

熊洁,李俊,陈法敬,等,2025. CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 集合预报系统对 2023 年中国汛期降水预报的对比评估[J]. 气象, 51(9):1046-1060. Xiong J, Li J, Chen F J, et al, 2025. Comparative evaluation of CMA-CPEPS and CMA-REPS for precipitation forecasts over China during the 2023 flood season[J]. Meteor Mon, 51(9):1046-1060(in Chinese).

CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 集合预报系统对 2023 年中国汛期降水预报的对比评估^{*}

熊 洁^{1,2} 李 俊^{1,2} 陈法敬³ 李红祺³ 王明欢^{1,2} 康兆萍^{1,2}

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430205

2 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

提 要: 基于 CMA 对流尺度集合预报系统(CMA-CPEPS)和区域集合预报系统(CMA-REPS)对 2023 年中国汛期(6 月 15 日至 8 月 28 日)降水预报性能进行评估,并检验“23·7”华北特大暴雨过程的预报,得到如下主要结论:CMA-REPS 存在降水预报系统性偏强的问题,CMA-CPEPS 显著改善了这一问题;相比于 CMA-REPS,CMA-CPEPS 对晴雨的预报及其随时间变化的预报能力明显更优,且对降水的概率预报和分辨能力更好;CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 离散度均偏小,两套系统离散度与均方根误差的比值及空间相关系数均相当;对于“23·7”华北特大暴雨过程的预报,CMA-CPEPS 比 CMA-REPS 展现出更强的时空分布细节捕捉能力,且 CMA-CPEPS 在降水强度、降水强度随时间演变趋势以及强降水的时空分辨能力方面均更出色,尤其在短历时强降水的预报上具有明显优势。总体来说,CMA-CPEPS 对 2023 年中国汛期降水的预报能力在 CMA-REPS 基础上提升明显。

关键词: CMA 对流尺度集合预报系统(CMA-CPEPS),CMA 区域集合预报系统(CMA-REPS),“23·7”华北特大暴雨,FSS 评分
中图分类号: P456 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.041802

Comparative Evaluation of CMA-CPEPS and CMA-REPS for Precipitation Forecasts over China During the 2023 Flood Season

XIONG Jie^{1,2} LI Jun^{1,2} CHEN Fajing³ LI Hongqi³ WANG Minghuan^{1,2} KANG Zhaoping^{1,2}

1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan 430205

3 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the China Meteorological Administration (CMA) Convection-Permitting Ensemble Prediction System (CMA-CPEPS) and Regional Ensemble Prediction System (CMA-REPS), the precipitation forecast performance during the 2023 flood season (from 15 June to 28 August) in China, and a case analysis of the July 2023 extremely severe torrential rain in North China are objectively evaluated. The results indicate that CMA-REPS has the problem of systematically overestimating precipitation, but CMA-CPEPS can significantly overcome this problem. Relative to CMA-REPS, CMA-CPEPS shows the obvious superiority in prediction capacity for clear and rainy weather changes and its temporal changes, with a better

^{*} 数值预报国省统筹研发任务(TCYF2025GS024)、湖北省气象局科技发展基金面上项目(2022Y24)和中国气象局武汉暴雨研究所基本科研业务专项(202208)共同资助

2024 年 9 月 18 日收稿; 2025 年 4 月 18 日收修定稿

第一作者:熊洁,主要从事大气物理和数值预报研究. E-mail: xiongjie8707@sina.com

通讯作者:李俊,主要从事区域数值模式和集合预报技术研究. E-mail: lijun@whihr.com.cn

probability forecasting and resolution ability for precipitation. Both CMA-CPEPS and CMA-REPS exhibit low spread values, while the spread/RMSE (root mean square error) value and the spatial correlation between spread and RMSE of CMA-CPEPS and CMA-REPS are equivalent. In the July 2023 extremely severe torrential rain in North China, CMA-CPEPS has a better ability to capture precipitation details compared to CMA-REPS. CMA-CPEPS outperforms CMA-REPS in forecasting precipitation intensity, evolution trend of precipitation intensity, and spatio-temporal resolution of heavy precipitation, especially in short-duration heavy precipitation events. Overall, CMA-CPEPS has a significantly enhancement over CMA-REPS in precipitation forecasting for the 2023 flood season in China.

Key words: CMA-CPEPS, CMA-REPS, the July 2023 extremely severe torrential rain in North China, FSS score

引 言

降水数值预报存在较大的不确定性,发展集合预报技术是解决这种不确定性的重要手段(杜钧和陈静,2010;Zhang X B et al,2015;邓国等,2022)。中国气象局(CMA)自主研发了新一代数值天气预报模式,并逐步发展了集合预报技术。CMA 的集合预报技术始于区域集合预报系统(CMA-REPS),其初始分辨率为 15 km(陈静和李晓莉,2020)。在初值扰动技术方面,CMA-REPS 从增长模繁殖法(谭燕和陈德辉,2007)逐步发展到集合卡尔曼变换(田伟红和庄世宇,2008)、多尺度混合扰动(Zhang H B et al,2015)和奇异向量(刘永柱等,2011)等方法。目前,CMA-REPS 的分辨率已提升至 10 km,并采用集合卡尔曼变换初值扰动技术。随着 CMA-REPS 的不断发展,CMA 全球集合预报系统(CMA-GEPS)应运而生,其分辨率为 50 km。CMA-GEPS 的初值扰动方法也经历了从集合变换卡尔曼滤波(马旭林等,2008)、奇异向量扰动(刘永柱等,2013;李晓莉和刘永柱,2019)到多尺度奇异向量扰动方法(Liu et al,2024)的演变。CMA-REPS 和 CMA-GEPS 两套系统在代表模式不确定性方面,开展了多种模式扰动方法的探索,包括多物理过程组合(邓国等,2010)、随机物理过程倾向扰动(袁月等,2016)、随机动能后向散射(彭飞等,2019)和随机参数扰动(徐致真等,2019)等。我国集合预报技术的持续发展,为数值预报的不确定性提供了更科学的量化和表征手段,进而显著提高了天气预报的可靠性和准确性。

检验评估数值模式的降水预报是评价模式预报水平和发展数值预报系统的重要环节(Murphy and

Winkler,1987;Casati et al,2008)。在对不同尺度集合预报系统进行评估时,发现全球集合预报系统对降水强度的预报普遍偏弱,并且对中尺度对流系统的发展演变描述能力不足(Yu and Meng,2016;王毅等,2020)。相比之下,中尺度集合预报方法能够有效表征强降水预报的不确定性,但目前对影响降水预报不确定性的物理机制分析仍然较少(王婧卓等,2021)。此外,对流可分辨集合预报显著提升了区域降水强度和强降水落区的识别能力,并能更准确地提供降水的日变化和对流系统发生发展的相关信息(王璐和沈学顺,2019)。利用合理的检验方案能够提供可靠的检验结果,这不仅有助于模式设计者有效判断模式的物理参数化方案等的合理性,还能帮助模式使用者更好地了解模式的预报性能(潘留杰等,2013;2014)。因此,针对 CMA 集合预报系统开展降水预报性能的评估,是一项需要持续更新且意义重大的工作。

受全球变暖影响,我国降水极端性在增加(高荣等,2018),不仅极端强降水量在总降水量中的比重增大,且极端强降水的降水强度也在增强(翟盘茂和潘晓华,2003;罗玉等,2015;Tu et al,2011)。2023 年全国日降水量极端事件和连续降水日数极端事件均较常年偏多(竺夏英等,2024),汛期京津冀地区降水的极端性尤为突出。7 月 29 日至 8 月 1 日,北京西南部、河北中部和西南部等地区累计降水量达 350~600 mm,局地达 700~800 mm,最大累计降水量为 1003 mm,100 mm 以上的降水面积为 17 万 km²,堪称历史罕见特大暴雨过程(罗琪和符娇兰,2023;杨晓亮等,2024)。同年,为满足杭州亚运会对气象保障高时空分辨率的要求,中国气象局地球系统数值预报中心搭建了 3 km 对流尺度集合预报系统(CMA-CPEPS),并投入业务化运行。本研究针

对 CMA-REPS 和 CMA-CPEPS 两套集合预报系统,开展 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日夏季汛期降水预报结果的统计检验和个例分析,从集合平均、离散度技巧关系、概率预报技巧等方面对两套系统的降水预报性能进行对比评估,旨在全面掌握国家级集合预报业务系统的特点,并为升级和持续改进对流尺度集合预报系统提供客观依据。

1 集合预报系统和检验方法

1.1 CMA 集合预报系统

表 1 给出了本研究中 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 的参数配置。CMA-CPEPS 控制预报模式采用 CMA 业务中尺度模式(CMA-MESO)5.1 版,水平分辨率为 $0.03^\circ(3\text{ km})$,垂直分辨率为 51 层。

