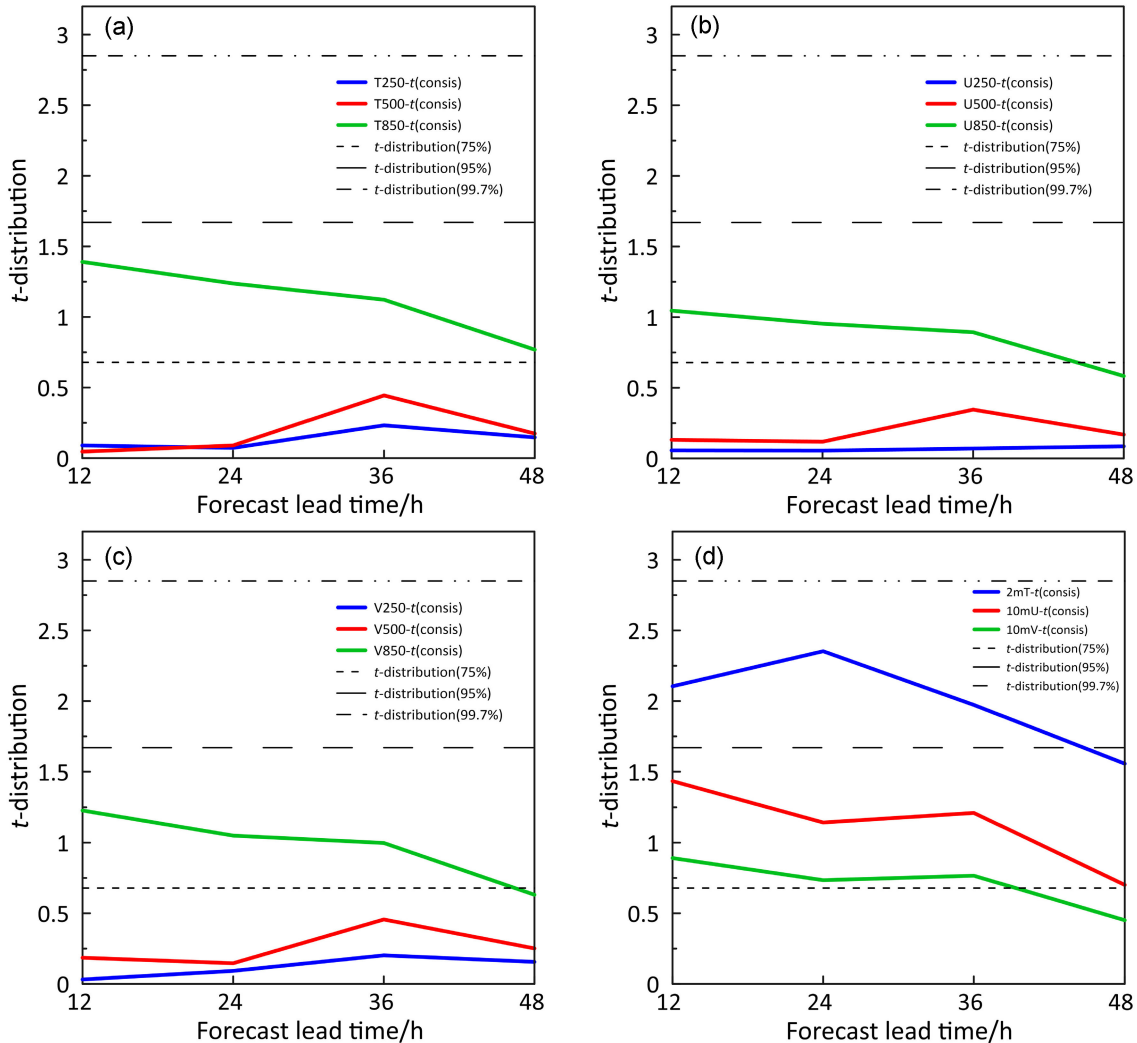


图5 各变量的一致性经过置信水平 t 检验在不同时刻的检验值: (a) 不同层次的温度场; (b) 不同层次的纬向风; (c) 不同层次的经向风; (d) 地面 2 m 温度、10 m 纬向风和经向风。图中三条虚线分别表示通过置信水平 75%、95% 和 99.7% 检验时的 t 阈值

