

姚梦颖,陈锋,刘雪晴,等,2026. 浙江复杂地形下 CMA 区域集合暖季预报技巧对比与分析[J]. 气象,52(8):942-958. Yao M Y,Chen F,Liu X Q,et al,2026. Comparative analysis of forecast skills of CMA regional ensemble prediction systems in warm season for the complex terrain areas of Zhejiang Province[J]. Meteor Mon,52(8):942-958(in Chinese).

浙江复杂地形下 CMA 区域集合暖季 预报技巧对比与分析^{*}

姚梦颖¹ 陈 锋¹ 刘雪晴¹ 李红祺² 王婧卓² 王秋萍¹

¹ 浙江省气象科学研究所,杭州 310053

² 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

提 要: 基于 3 km 和 10 km 水平分辨率的 CMA 区域集合预报模式(以下分别简称为 CMA-REPS 3 km、CMA-REPS 10 km),对浙江暖季近地面温度、风速和降水预报性能进行统计检验与分析。结果表明:两种区域集合预报模式均能有效把握近地面要素的日变化特征,但温度预报存在冷暖偏差,风速预报普遍偏高,普遍高估午后至清晨的降水。相较于 CMA-REPS 10 km,CMA-REPS 3 km 可有效降低近地面温度和风速的预报误差,连续等级概率评分最高下降了 23.1%,降水相对作用特征面积提升幅度最高达 19%;CMA-REPS 3 km 的强降水邻域空间检验分数技巧评分更高并且对近地面要素日变化特征预报更准确,但在预报中前期集合离散度更小。在复杂地形下,CMA-REPS 3 km 在丘陵和山地对温度和风速的概率预报误差以及风速离散度-技巧关系改进明显,在平原和盆地地区对温度离散度-技巧关系改进明显,在地形陡峭区域对强降水有更好的集合离散度并对雨带的发展预报更好。故 CMA-REPS 3 km 在复杂地形下具有较强的近地面要素预报能力。研究结果为客观评价不同地形下两种区域集合预报模式及其后续改进方法提供依据。

关键词: 复杂地形,区域集合预报,检验评估,暖季预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.012301

Comparative Analysis of Forecast Skills of CMA Regional Ensemble Prediction Systems in Warm Season for the Complex Terrain Areas of Zhejiang Province

YAO Mengying¹ CHEN Feng¹ LIU Xueqing¹ LI Hongqi² WANG Jingzhuo² WANG Qiuping¹

¹ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310053

² CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: In this study, we conduct a statistical verification and analysis on the performance of near-surface temperature, wind speed and precipitation forecasts during the warm season in Zhejiang Province using CMA regional ensemble prediction systems at 3 km and 10 km horizontal resolutions (hereinafter referred to as CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km). The results show that both CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km can effectively capture the diurnal variations of near-surface meteorological elements, but their forecasts exhibit a negative bias in temperature, a general overestimation of wind speed, and a general overestimation of precipitation from afternoon to early morning. Compared to CMA-REPS 10 km, CMA-REPS 3 km can effectively reduce forecast errors of temperature and wind speed, with a maximum decrease

^{*} 浙江省自然科学基金项目(LZJM25D050004)和国家自然科学基金项目(42475167)共同资助

2025 年 7 月 21 日收稿; 2026 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者:姚梦颖,主要从事集合预报研究. E-mail:yaomy1095@163.com

通讯作者:陈锋,主要从事数值模式技术研究. E-mail:fchen_zj@163.com

of 23.1% in continuous ranked probability score and an improvement in the area of relative operation characteristic of precipitation forecast by up to 19%. Meanwhile, CMA-REPS 3 km demonstrates more superior fraction skill score for heavy precipitation neighborhood space and provides more accurate forecasts in diurnal variations of near-surface elements. However, the early ensemble spread is smaller in the forecast. In complex terrains, CMA-REPS 3 km shows significant improvements in the probability forecast errors of temperature and wind speed and also in the spread-skill relationships for wind speed in hilly and mountainous and for temperature in plain and basin areas. Not only that, CMA-REPS 3 km has better capability for the ensemble spread of heavy precipitation and the development of rain bands in steep terrain areas. As such, CMA-REPS 3 km has superior forecasting capability for the near-surface elements in complex terrains, particularly for 2 m temperature, 10 m wind speed and precipitation. These findings could serve as a scientific basis for objectively evaluating the two CMA regional ensemble prediction systems under different topographic conditions and their subsequent improvements in ensemble forecasting methods.