CMA-REPS 控制预报模式采用 CMA-MESO 4.3 版,水平分辨率为 $0.1^\circ(10\text{ km})$,垂直分辨率为 50 层。CMA-CPEPS 初值扰动采用观测资料扰动结合多尺度奇异向量(multi-scale SVs)方法,并运用三维变分(3DVar)、融合和云分析同化技术;CMA-REPS 初值扰动采用集合卡尔曼变换(ETKF)方法,结合云分析同化技术;两套系统控制预报初值和侧边界来源于美国国家环境预报中心全球预报系统(NCEP-GFS),模式扰动采用随机物理倾向扰动(SPPT)方案,侧边界扰动为 CMA 全球集合预报系统(GEPS)扰动成员相对于自身控制预报的扰动侧边界(GEPS Perts)叠加到 NCEP-GFS 背景场(NCEP-GFS background)(表 1)。CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 集合成员均由 1 个控制试验(control)和 14 个集合试验(ensemble)组成,预报区域列于表 1,每天 00 时、12 时(世界时,下同)各起报一次,

表 1 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 参数对比

Table 1 Comparison of system configurations of CMA-CPEPS and CMA-REPS

参数	CMA-CPEPS	CMA-REPS
控制预报模式	CMA-MESO 5.1	CMA-MESO 4.3
水平分辨率/垂直层次	$0.03^\circ(3\text{ km})/51$ 层	$0.1^\circ(10\text{ km})/50$ 层
预报区域	$19.51^\circ\sim 43.45^\circ\text{N}, 106.12^\circ\sim 129.88^\circ\text{E}$	$15^\circ\sim 65^\circ\text{N}, 70^\circ\sim 140^\circ\text{E}$
水平格点数	793×799	751×501
控制预报初值	NCEP-GFS	NCEP-GFS
同化方案	3DVar, 云分析, 融合	云分析
初始扰动	观测资料扰动+multi-scale SVs	ETKF
模式扰动	SPPT	SPPT
侧边界扰动	NCEP-GFS background+GEPs Perts	NCEP-GFS background+GEPs Perts
集合成员	1 control+14 ensemble	1 control+14 ensemble
预报时效	84 h (00 时、12 时起报)	84 h (00 时、12 时起报)

预报时效为 84 h。

1.2 集合预报检验方法

为了评估两套集合预报系统在 2023 年中国汛期降水预报中的表现,采用多种统计检验方法,包括确定性预报检验(如预报偏差 Bias、公平技巧评分 ETS)和概率预报检验(如 Brier 评分和 AROC 评分)等方法(王婧卓等, 2021)。AROC 方法即相对作用特征(ROC)评分曲线与坐标轴形成的面积,其值越接近 1 越好。统计检验区域为 CMA-CPEPS 模拟区域,具体范围为 $19.51^\circ\sim 43.45^\circ\text{N}, 106.12^\circ\sim 129.88^\circ\text{E}$ (图 1),检验时间段为 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日,涵盖主汛期。为确保评分的一致性,将不同预报系统的降水预报结果插值到气象站点(图 1 红色圆点),并基于这些站点的降水量进行 Bias、ETS、Brier 评分、AROC 评分,所用站点资料

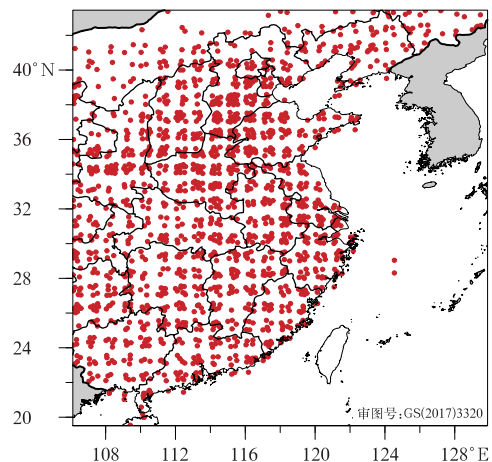


图 1 CMA-CPEPS 模拟区域和国家级气象观测站(红色圆点)分布

Fig. 1 Domain of CMA-CPEPS and distribution of national meteorological stations (red dot)

为小时降水资料,3 h 和 24 h 累计降水量分别由小时降水量累加得到。针对不同降水等级,设定 5 个检验阈值进行检验,具体如下:对于 3 h 累计降水量,阈值分别为 0.1 mm(小雨)、3 mm(中雨)、10 mm(大雨)、20 mm(暴雨)、50 mm(大暴雨);对于 24 h 累计降水量,阈值分别为 0.1 mm(小雨)、10 mm(中雨)、25 mm(大雨)、50 mm(暴雨)、100 mm(大暴雨)。

本文个例检验选取 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日发生在华北地区的特大暴雨过程(简称“23·7”过程)。鉴于两组集合预报产品分别源于不同的预报系统,并且具有不同的分辨率,为避免分辨率差异对概率预报技巧产生的潜在负面影响,本文在个例检验中引入了邻域空间检验 FSS 评分方法(赵滨和张

博,2018;Roberts and Lean,2008;李俊等,2020)。通过 FSS 评分评估两组产品在不同空间尺度上对此次罕见特大暴雨过程的概率预报能力。考虑到不同分辨率检验场对 FSS 评分结果影响较小(刘志丽等,2022),为确保评分的准确性,本研究将实况站点降水资料和两套系统的降水预报结果均插值到 5 km 分辨率网格上进行 FSS 评分计算。

2 统计分析结果

2.1 确定性降水检验

图 2 为 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时起

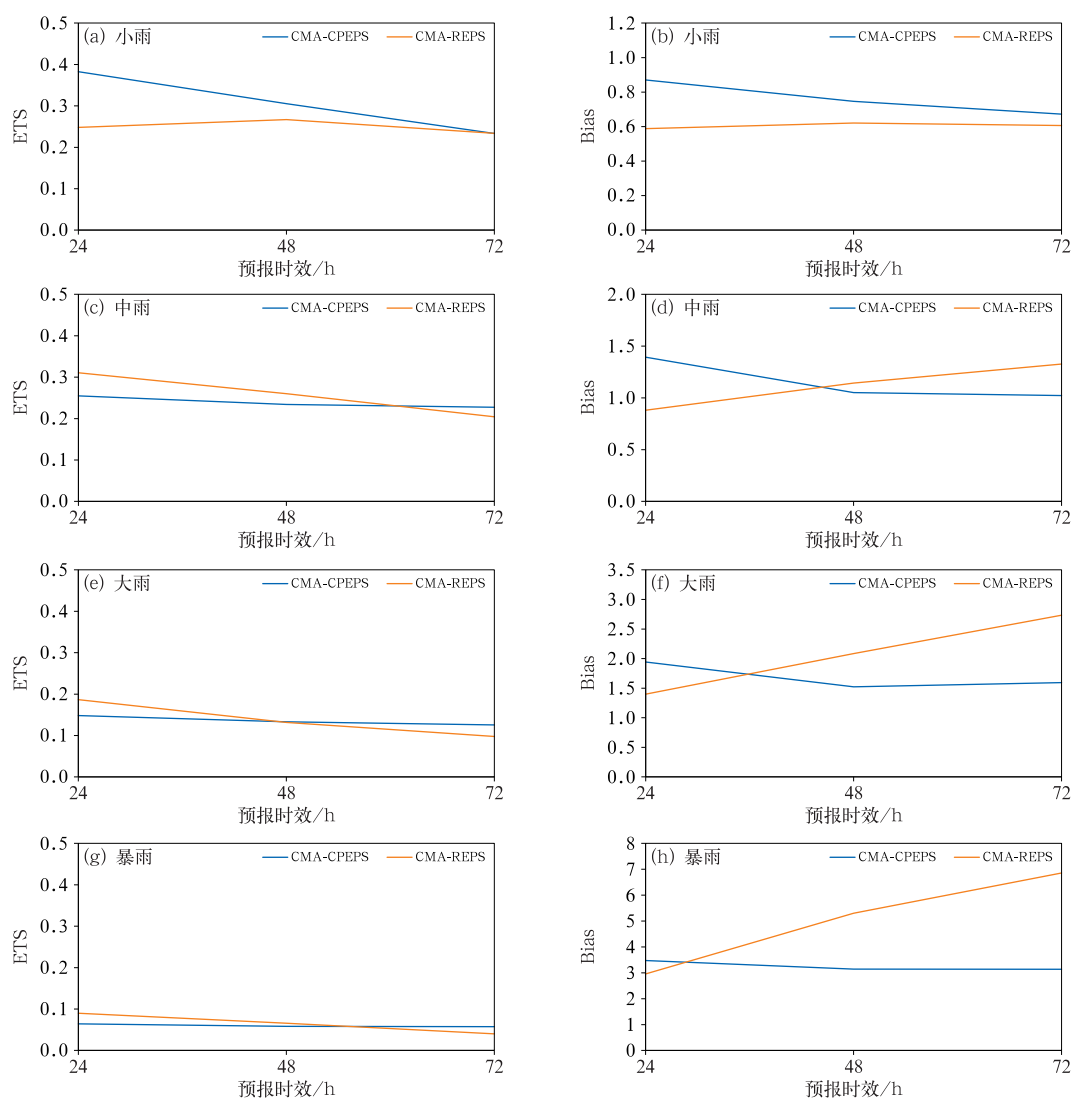


图 2 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的(a,c,e,g)ETS 和(b,d,f,h)Bias 评分

Fig. 2 (a, c, e, g) ETS and (b, d, f, h) Bias of 24 h ensemble average precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initiated at 00:00 UTC within 72 h lead time from 15 June to 28 August 2023