Fig. 5 Consistency of each variable, as tested in a t -test of significance at different times: (a) Different temperature field levels, (b) different zonal wind levels, (c) different meridional wind levels, and (d) 2-m temperature, 10-m zonal wind, 10-m meridional wind. The three dashed lines indicate the t -thresholds when tested for significance at 75%, 95%, and 99.7%

验 (图 7a, b, c); 对于地面 10 m 纬向风 (图 6d2), SPP 试验结果同样优于控制预报结果, 改进幅度尚可, 在 12 h 通过了 95% 的置信水平 t 检验, 在 24 h、36 h、48 h 通过了 75% 的置信水平 t 检验 (图 7d); 对于地面 10 m 经向风 (图 6d3), SPP 试验结果优于控制预报结果, 且通过了 75% 的置信水平 t 检验 (图 7d); 而对于地面 2 m 温度 (图 6d1), SPP 试验结果均优于控制预报结果, 改进幅度较为明显, 且在 12 h、36 h、48 h 通过了 95% 的置信水平 t 检验, 在 24 h 通过了 99.7% 的置信水平 t 检验 (图 7d), 这表明两者在统计学上的差异是非常显著的。综上结果分析, 应用 SPP

方法对于 outlier 评分在高层无改进, 但在中低层及地面有一定程度上的改进。

4 总结与讨论

为了分析随机参数扰动方法对中国冬季降水集合预报的影响, 利用 GRAPES 10 km 分辨率区域集合预报系统, 选取与降水预报不确定性密切相关的积云对流、云微物理、边界层及近地面层参数化方案中的 16 个关键参数进行随机扰动, 通过 2018 年 12 月 12 日至 2019 年 1 月 12 日总计 31 天的随机扰动集合预报试验, 采用 AROC 评分、BS 评分、集合预报一致性、outlier 评分进行相关检验, 对比