Key words: complex terrain, regional ensemble prediction system, verification and evaluation, warm-season forecast

引言

浙江地形复杂,山地、平原、丘陵交错分布。地形作为重要因子,通过改变大气环流的运动轨迹及热力和动力状态,对地表风、降水以及大气重力波的传播产生显著影响(陶诗言,1980;王其伟和谈哲敏,2006;丁一汇,2008;曾礼等,2022),进而影响局地暴雨、雷暴大风等致灾强对流天气的发生发展(刘璐等,2015;徐渊等,2024;张璐等,2025)。数值模式是开展复杂地形下近地面要素和降水预报的主要方法,然而数值天气预报模式中存在地表特征以及土壤状况等表征误差并且部分地区缺乏观测资料,因而复杂地形下模式预报如何表征天气的不确定性一直是气象领域的重要科学课题之一(Wendoloski et al, 2016;刘侃等,2024)。集合预报作为描述初值误差和模式误差的有效途径(Molteni et al, 1996;陈静等,2003;Huo et al, 2019),已成为在复杂地形区域的重要预报技术之一(Buizza, 2008;Friederichs and Hense, 2008;杜钧和陈静,2010;Wang et al, 2022;Li et al, 2021;刘侃等,2024;邓国等,2022;Shen et al, 2020),复杂地形区考虑地形影响可以有效改进降水集合预报性能并优化近地面要素的集合分布(Wang et al, 2022;陈良吕等,2019;Li et al, 2021)。

有研究证实更高分辨率的集合预报可有效提升山谷、高原、中国西南山区等复杂地形区域低层风场、温度场以及降水的预报能力(Wendoloski et al,

2016;刘侃等,2024;叶茂等,2025)。中国气象局地球系统数值预报中心于2014年实现了基于CMA模式、10 km水平分辨率的区域集合预报系统(CMA Regional Ensemble Prediction System, CMA-REPS)的业务化并且不断对其升级与优化(张涵斌等,2014;陈静和李晓莉,2020;王婧卓等,2021),2023年研发对流可识别尺度(3 km水平分辨率)的区域集合预报系统(王婧卓等,2025;熊洁等,2025)。然而,随着分辨率的提高,误差增长加快、非线性更强、湿对流特征更加显著,使得高分辨率集合预报的扰动结构和误差增长机制与低分辨率集合预报呈现明显差异(王婧卓等,2018;马雅楠等,2023;Wang et al, 2023;2024),尤其在复杂地形区域,中小尺度模式地形会通过影响初始时刻小尺度误差的增长,并在积分过程中通过非线性相互作用向大尺度转移,导致整体系统误差增加,进而影响集合预报结果的不确定性(庄潇然,2020;庄潇然等,2026;陈良吕等,2019;Li et al, 2021),造成不同分辨率集合预报系统在复杂地形下近地面要素预报技巧出现差异。然而,目前针对复杂地形下CMA不同水平分辨率区域集合预报系统性能的评估与对比分析还相对缺乏。

鉴于此,本文选择“七山一水二分田”(陈桥驿等,1985)的浙江($26.0^{\circ}\sim 31.5^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 123.5^{\circ}\text{E}$)为研究区域,以不同水平分辨率的区域集合预报系统为评估对象,分析浙江复杂地形下CMA不同分辨率区域集合预报系统的气象要素预报能力,旨在系统性揭示复杂地形下系统的预报特点,为后续进

一步发展和应用高分辨率集合预报模式提供依据。

1 资料与方法

1.1 集合预报模式与资料

以 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日的近地面温度、风速和降水为分析对象,采用不同水平分辨率集合预报系统与高分辨率观测资料相结合的方法开展多时空尺度气象要素评估。集合预报分别采用 3 km 和 10 km 水平分辨率的 CMA 区域集合预报

系统(以下分别简称为 CMA-REPS 3 km、CMA-REPS 10 km),以各系统研究时段内每日 08 时和 20 时(北京时,下同)起报的 1~84 h 预报作为集合预报数据,系统参数如表 1 所示。由表 1 可知,两个集合预报除控制预报模式(CMA_MESO)版本及水平分辨率不同外,在集合同化技术和初始扰动方案上也存在差异:CMA-REPS 3 km 的初始扰动采用观测资料扰动结合多尺度奇异向量方案,集合同化采用三维变分、云分析和融合叠加的技术,而 CMA-REPS 10 km 的初始扰动和集合同化分别采用集合变换卡尔曼滤波和云分析技术。故本文聚焦探究不

表 1 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 系统参数

Table 1 Configuration of CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km

参数	CMA-REPS 3 km	CMA-REPS 10 km
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°/50 层	0.1°/50 层
预报区域	19.5°~43.5°N,106.1°~129.9°E	10°~60°N,70°~140°E
水平格点数	793 个×799 个	751 个×501 个
控制预报初值	全球模式初值动力降尺度	全球模式初值动力降尺度
同化方案	三维变分、云分析、融合	云分析
初始扰动	观测资料扰动+多尺度奇异向量	集合变换卡尔曼滤波
模式扰动	随机物理过程倾向项扰动方案	随机物理过程倾向项扰动方案
侧边界扰动	CMA-GEPS 全球集合预报	CMA-GEPS 全球集合预报
集合成员	1 个控制成员+14 个扰动成员	1 个控制成员+14 个扰动成员
预报时效	84 h	84 h