报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水(算术平均,下同)的 ETS 和 Bias 评分结果。对于小雨量级,所有预报时效 CMA-CPEPS 的 ETS 评分优于 CMA-REPS,且 Bias 评分更接近 1,表明 CMA-CPEPS 对晴雨的预报表现更优;对于中雨、大雨和暴雨量级,24 h 预报时效 CMA-CPEPS 的 ETS 评分略低于 CMA-REPS,结合 Bias 评分可知,这是由于 24 h 预报时效 CMA-CPEPS 在中雨、大雨和暴雨量级的预报中湿偏差略大所致。对于 48 h 预报时效,CMA-REPS 与 CMA-CPEPS 的 ETS 评分相当。而在 72 h 预报时效,与 CMA-REPS 相比,CMA-CPEPS 在 ETS 评分上略占优势、Bias 评分明显更优,整体预报效果更佳。从图 2d、2f、2h 可以看

出,CMA-REPS 在中到暴雨量级的湿偏差随预报时效增加而增大,而 CMA-CPEPS 的湿偏差则呈现减小或持平的趋势,这表明 CMA-REPS 存在降水系统性偏强的问题,而 CMA-CPEPS 有效校正了 CMA-REPS 的系统性偏差。CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的 ETS 和 Bias 评分(图略)与 00 时起报结果一致,验证了两套系统的稳定性。综上所述,CMA-CPEPS 在晴雨随时间变化的预报能力及对 72 h 的降水预报表现更优,同时有效改善了 CMA-REPS 的系统性偏强问题。

图 3 为 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 集合平均降水的 ETS

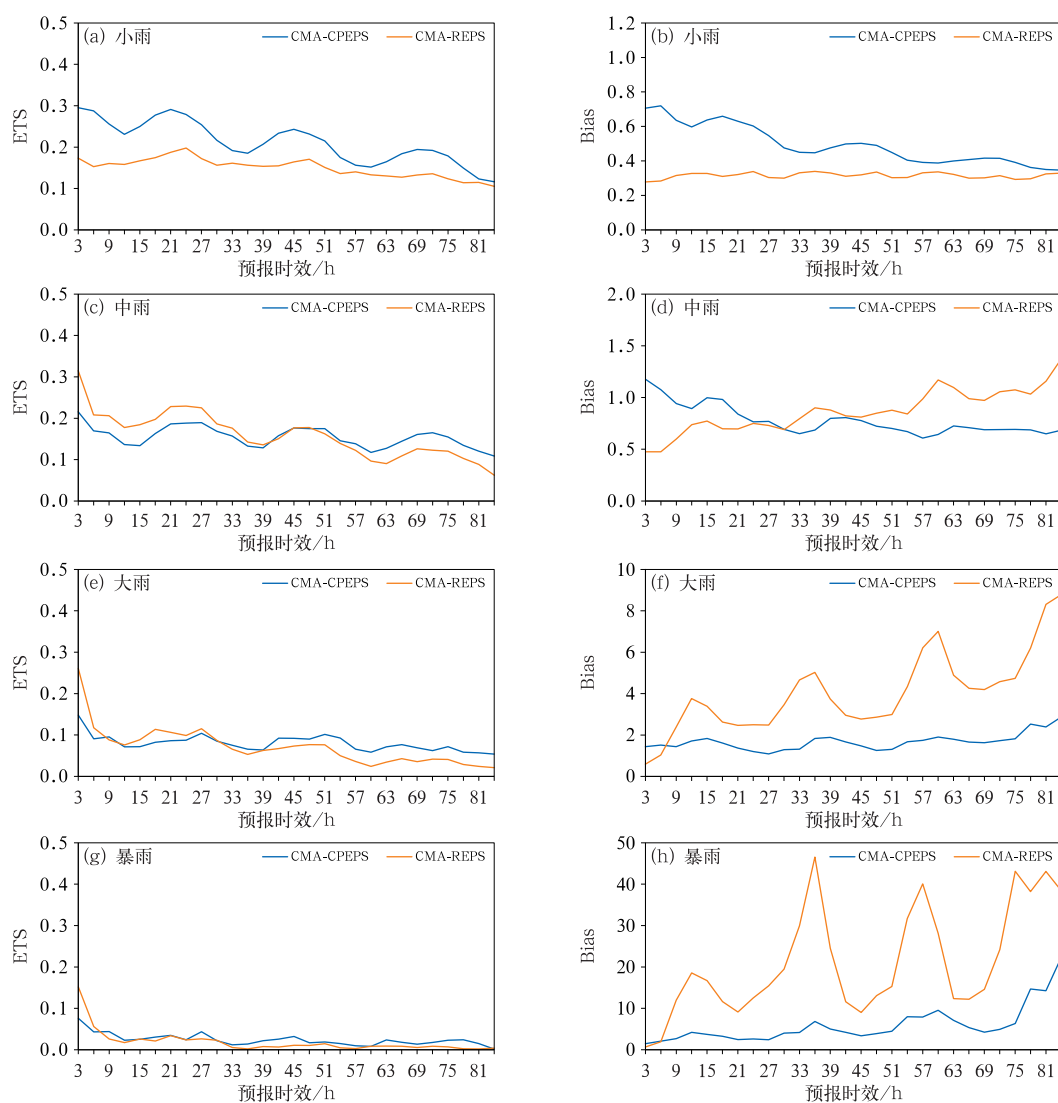


图 3 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 集合平均降水的 (a, c, e, g) ETS 和 (b, d, f, h) Bias 评分

Fig. 3 (a, c, e, g) ETS and (b, d, f, h) Bias of 3 h ensemble average precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initiated at 00:00 UTC within 84 h lead time from 15 June to 28 August 2023

和 Bias 评分结果。对于小雨量级,CMA-CPEPS 的 ETS 评分优于 CMA-REPS,随着预报时效的增加,CMA-CPEPS 的 ETS 评分波动性减小,而 CMA-REPS 的 ETS 评分变化平缓。中雨量级 0~42 h 预报时段和大雨量级 0~30 h 预报时段,CMA-REPS 的 ETS 评分略优于 CMA-CPEPS;但在其他预报时段,CMA-CPEPS 的 ETS 评分表现更优。对于暴雨量级,CMA-REPS 和 CMA-CPEPS 的 ETS 评分相当。结合 Bias 评分,对于小雨、大雨和暴雨量级,CMA-CPEPS 的 Bias 评分更接近 1,表明其预报偏差更小;中雨量级 0~30 h 预报时段,CMA-CPEPS 的 Bias 评分优于 CMA-REPS,但其他时段 CMA-REPS 的 Bias 评分表现更优。总体而言,CMA-CPEPS 的 Bias 评分变化平稳且更多时段接近 1,说明 CMA-CPEPS 降水预报的偏差校正效果更优。CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 12 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 集合平均降水量的 ETS 和 Bias 评分(图略)与 00 时起报结果一致,进一步验证了两

套系统的稳定性。综上所述,CMA-CPEPS 在小雨、大雨和暴雨量级的 ETS 和 Bias 评分上表现更优,且整体偏差校正效果更佳。

2.2 离散度-误差关系

对于一个理想的集合预报系统,其离散度与误差应呈现正比例关系(杜钧和周斌斌,2016)。为检验 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 的离散度-误差关系,本文计算了各成员降水预报离散度、集合平均预报与实况的均方根误差(RMSE),并比较两套系统区域平均的逐日变化。但区域平均可能会掩盖空间对应关系,因此进一步统计了降水预报离散度和 RMSE 的空间相关系数。表 2 列出了 00 时、12 时起报的逐 24 h 降水的平均离散度、RMSE 以及两者的比值。结果显示,CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 的离散度均低于 RMSE,表明两套系统的离散度均偏小;此外,两套系统的离散度与 RMSE 比值以及空间相关系数均相当。

表 2 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时、12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 降水平均的离散度、RMSE、离散度与 RMSE 比值和两者的空间相关系数

Table 2 Mean spread, RMSE, spread/RMSE and the spatial correlation coefficient between spread and RMSE of 24 h precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initiated at 00:00 UTC and 12:00 UTC within 72 h lead time from 15 June to 28 August 2023

起报时刻(UTC)	预报时效/h	预报模式	平均离散度/mm	平均 RMSE/mm	平均离散度/RMSE	平均空间相关系数
00 时	0~24	CMA-CPEPS	0.30	3.18	0.02	0.11
		CMA-REPS	0.29	2.93	0.01	0.08
	24~48	CMA-CPEPS	0.48	3.28	0.02	0.09
		CMA-REPS	0.39	3.44	0.02	0.09
	48~72	CMA-CPEPS	0.60	3.55	0.03	0.09
		CMA-REPS	0.45	4.04	0.02	0.10
12 时	0~24	CMA-CPEPS	0.30	2.94	0.02	0.11
		CMA-REPS	0.31	3.25	0.01	0.09
	24~48	CMA-CPEPS	0.47	3.41	0.02	0.09
		CMA-REPS	0.40	3.42	0.02	0.09
	48~72	CMA-CPEPS	0.57	3.73	0.03	0.10
		CMA-REPS	0.48	4.14	0.02	0.09

图 4 为 00 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 集合平均降水的 RMSE、离散度、离散度与 RMSE 比值和空间相关系数的区域平均值随时间的演变。结果表明,两套系统在预报时段的离散度和 RMSE 演变趋势具有很好的对应关系,且离散度均低于 RMSE,进一步证明了两套系统的离散度偏小。具体来看,CMA-CPEPS 的 RMSE 略大于 CMA-REPS;对比两套系统控制预报(图 4a 中虚线)逐 3 h 降水的 RMSE,对于控制预报 CMA-CPEPS 的