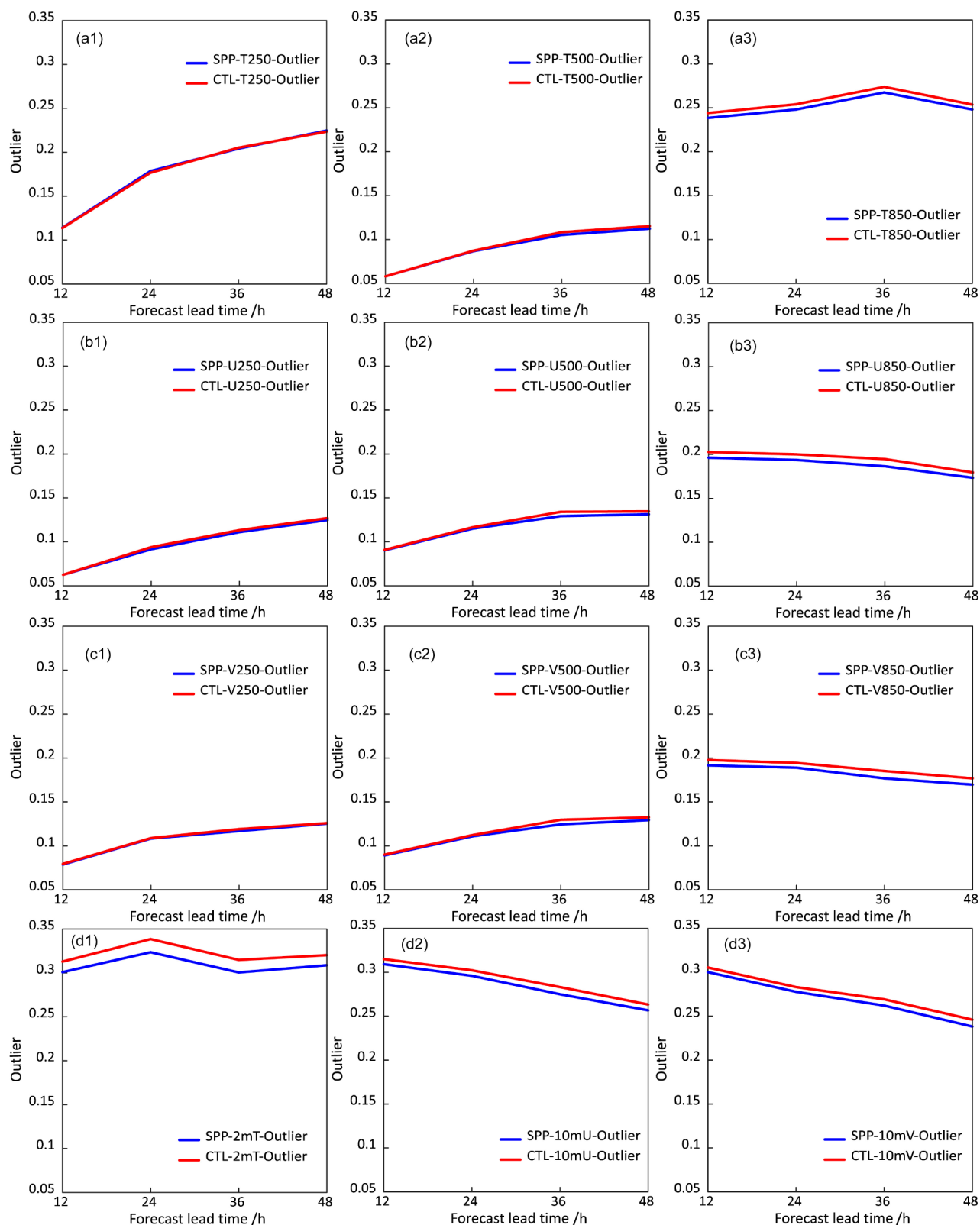


图6 同图4, 但为 outlier 评分

Fig. 6 Same as Fig. 4, but variation of outliers

分析 SPP 试验与控制预报试验的检验数据及其集合预报效果。获得如下结果和结论：

(1) 降水预报的 AROC、BS 评分以及降水个例分析表明，模式随机参数扰动方法对于中国冬季

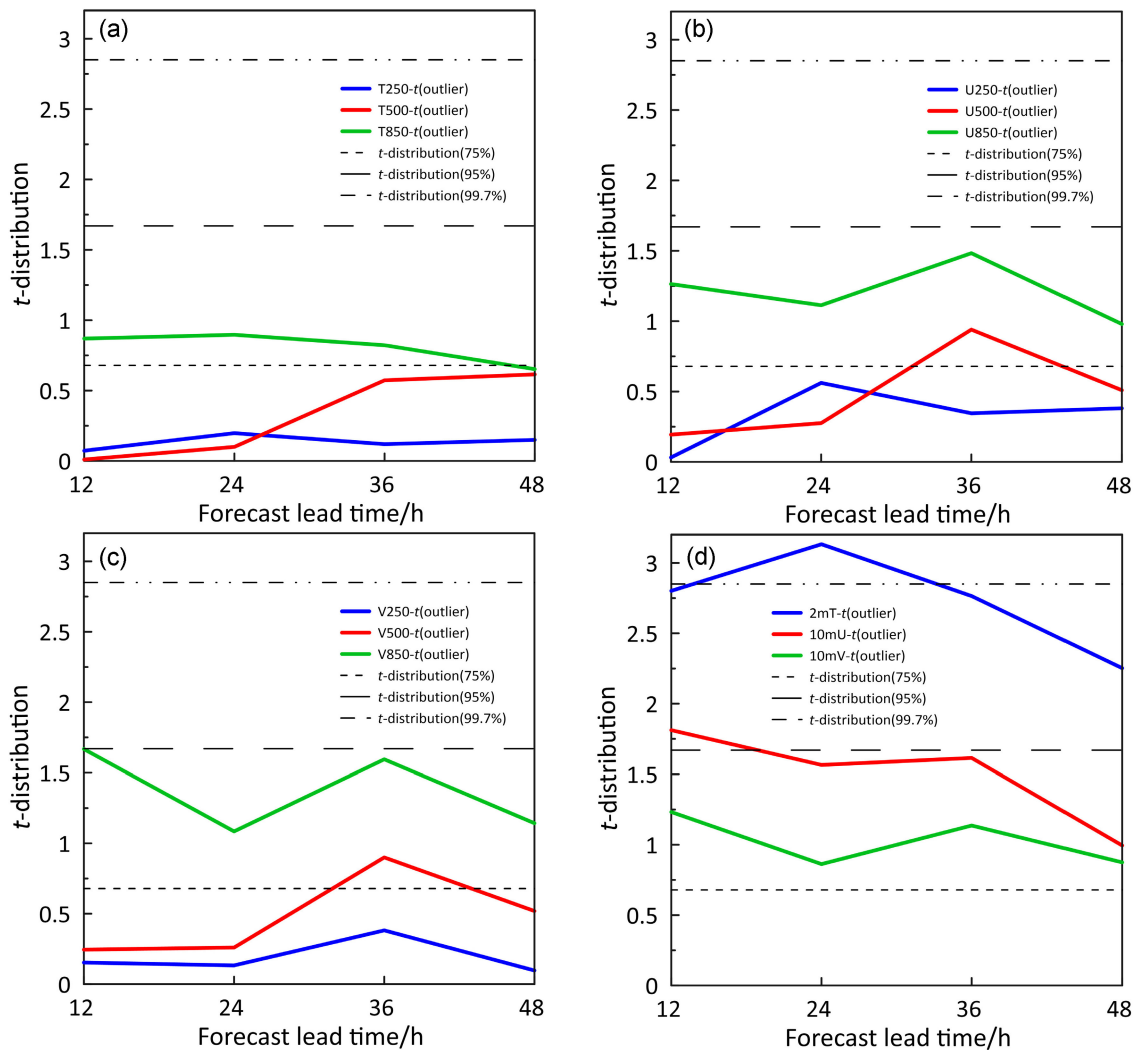


图7 同图5, 但为 outlier 评分

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for outliers of each variable

降水预报改进不显著, 究其原因, 可能是由于随机参数扰动方法主要代表对流性降水预报的不确定性, 而中国冬季降水过程主要与斜压不稳定发生发展有关, 模式降水以大尺度格点降水为主, 对流性降水较少, 故对冬季降水预报改进不明显, 这为业务集合预报模式中应用随机参数扰动方法提供了科学依据。

(2) 通过对两组试验等压面要素的检验结果分析, 可见随机参数扰动方法对冬季的天气形势预报有所改进, 尤其对于低层及近地面要素改进较为明显, 但对于中高层等压面要素来说改进相对较小。究其原因, 可能随机参数扰动方法是扰动物理过程参数化方案中的关键参数, 而参数化方案往往是直接影响低层及近地面要素、次网格降水过程等方面,

对于中高层的等压面要素影响较小, 因此对于低层及地面要素改进更为显著。

尽管本文研究结果验证了随机参数扰动方法对冬季降水可预报性改进的效果, 具有一定的指导意义, 但随着国内外随机参数扰动方法的深入研究和进展, 仍有许多问题和挑战。首先, 在本文研究中, 未考虑随机型与流场之间的相互依赖作用, 未能将随机函数与大气的实际状况相联系起来, 使之构造出与大尺度流场相关的随机型来符合冬季降水的特性, 其次, 在本文研究中, 各个扰动参数的时空尺度是相同的, 但由于各关键参数物理特性和不确定性特征不同, 需要根据针对参数的物理特性和不确定性特征单独研究其随机场时间和空间尺度, 未来需要更多的研究。

参考文献 (References)