同模式分辨率、物理过程配置与扰动方案共同作用下的区域集合预报模式整体预报性能。

观测资料为同期的高分辨率中国气象局陆面数据同化系统(HRCLDAS;师春香等,2019)1 km 分辨率产品和基于中国多源降水融合分析业务化系统(CMPAS)的 1 km 分辨率三源融合降水小时产品(潘畅等,2018)。为保持数据分辨率的一致性,采用三次样条插值方法将所有资料统一插值至 3 km 水平分辨率网格,为后续评估提供数据基础。

1.2 检验方法

为客观评估不同分辨率集合预报系统的预报能力,引入均方根误差(RMSE)、集合离散度(Spread)和离散度-技巧关系(Consistency)。Spread 与集合平均(所有控制成员和扰动成员的等权平均)RMSE 的比值可作为可靠性的度量指标,即该比值越接近于 1,意味着 Consistency 越高,集合预报捕捉大气真实状态(或分析场)的能力越强,可靠性越高;反之亦然(彭飞等,2023)。连续等级概率评分(CRPS;叶茂等,2025)用于检验近地面温度和风速的集合预报

技巧。采用相对作用特征面积(AROC;王婧卓等,2021)、降水预报邻域空间检验分数技巧评分(FSS;Roberts and Lean,2008;刘雪晴等,2020;李子良等,2021)和降水预报综合技巧评分(Roebber,2009;叶茂等,2025)对降水集合预报效果开展定量评估。

2 统计分析结果

2.1 近地面要素预报性能对比

2.1.1 2 m 温度和 10 m 风速预报检验

集合平均可体现系统预报总体趋势(李俊等,2010),对于近地面连续性变量,实际预报业务中常通过分析集合平均 RMSE 与 Spread 的关系,来检验该类变量不确定性的预报性能(邓国等,2022)。图 1 展示了不同系统近地面温度(2 m 温度)和风速(10 m 风速)预报不确定性随预报时效的演变。综合分析表明,不同系统的近地面温度、风速集合平均 RMSE 与 Spread 随预报时效延长呈增长趋势,但

Consistency 数值始终小于 1,说明近地面温度和风速预报欠发散是 CMA 区域集合预报模式普遍存在的问题。

基于集合平均 RMSE 和 Spread, CMA-REPS 3 km 在预报后期近地面温度和风速的 Spread 高于 CMA-REPS 10 km, 集合平均 RMSE 始终小于 CMA-REPS 10 km, 同时 CMA-REPS 3 km 控制成员 RMSE 低于 CMA-REPS 10 km, 而各扰动成员预报原理上是通过在控制成员预报的基础上叠加扰动得到, 因此, 不同系统的预报技巧差异与分辨率及控制成员版本差异有直接关系。但无论是近地面温度还是风速, 在预报中前期 (48 h 预报时效前) CMA-REPS 3 km 的 Spread 均较 CMA-REPS 10 km

更小且前 16 h 预报时效的温度 Consistency 大部分偏低, 这可能与两个系统所使用的初始扰动方案不同有关。集合预报中, 预报中前期的不确定性由初始扰动主导 (庄潇然等, 2016), CMA-REPS 3 km 采用的多尺度奇异向量初始扰动方案和 CMA-REPS 10 km 采用的集合变换卡尔曼滤波方案的物理机制有所不同: 多尺度奇异向量基于大气不稳定增长理论, 通过分析预报误差的相空间增长特征识别预报误差增长最快模态, 从而估计初始扰动 (陈静等, 2025; Wang et al, 2025b); 集合变换卡尔曼滤波则基于同化分析误差, 通过繁殖循环使初始扰动识别快速增长的误差方向, 从而生成初始扰动 (马旭林等, 2008; 王婧卓等, 2018)。基于不同物理机制的初