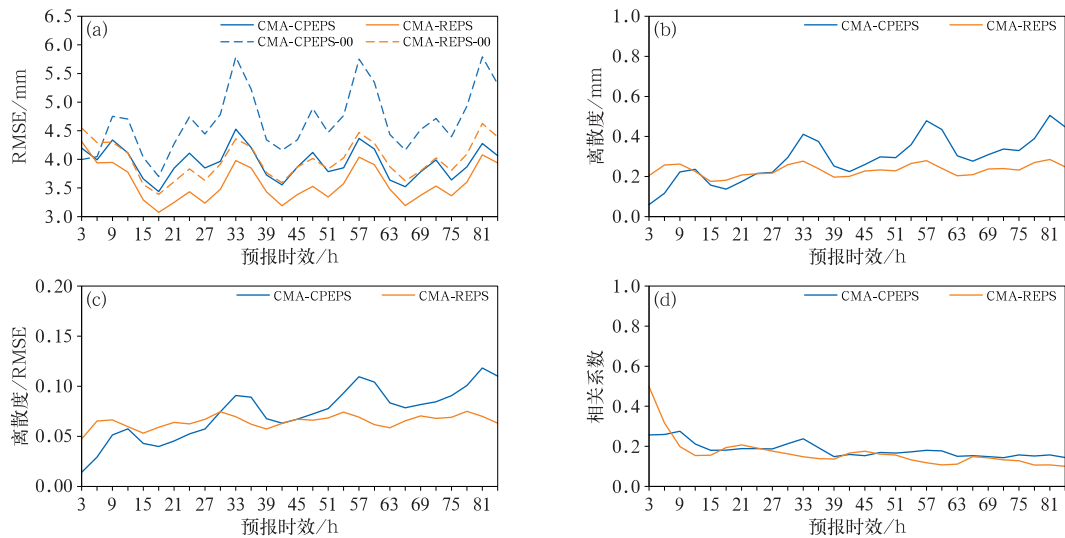
RMSE 同样大于 CMA-REPS。这可能是由于高分辨率模式在降水的时间分布上表现更为细致,导致降水随时间的波动更大,而低分辨率模式的降水随时间的变化则相对平滑,这种现象与降水空间分布中的“双向惩罚”类似,即高分辨率模式在捕捉降水细节时,可能会因过于敏感而放大误差。因此,CMA-CPEPS 的逐 3 h 降水 RMSE 大于 CMA-REPS,表明高分辨率模式在时间分布上的细致性可能引入了更大的随机误差,而低分辨率模式则通过

平滑变化减少了这种误差。在离散度方面,CMA-CPEPS 在 27~84 h 预报时效内的离散度大于 CMA-REPS,且其离散度随预报时效的增长呈增大趋势,而 CMA-REPS 离散度没有明显的变化趋势。总体而言,CMA-CPEPS 的离散度优于 CMA-REPS。在离散度与 RMSE 比值方面,0~27 h 预报时效内 CMA-REPS 高于 CMA-CPEPS,而在 27~84 h(尤其是 42 h 之后)预报时效内 CMA-CPEPS 高于 CMA-REPS。两者离散度与 RMSE 空间相关系数相当。综上可得,CMA-CPEPS、CMA-REPS

离散度均偏小,CMA-CPEPS 离散度略优于 CMA-REPS,但 CMA-CPEPS 的 RMSE 较大,CMA-CPEPS 与 CMA-REPS 离散度与 RMSE 比值及空间相关系数均相当。此外,CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 12 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 集合平均降水的 RMSE、离散度、离散度与 RMSE 比值和空间相关系数(图略)与 00 时起报的一致。

2.3 降水概率预报检验

图 5 为 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时和



注:图 a 中虚线为 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 控制预报逐 3 h 降水的 RMSE。

图 4 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 00 时起报的 84 h 预报时效内逐 3 h 降水的 (a)RMSE, (b)离散度, (c)离散度与 RMSE 比值, (d)离散度与 RMSE 空间相关系数

Fig. 4 (a) RMSE, (b) spread, (c) spread/RMSE and (d) spatial correlation coefficient between spread and RMSE of 3 h precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initiated at 00:00 UTC within 84 h lead time from 15 June to 28 August 2023

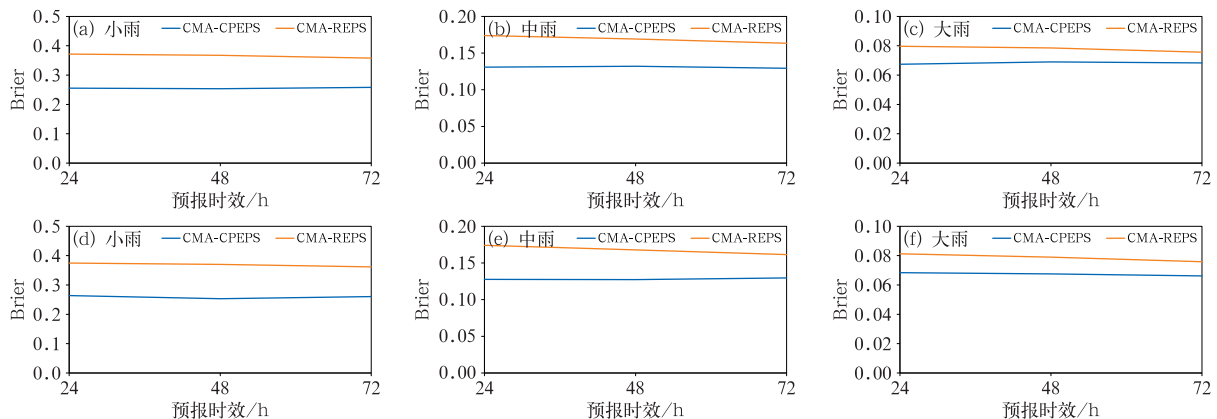


图 5 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在(a~c)00 时, (d~f)12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的 Brier 评分

Fig. 5 Brier score of 24 h ensemble average precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initialized at (a-c) 00:00 UTC and (d-f) 12:00 UTC within 72 h lead time from 15 June to 28 August 2023

12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的 Brier 评分。结果显示,CMA-CPEPS 在不同起报时刻的各降水量级的 Brier 评分均优于 CMA-REPS。这表明,与 CMA-REPS 相比,CMA-CPEPS 在不同降水量级的集合概率与真实观测概率的偏差更小,其降水概率预报的准确性和可靠性更高。具体而言,CMA-CPEPS 在概率预报方面表现出更优的性能,能够更准确地反映降水事件发生的概率。

图 6 为 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 00 时和 12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的 AROC 评分。结果显示,CMA-CPEPS 在不同起报时刻各降水量级上的 AROC 评分均优于 CMA-REPS。这表明,CMA-CPEPS 在降水预报中的分辨能力更强,能够更有效地区分降水事件发生与否的情况。具体而言,CMA-CPEPS 的 AROC 评分优势反映了其在降水概率预报中的更高精度和可靠性,这种优越的分辨能力进一步验证了 CMA-CPEPS 在降水预报中的综合性能优于 CMA-REPS。

3 降水个例检验及结果

“23·7”过程发生在台风“杜苏芮”残涡北上过程中,该残涡受到华北地区稳定高压系统阻挡,导致其移动停滞。同时,在“杜苏芮”和“卡努”双台风持续的水汽和能量输送下,稳定的大尺度环流形势为中小尺度对流系统发生、发展和反复提供了极为有利的条件,致使华北地区出现了历史罕见的持续性

区域极端强降水事件(符娇兰等,2023;张芳华等,2023;杨晓亮等,2023)。从降水实况来看,7 月 29 日 00 时至 30 日 00 时(图 7a),降水中心位于河南西北部至河北西南部一线。随着低涡系统逐渐向北移动,30 日 00 时至 31 日 00 时,降水中心沿太行山东麓向东北方向移动至河北中部和北京南部一线(图 7b)。本次降水过程的日降水量极值达到 250~500 mm,有 19 个国家级气象观测站的日降水量突破历史极值。

3.1 降水预报的误差分析

CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 均捕捉到此次强降水过程,图 7c~7f 为 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的 29 日 00 时至 30 日 00 时、30 日 00 时至 31 日 00 时华北地区强降水集中区域(图 7a、7b 黑色虚线框标注区域)的 24 h 集合平均降水量与实况的差值。具体表现如下:29 日 00 时至 30 日 00 时,CMA-CPEPS(图 7c)和 CMA-REPS(图 7d)对河北南部、河南地区的强降水中心区域的模拟偏小、强度偏弱,对河北中东部、山东西北部及天津地区的暴雨模拟偏强;30 日 00 时至 31 日 00 时,CMA-CPEPS(图 7e)和 CMA-REPS(图 7f)对京津冀地区暴雨预报范围一致,但对最强降水中心的预报偏弱,对河北南部降水预报偏强,对天津暴雨预报范围也偏强。由华北地区 29 日 00 时至 31 日 00 时逐 3 h 平均降水量实况(图 8)可看出,最强降水时段集中在 29 日 21 时至 30 日 09 时。图 9 为 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的最强降水时段的逐 3 h 累计降水量 ≥ 20 mm 的降水