- Baker L H, Rudd A C, Migliorini S, et al. 2014. Representation of model error in a convective-scale ensemble prediction system [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 21(1): 19–39. doi:10.5194/npg-21-19-2014
- Beljaars A C M. 2010. The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121(522): 255–270. doi:10.1002/qj.49712152203
- Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. 2009. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66(3): 603–626. doi:10.1175/2008JAS2677.1
- Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, et al. 2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134(632): 703–722. doi:10.1002/qj.234
- Buizza R, Milleer M, Palmer T N. 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125(560): 2887–2908. doi:10.1002/qj.49712556006
- 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2003b. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验 [J]. *气象学报*, 61(4): 432–446. Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003b. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of south China heavy rain and the ensemble simulations [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61(4): 432–446. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.04.005
- Christensen H M, Moroz I M, Palmer T N. 2015. Simulating weather regimes: Impact of stochastic and perturbed parameter schemes in a simple atmospheric model [J]. *Climate Dyn.*, 44(7–8): 2195–2214. doi:10.1007/s00382-014-2239-9
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *Int. J. Climatol.*, 28(9): 1139–1161. doi:10.1002/joc.1615
- 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 2013. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社, 576pp. Ding Yihui, Wang Shaowu, Zheng Jingyun, et al. 2013. *Climate In China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 576pp.
- Du J. 2007. Uncertainty and ensemble forecast [M]. *Science and Technology Infusion Climate Bulletin* (2007), 1–42pp.
- 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 Jun, Chen Jing. 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-Ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36(11): 1–11. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.11.001
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46(20): 3077–3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. *大气科学*, 35(4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(4): 589–606. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124(10): 2322. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322.0.CO;2
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2): 129–151.
- Jankov I, Berner J, Beck J, et al. 2017. A performance comparison between multiphysics and stochastic approaches within a North American RAP ensemble [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(4): 1161–1179. doi:10.1175/MWR-D-16-0160.1
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1): 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:tkcpau62>2.0.co;2
- Leith C E. 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 102(6): 409–418. doi:10.1175/1520-0493(1974)102<0409:TSOMCF>2.0.CO;2
- Leutbecher M, Lock S J, Ollinaho P, et al. 2017. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: State of the art and future vision [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 143(707): 2315–2339. doi:10.1002/qj.3094
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13(2): 113–122. Li Congyin, Yang Hui, Gu Wwi. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(2): 113–122. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.01
- Li X L, Charron M, Spacek L, et al. 2008. A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(2): 443–462. doi:10.1175/2007MWR2109.1
- Lin W B, Neelin J D. 2000. Influence of a stochastic moist convective parameterization on tropical climate variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 27(22): 3691–3694. doi:10.1029/2000gl011964
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20(2): 130–141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- 马旭林, 计燕霞, 周勃阳, 等. 2018. GRAPES 区域集合预报尺度混合初始扰动构造的新方案 [J]. *大气科学学报*, 41(02): 106–115. Ma Xulin, Ji Yanxia, Zhou Boyang, et al. 2018. A new scheme of blending initial perturbation of the GRAPES regional ensemble prediction system [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(02): 106–115. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160104001
- Ollinaho P, Lock S J, Leutbecher M, et al. 2017. Towards process-level representation of model uncertainties: Stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 143(702): 408–422. doi:10.1002/qj.2931

- Palmer T N, Buizza R, Doblas-Reyes F, et al. 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty [R]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Tech. Rep. No.598, 42pp.
- Roebber, P J, Schultz D M, Colle B A, et al. 2004. Toward improved prediction: High-Resolution and ensemble modeling systems in operations [J]. *Wea. Forecasting*, 19(5): 936–949. doi:10.1175/1520-0434(2004)019<0936:TIPHAE>2.0.CO;2
- 彭京备. 2012. 东印度洋海温对中国南方冬季降水的影响 [J]. *气候与环境研究*, 17(3): 327–338. Peng Jingbei. 2012. Influence of the sea surface temperature in the eastern Indian Ocean on the wintertime rainfall in the southern part of China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(3): 327–338. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10139
- Shutts G. 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(612): 3079–3102. doi:10.1256/qj.04.106
- 索渺清, 丁一汇. 2009. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究 [J]. *大气科学*, 33(3): 425–442. Suo Miaqing, Ding Yihui. 2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(3): 425–442. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.03
- 王咏薇. 2004. CAPE 等环境参数在强对流风暴分析中的应用研究 [D]. 南京气象学院硕士学位论文. Wang Yongwei. 2004. Research of Environment parameter: CAPE etc, the function in analysis of severe convective storms [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology.
- 王莉莉, 陈德辉. 2013. GRAPES Noah-LSM 陆面模式水文过程的改进及试验研究 [J]. *大气科学*, 37(006): 1179–1186. Wang Lili, Chen Dehui. 2013. Improvement and experiment of hydrological process on GRAPES Noah-LSM land surface model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(006): 1179–1186. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.1210
- 徐致真, 陈静, 王勇, 等. 2019. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性试验 [J]. *气象学报*, 77(5): 849–868. Xu Zzhizhen, Chen Jing, Wang Yong, et al. 2019. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77(5): 849–868. doi:10.11676/qxxb2019.039
- 宇婧婧, 沈艳, 潘旻, 等. 2015. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估 [J]. *气象学报*, 73(2): 394–410. Yu Jingjing, Shen Yan, Pan Yang, et al. 2015. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73(2): 394–410. doi:10.11676/qxxb2015.033
- 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 Yue, Li Xiaoli, Chen Jing, et al. 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(10): 1161–1175. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.001
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究 [J]. *气象*, 40(9): 1076–1087. Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40(9): 1076–1087. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.005
- 朱乾根. 1990. 我国的东亚冬季风研究 [J]. *气象*, 16(1): 3–10. Zhu Q G. 1990. A review of studies on East Asia winter monsoon in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 16(1): 3–10. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1990.1.001