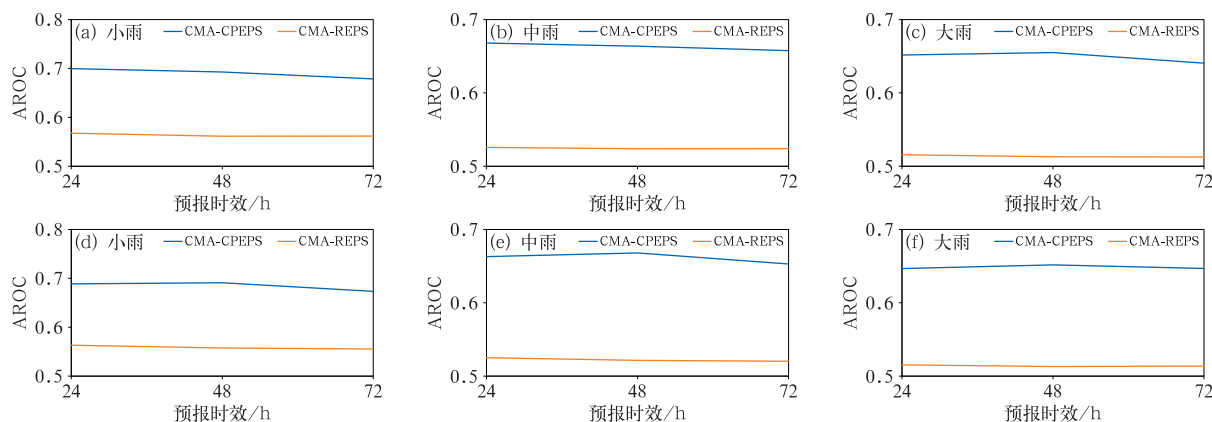
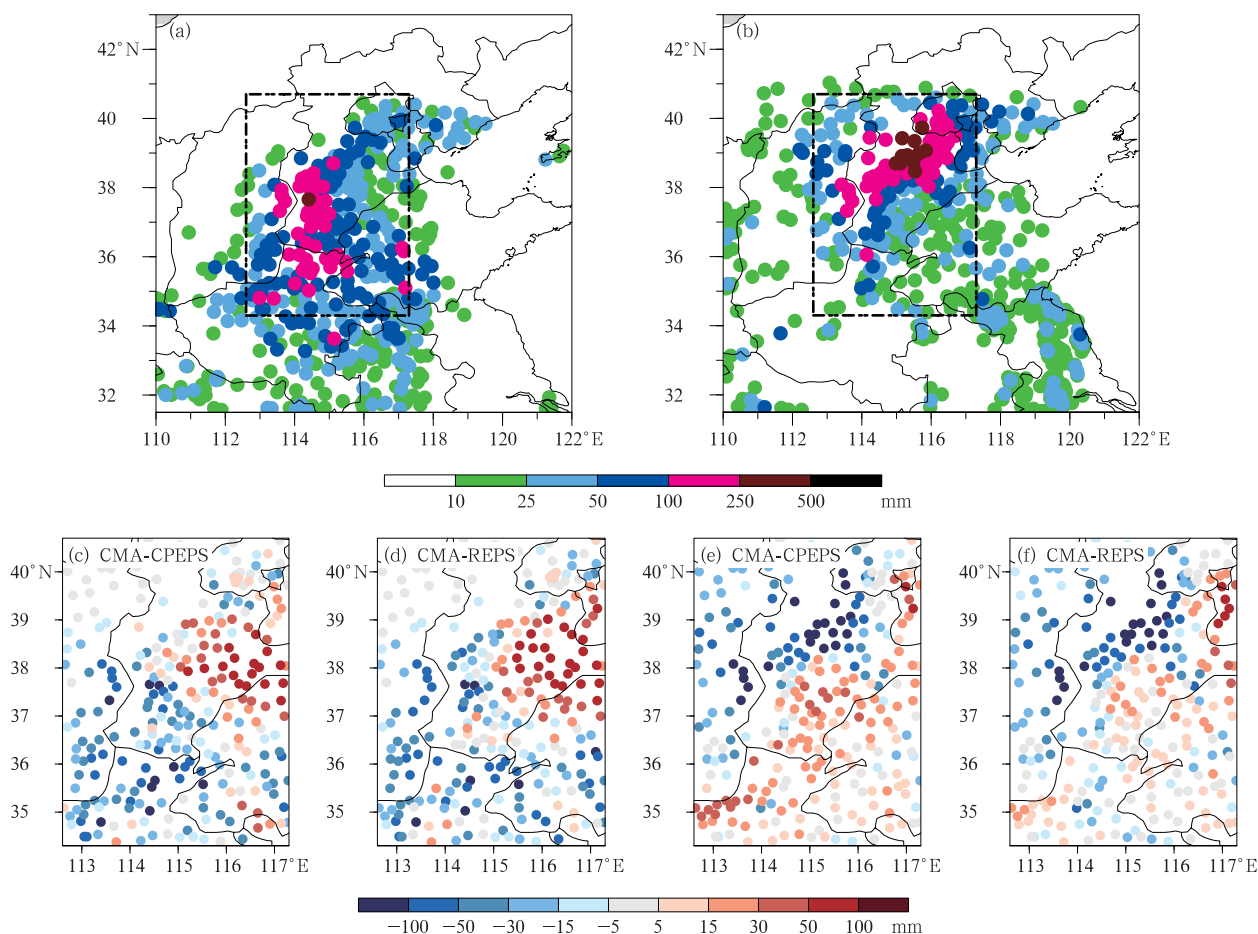


图 6 2023 年 6 月 15 日至 8 月 28 日 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在(a~c)00 时, (d~f)12 时起报的 72 h 预报时效内逐 24 h 集合平均降水的 AROC 评分

Fig. 6 AROC score of 24 h ensemble average precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initialized at (a—c) 00:00 UTC and (d—f) 12:00 UTC within 72 h lead time from 15 June to 28 August 2023



注:图 a 和 b 黑色虚线框标注区域(34.3°~40.7°N、112.6°~117.3°E)为华北地区强降水集中区域。

图 7 华北地区 2023 年 7 月(a)29 日 00 时至 30 日 00 时、(b)30 日 00 时至 31 日 00 时 24 h 累计降水量实况,及(c~f) CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 28 日 12 时起报的(c,d)12~36 h、(e,f)36~60 h 集合平均降水量与实况的差值

Fig. 7 (a, b) The observed 24 h accumulated precipitation over North China from (a) 00:00 UTC 29 to 00:00 UTC 30 and (b) 00:00 UTC 30 to 00:00 UTC 31, and (c—f) the difference between precipitation observation and ensemble average precipitation within (c, d) 12—36 h and (e, f) 36—60 h lead time forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS initialized at 12:00 UTC 28 July 2023

概率预报及实况降水量 ≥ 20 mm 的站点分布。从实况降水量 ≥ 20 mm 的站点分布来看,强降水中心呈现出由西南向东北移动的趋势。CMA-CPEPS(图 9a~9d)和 CMA-REPS(图 9e~9h)均基本反映出系统走向,具体来看,CMA-CPEPS 对降水量 ≥ 20 mm 的概率预报达到 20%~95%,覆盖了绝大多数实况累计降水量 ≥ 20 mm 的站点;而 CMA-REPS 对降水量 ≥ 20 mm 的概率预报仅为 20%~65%,仅覆盖了部分实况累计降水量 ≥ 20 mm 的站点。相比之下,CMA-CPEPS 的概率预报与实况降水站点的吻合度更高,且预报概率值更大。综上可得,CMA-CPEPS 对降水细节的捕捉能力优于 CMA-REPS,其

预报的雨带位置和强度与实况更为接近,能够更准确地预报强降水中心的发生、演变和消亡过程。

3.2 确定性预报(集合平均)检验

图 10 展示了华北区域 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 在 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的 12~60 h 预报时效(29 日 00 时至 31 日 00 时)内 3 h 集合平均降水的 ETS 和 Bias 评分。对于小雨量级(0.1~3 mm),CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 的 ETS 和 Bias 评分表现相当。对于中雨(3~10 mm)到大雨(10~20 mm)量级,CMA-REPS 的 ETS 评分略优于 CMA-CPEPS,两者 Bias 评分相当。对于暴雨量级

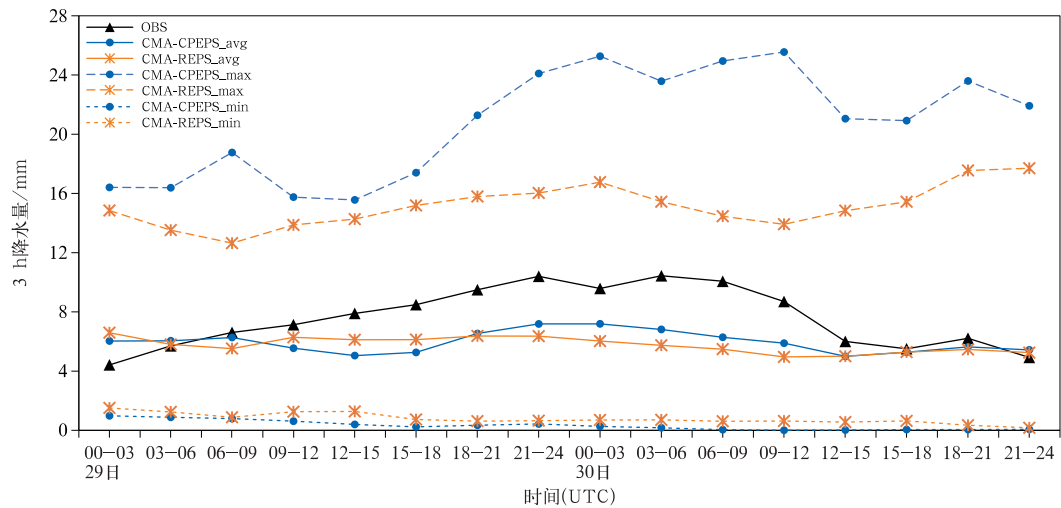
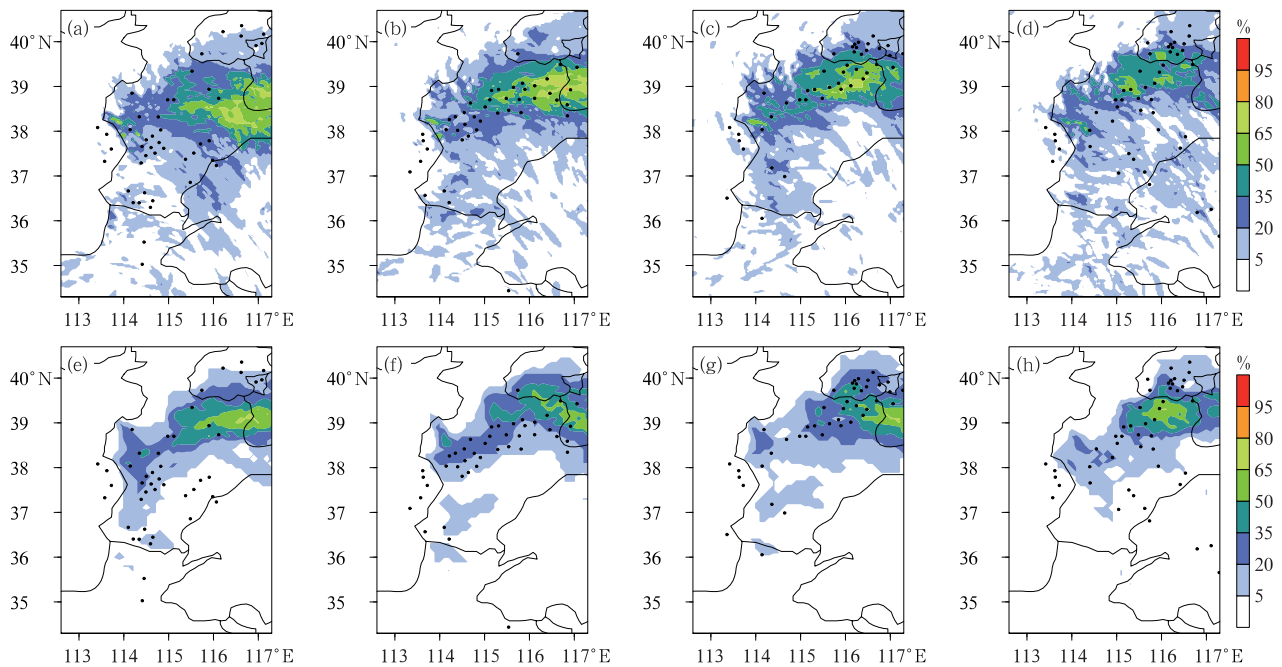


图8 华北区域 2023 年 7 月 29 日 00 时至 31 日 00 时的逐 3 h 平均降水量实况(OBS)及 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 预报的集合平均(avg)、集合最大(max)和最小(min)平均降水量

Fig. 8 The 3 h average observed precipitation (OBS) and the ensemble average (avg), ensemble maximum (max) and ensemble minimum (min) average precipitation forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS in North China from 00:00 UTC 29 to 00:00 UTC 31 July 2023



注:黑色圆点为实况降水量 ≥ 20 mm 站点。

图9 (a~d)CMA-CPEPS 和(e~h)CMA-REPS 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的华北区域(a,e)29 日 21 时至 30 日 00 时,(b,f)00—03 时,(c,g)03—06 时,(d,h)06—09 时 3 h 降水量 ≥ 20 mm 的概率分布

Fig. 9 The probability distribution of 3 h precipitation ≥ 20 mm over North China from (a, e) 21:00 UTC 29 to 00:00 UTC 30, (b, f) 00:00 UTC 30 to 03:00 UTC 30, (c, g) 03:00 UTC 30 to 06:00 UTC 30 and (d, h) 06:00 UTC 30 to 09:00 UTC 30 forecasted by (a~d) CMA-CPEPS and (e~h) CMA-REPS initialized at 12:00 UTC 28 July 2023

(20~50 mm), CMA-CPEPS 的 ETS 评分显著高于 CMA-REPS, 同时其 Bias 评分明显低于 CMA-REPS, 表明 CMA-CPEPS 在暴雨量级的预报中偏差更小。总体来看, CMA-CPEPS 显著改善了对强

降水预报的湿偏差(与图 2 和图 3 的结果一致), 进一步表明 CMA-CPEPS 对强降水中心位置的预报与实况更接近(图 9)。

3.3 集合区间预报

集合区间预报可用于估计实况发生的大致范围,也可提供定量化的预报不确定信息(李俊等, 2015)。由图 8 可以看出,29 日 00 时至 31 日 00 时华北区域逐 3 h 平均降水量实况随时间演变呈单峰型,最大 3 h 平均降水量为 10.4 mm(出现在 7 月 30 日 03—06 时)。CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 的集合最大和最小平均降水量预报在各预报时段均涵盖了实况值。CMA-CPEPS 集合平均降水量较实况偏小,其随时间的演变特征在一定程度上能反映该区

域降水的发生、发展和演变过程,且其集合最大值的演变趋势与实况高度一致。相比之下,CMA-REPS 的集合平均降水量较实况偏小,且其降水强度随时间的变化未能准确体现实况的演变特征。由此可见,在此次降水过程的主要影响区域,CMA-CPEPS 无论对降水强度预报还是降水强度随时间演变趋势的预报均优于 CMA-REPS,与实况更为吻合。

3.4 离散度-误差关系检验

图 11 给出了华北区域 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的 29 日 00 时至

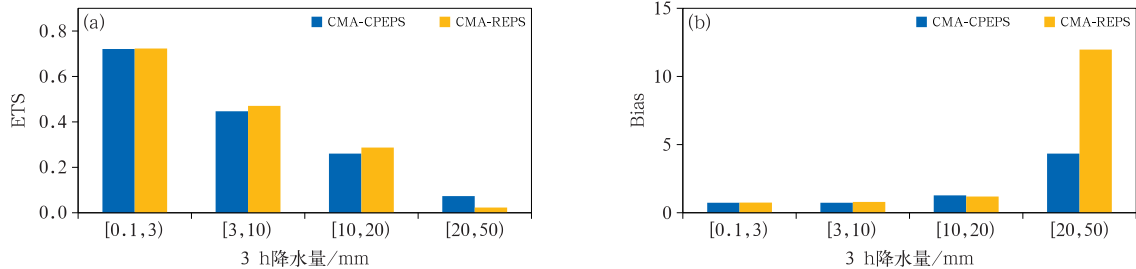


图 10 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的 12~60 h 预报时效内华北区域 3 h 集合平均降水的(a)ETS 和(b)Bias 评分

Fig. 10 (a) ETS and (b) Bias of 3 h ensemble average precipitation forecast within 12–60 h lead time over North China by CMA-CPEPS and CMA-REPS initialized at 12:00 UTC 28 July 2023

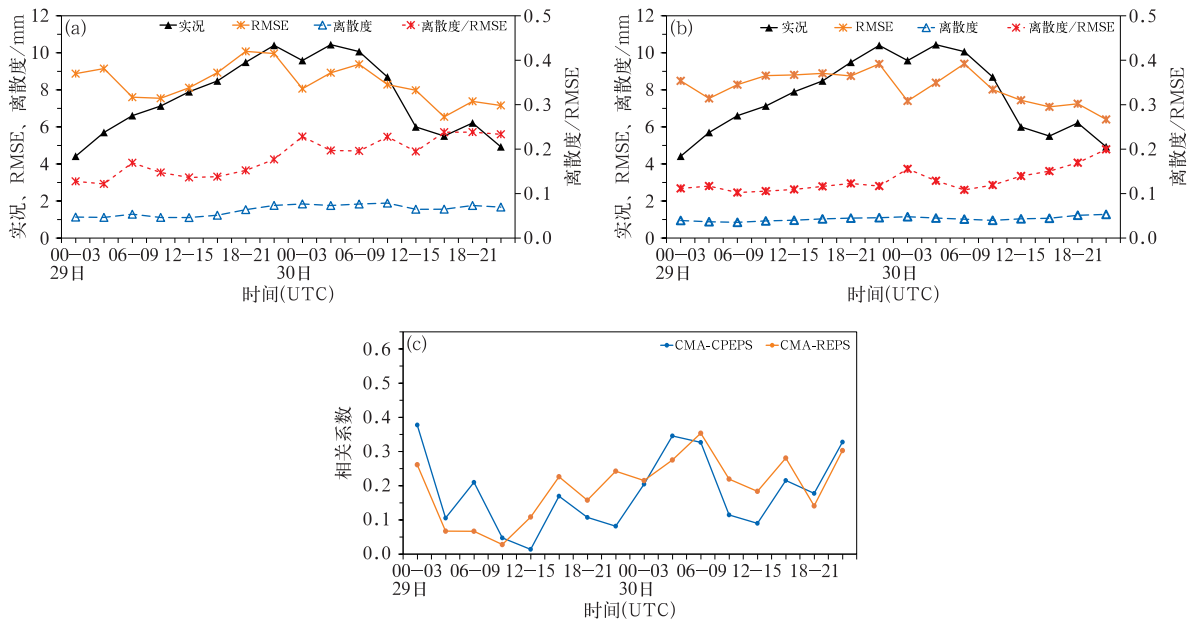


图 11 (a)CMA-CPEPS 和(b)CMA-REPS 2023 年 7 月 28 日 12 时起报的 29 日 00 时至 31 日 00 时华北区域逐 3 h 集合平均降水的 RMSE、离散度、离散度与 RMSE 的比值和降水实况,及(c)两组集合预报的离散度和 RMSE 的空间相关系数

Fig. 11 (a, b) The observed precipitation and the RMSE, spread and spread/RMSE of 3 h ensemble average precipitation forecast by (a) CMA-CPEPS and (b) CMA-REPS initialized at 12:00 UTC 28 July and (c) spatial correlation coefficients between spread and RMSE of the ensemble forecasts by CMA-CPEPS and CMA-REPS from 00:00 UTC 29 to 00:00 UTC 31 July 2023

31 日 00 时集合平均降水的 RMSE、离散度以及离散度与 RMSE 的比值和平均降水实况, 及两组集合预报的离散度和 RMSE 的空间相关系数。由图 11a、11b 可得 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 降水预报误差与实况的变化趋势一致, 降水越强预报误差越大; 两套系统的离散度均偏小, 离散度与 RMSE 演变趋势基本一致, CMA-CPEPS 离散度和 RMSE 的比值较 CMA-REPS 更接近 1, 即更接近理想状态。CMA-CPEPS、CMA-REPS 离散度与 RMSE 空间的相关系数分别为 $0.04 \sim 0.38$ 和 $0.06 \sim 0.35$ 。对于“23·7”华北特大暴雨过程的预报, CMA-REPS 与 CMA-CPEPS 离散度-误差关系相当, 均存在离散度明显低估可能预报误差的问题(与表 2、图 4 的结果一致)。

3.5 概率预报检验

图 12 为两套系统在不同降水强度和不同邻域

空间尺度下的逐 3 h 降水预报的 FSS 评分。总体来看, FSS 评分随着邻域空间尺度的增加, 先快速上升, 随后趋于平缓, 表明两组预报系统在邻域空间尺度增大时均能获得更高的概率预报技巧。对于小到中雨量级(<10 mm), 两套系统在 35 km 邻域空间尺度上均能获得 0.6 以上 FSS 评分。而对于大雨以上量级(≥ 10 mm)则需要更大的邻域空间尺度才能达到“可用预报尺度”(FSS 评分 ≥ 0.5), 具体来看, 对于 3 h 降水量 ≥ 10 mm 的量级, CMA-CPEPS 在 35 km 邻域空间尺度 FSS 评分已超过 0.5, 达到“可用预报尺度”, 而 CMA-REPS 需要超过 35 km 的邻域空间尺度才能到达这一标准; 3 h 降水量 ≥ 20 mm 的量级(暴雨), CMA-CPEPS 在 65 km 邻域空间尺度达到“可用预报尺度”, 而 CMA-REPS 在所讨论的四种邻域尺度下均未达到这一标准。综上所述, CMA-CPEPS 相对于 CMA-REPS 对短历时强降水的概率预报能力更强。

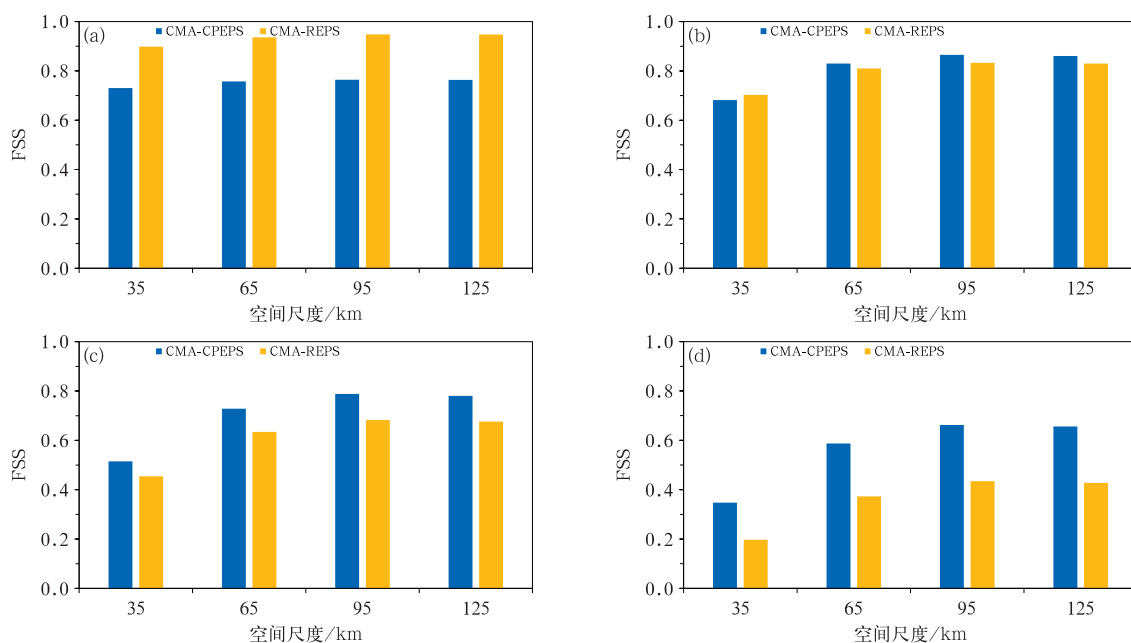


图 12 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 预报 2023 年 7 月 29 日 00 时至 31 日 00 时
华北区域逐 3 h 降水在(a)小雨,(b)中雨,(c)大雨,(d)暴雨
量级的不同邻域空间尺度上的 FSS 评分

Fig. 12 FSS score for the 3 h precipitation forecast with (a) light rain,
(b) moderate rain, (c) heavy rain and (d) rainstorm at
different neighborhood spatial scales over North China
from 00:00 UTC 29 to 00 UTC 31 July 2023
forecasted by CMA-CPEPS and CMA-REPS

4 结论与讨论

基于 CMA-CPEPS 的预报区域 ($19.51^{\circ} \sim 43.45^{\circ}\text{N}$ 、 $106.12^{\circ} \sim 129.88^{\circ}\text{E}$), 采用 Bias、ETS、离散度和概率预报检验等方法, 对 CMA-CPEPS 和 CMA-REPS 集合预报系统在 2023 年中国汛期 (6 月 15 日至 8 月 28 日) 的降水预报性能进行了统计评估, 并选取“23·7”华北特大暴雨过程进行详细检验。得到主要结论如下:

(1) CMA-REPS 存在降水系统性偏强的问题, 相对于 CMA-REPS, CMA-CPEPS 对小雨量级的 ETS 评分更优, Bias 更合理, 且 CMA-CPEPS 对晴雨随时间变化的预报能力明显优于 CMA-REPS, CMA-CPEPS 在 CMA-REPS 基础上改善了降水系统性偏强的问题。

(2) CMA-CPEPS、CMA-REPS 离散度均偏小, CMA-CPEPS 离散度略优于 CMA-REPS; CMA-CPEPS 的 RMSE 略大于 CMA-REPS; 两套系统的离散度与 RMSE 的比值及空间相关系数均相当。CMA-CPEPS 24 h 累计降水的 Brier、AROC 评分均优于 CMA-REPS, 表明 CMA-CPEPS 对降水的概率预报及其分辨能力更好。

(3) 针对“23·7”华北特大暴雨过程, CMA-CPEPS 较 CMA-REPS 对降水细节的捕捉能力更强, 能更为准确地预报强降水中心的发生、演变和消亡过程; 且 CMA-CPEPS 对降水强度和降水强度随时间演变趋势的预报均更优, 即 CMA-CPEPS 对降水的时空分辨能力明显更优。

(4) 对“23·7”华北特大暴雨过程的预报, CMA-REPS 和 CMA-CPEPS 两系统的离散度明显偏低; 在短时效 (3 h) 中雨及以上量级降水, CMA-CPEPS 的概率预报在不同邻域空间尺度上的预报效果均优于 CMA-REPS, 特别是对强降水的预报 CMA-CPEPS 的优势更加明显, 即 CMA-CPEPS 对短历时强降水的预报能力更强。

统计检验和个例分析结果均表明, CMA-CPEPS 较 CMA-REPS 对中国汛期降水预报的能力提升明显, 本研究结果为区域和对流尺度集合预报系统的进一步发展提供了客观依据和重要参考价值。

参考文献

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(2): 9-18, 29. Chen J, Li X L, 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 9-18, 29(in Chinese).

邓国, 戴玲玲, 周玉淑, 等, 2022. CMA 高分辨区域集合预报系统支撑北京冬奥会气象服务保障的评估分析[J]. 气象, 48(2): 129-148. Deng G, Dai L L, Zhou Y S, et al, 2022. Evaluation and analysis of meteorological service for Beijing Winter Olympic Games supported by CMA high-resolution regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 48(2): 129-148(in Chinese).

邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等, 2010. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验[J]. 应用气象学报, 21(5): 513-523. Deng G, Gong J D, Deng L T, et al, 2010. Development of mesoscale ensemble prediction system at National Meteorological Centre[J]. J Appl Meteor Sci, 21(5): 513-523(in Chinese).

杜钧, 陈静, 2010. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 36(11): 1-11. Du J, Chen J, 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction[J]. Meteor Mon, 36(11): 1-11(in Chinese).

杜钧, 周斌斌, 2016. 雾的集合预报与集合预报的检验[J]. 气象科技进展, 6(3): 41-47. Du J, Zhou B B, 2016. Ensemble fog prediction and ensemble forecast verification[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 41-47(in Chinese).

符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1435-1450(in Chinese).

高荣, 宋连春, 钟海玲, 2018. 2016 年汛期中国降水极端特征及与 1998 年对比[J]. 气象, 44(5): 699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5): 699-703(in Chinese).

李俊, 杜钧, 刘羽, 2015. 北京“7·21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验[J]. 气象学报, 73(1): 50-71. Li J, Du J, Liu Y, 2015. A comparison of initial condition-, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing “7·21” excessive storm rain event[J]. Acta Meteor Sin, 73(1): 50-71(in Chinese).

李俊, 杜钧, 许建玉, 等, 2020. 一次特大暴雨过程高分辨率集合预报试验的检验和评估[J]. 暴雨灾害, 39(2): 176-184. Li J, Du J, Xu J Y, et al, 2020. The assessment and verification of high-resolution ensemble forecast for a heavy rainstorm[J]. Torr Rain Dis, 39(2): 176-184(in Chinese).

李晓莉, 刘永柱, 2019. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析[J]. 气象学报, 77(3): 552-562. Li X L, Liu Y Z, 2019. The improvement of GRAPES global extratropical singular vectors and

- experimental study[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(3):552-562(in Chinese).
- 刘永柱,沈学顺,李晓莉,2013. 基于总能量模的 GRAPES 全球模式奇异向量扰动研究[J]. *气象学报*, 71(3):517-526. Liu Y Z, Shen X S, Li X L, 2013. Research on the singular vector perturbation of the GRAPES global model based on the total energy norm[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(3):517-526(in Chinese).
- 刘永柱,杨学胜,王洪庆,2011. GRAPES 奇异向量研究及其在暴雨集合预报中的应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 47(2):271-277. Liu Y Z, Yang X S, Wang H Q, 2011. Research on GRAPES singular vectors and application to heavy rain ensemble prediction[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 47(2):271-277(in Chinese).
- 刘志丽, Dudhia J, 陈静, 等, 2022. 公里级 CMA_MESO 模式 FSS 评分技术研究[J]. *气象科技*, 50(5):660-669. Liu Z L, Dudhia J, Chen J, et al, 2022. Fraction skill score verification technology for kilometer-level CMA_MESO model[J]. *Meteor Sci Technol*, 50(5):660-669(in Chinese).
- 罗琪,符娇兰,2023. 2023 年 7 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 49(10):1277-1284. Luo Q, Fu J L, 2023. Analysis of the July 2023 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteor Mon*, 49(10):1277-1284(in Chinese).
- 罗玉,范广洲,周定文,等,2015. 西南地区极端降水变化趋势[J]. *气象科学*, 35(5):581-586. Luo Y, Fan G Z, Zhou D W, et al, 2015. Extreme precipitation trend of Southwest China in recent 41 years[J]. *J Meteor Sci*, 35(5):581-586(in Chinese).
- 马旭林,薛纪善,陆维松,2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究[J]. *气象学报*, 66(4):526-536. Ma X L, Xue J S, Lu W S, 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(4):526-536(in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,王建鹏,2014. 数值天气预报检验方法研究进展[J]. *地球科学进展*, 29(3):327-335. Pan L J, Zhang H F, Wang J P, 2014. Progress on verification methods of numerical weather prediction[J]. *Adv Earth Sci*, 29(3):327-335(in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,朱伟军,等,2013. ECMWF 模式对东北半球气象要素场预报能力的检验[J]. *气候与环境研究*, 18(1):111-123. Pan L J, Zhang H F, Zhu W J, et al, 2013. Forecast performance verification of the ECMWF model over the Northeast Hemisphere[J]. *Clim Environ Res*, 18(1):111-123(in Chinese).
- 彭飞,李晓莉,陈静,等,2019. GRAPES 全球集合预报系统模式扰动随机动能补偿方案初步探究[J]. *气象学报*, 77(2):180-195. Peng F, Li X L, Chen J, et al, 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2):180-195(in Chinese).
- 谭燕,陈德辉,2007. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验[J]. *应用气象学报*, 18(3):396-406. Tan Y, Chen D H, 2007. Meso-scale ensemble forecasts on physical perturbation using a non-hydrostatic model[J]. *J Appl Meteor Sci*, 18(3):396-406(in Chinese).
- 田伟红,庄世宇,2008. ETKF 方法在区域集合预报中的初步应用[J]. *气象*, 34(8):35-39. Tian W H, Zhuang S Y, 2008. Application of ETKF method to regional ensemble forecasts[J]. *Meteor Mon*, 34(8):35-39(in Chinese).
- 王婧卓,陈法敬,陈静,等,2021. GRAPES 区域集合预报对 2019 年中国汛期降水预报评估[J]. *大气科学*, 45(3):664-682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al, 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(3):664-682(in Chinese).
- 王璐,沈学顺,2019. 对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J]. *气象*, 45(8):1158-1168. Wang L, Shen X S, 2019. Review on the representation of model uncertainty in convection-allowing ensemble prediction system[J]. *Meteor Mon*, 45(8):1158-1168(in Chinese).
- 王毅,代刊,张晓美,等,2020. 集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述[J]. *气象科技进展*, 10(2):58-64, 74. Wang Y, Dai K, Zhang X M, et al, 2020. Research progress in study of forecast errors and predictability based on ensemble sensitivity[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 10(2):58-64, 74(in Chinese).
- 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 Z Z, Chen J, Wang Y, et al, 2019. Sensitivity experiments of a stochastically perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(5):849-868(in Chinese).
- 杨晓亮,金晓青,孙云,等,2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. *气象*, 49(12):1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. *Meteor Mon*, 49(12):1451-1467(in Chinese).
- 杨晓亮,杨敏,金晓青,等,2024. “23·7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J]. *暴雨灾害*, 43(1):1-12. Yang X L, Yang M, Jin X Q, et al, 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023[J]. *Torr Rain Dis*, 43(1):1-12(in Chinese).
- 袁月,李晓莉,陈静,等,2016. GRAPES 区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究[J]. *气象*, 42(10):1161-1175. Yuan Y, Li X L, Chen J, et al, 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system[J]. *Meteor Mon*, 42(10):1161-1175(in Chinese).
- 翟盘茂,潘晓华,2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 58(S1):1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century[J]. *Acta Geogr Sin*, 58(S1):1-10(in Chinese).
- 张芳华,杨舒楠,胡艺,等,2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特

- 征[J]. 气象, 49(12):1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1421-1434(in Chinese).
- 赵滨, 张博, 2018. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J]. 暴雨灾害, 37(1):1-7. Zhao B, Zhang B, 2018. Application of neighborhood spatial verification method on precipitation evaluation [J]. Torr Rain Dis, 37(1):1-7(in Chinese).
- 竺夏英, 孙林海, 钟海玲, 等, 2024. 2023 年中国气候异常特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 50(2):246-256. Zhu X Y, Sun L H, Zhong H L, et al, 2024. Characteristics of climate anomalies and major meteorological events over China in 2023 [J]. Meteor Mon, 50(2):246-256(in Chinese).
- Casati B, Wilson L J, Stephenson D B, et al, 2008. Forecast verification: current status and future directions[J]. Meteor Appl, 15(1):3-18.
- Liu X, Chen J, Liu Y Z, et al, 2024. An initial perturbation method for the multiscale singular vector in global ensemble prediction [J]. Adv Atmos Sci, 41(3):545-563.
- Murphy A H, Winkler R L, 1987. A general framework for forecast verification[J]. Mon Wea Rev, 115(7):1330-1338.
- Roberts N M, Lean H W, 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. Mon Wea Rev, 136(1):78-97.
- Tu K, Yan Z W, Wang Y, 2011. A spatial cluster analysis of heavy rains in China[J]. Atmos Ocea Sci Lett, 4(1):36-40.
- Yu H Z, Meng Z Y, 2016. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012[J]. Tellus A, 68(1):31045.
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2015. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system[J]. Adv Atmos Sci, 32(8):1143-1155.
- Zhang X B, Wan Q L, Xue J S, et al, 2015. The impact of different physical processes and their parameterizations on forecast of a heavy rainfall in South China in annually first raining season [J]. J Trop Meteor, 21(2):194-210.

(本文责编:侯翠梅)