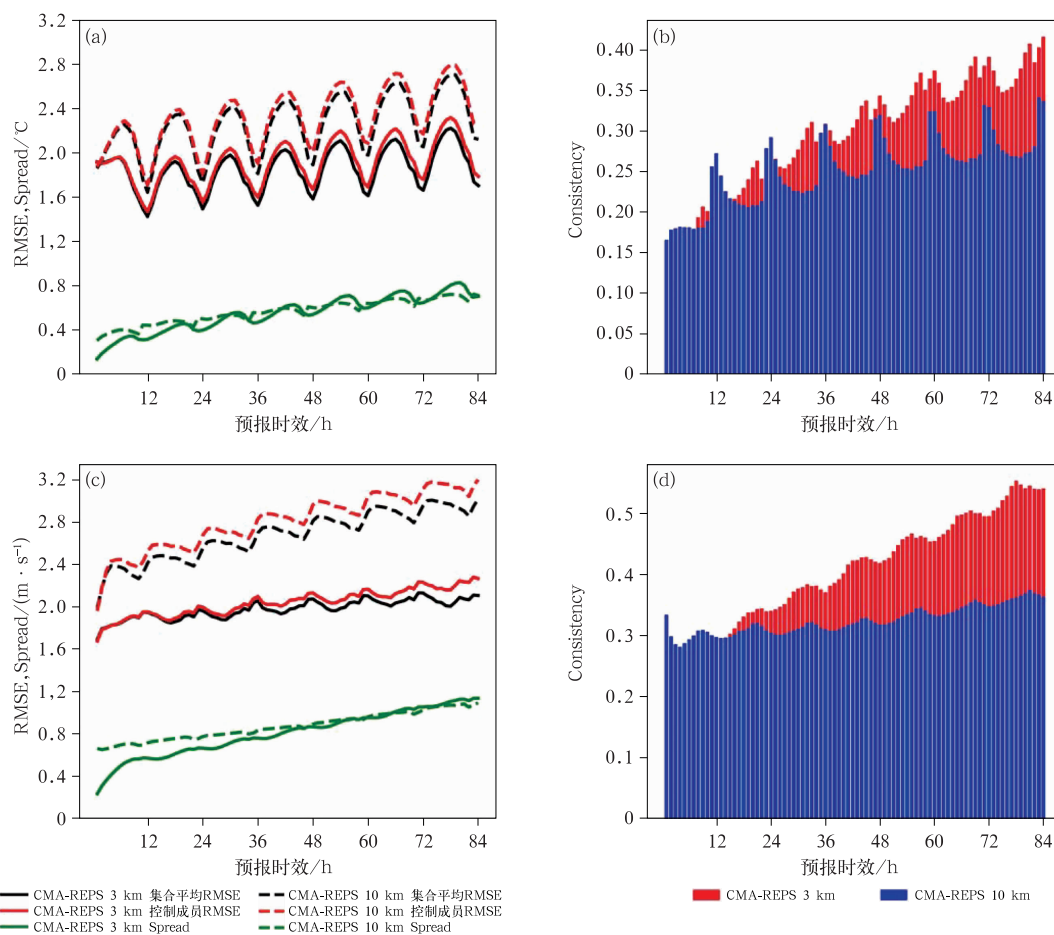


图1 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 预报的 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日浙江

(a,b) 2 m 温度, (c,d) 10 m 风速的 (a,c) 集合平均 RMSE、Spread、控制成员 RMSE 和 (b,d) Consistency 随预报时效的演变

Fig. 1 Evolution with lead time of (a, c) ensemble mean RMSE, Spread, control member RMSE, and (b, d) Consistency for (a, b) 2 m temperature and (c, d) 10 m wind speed forecasted by CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

始扰动方案差异会造成初始时刻扰动能量不同(庄潇然等, 2017; Wang et al, 2023; 2024)。另外, Wang et al(2025a; 2026)指出扰动振幅主要受 α 中尺度扰动的影响。由此推测, CMA-REPS 3 km 预报前期离散度更小可能与两个初始扰动方案的 α 中尺度初始扰动差异有关。

由检验时段近地面温度和风速的 CRPS 评分时序分析不同分辨率集合预报系统对近地面要素的概率预报误差特征(图 2)。综合分析表明, 不同系统对近地面温度和风速的概率预报误差随预报时效增长而增大, CMA-REPS 3 km 预报误差总体小于 CMA-REPS 10 km。具体而言, 在近地面温度预报上, 预报中后期(24~84 h 预报时效)CMA-REPS 3 km 表现出较高预报能力, 概率预报误差稳定低于 CMA-REPS 10 km 且误差增长趋势缓于 CMA-REPS 10 km; 在近地面风速预报上, 除个别时刻(1 h、10~12 h 预报时效)外, CMA-REPS 3 km 概率预报误差始终小于 CMA-REPS 10 km, 误差增长趋势明显缓于 CMA-REPS 10 km。

而对于日变化特征来说, 近地面温度和风速均呈白天增大、午后达到峰值、夜间降低、凌晨达到最低的日周期性变化特征(图 3), 不同系统在 08 时(图略)和 20 时(图 3)的预报均能准确捕捉近地面温度、风速日内峰谷值的出现时间段, 但高温预报较观测偏低, 低温预报较观测偏高, 风速预报普遍偏高。该系统性偏差可能与 CMA_MESO 采用的静态地形高程数据在复杂地形区存在明显海拔偏差,

以及使用了两次滤波处理导致复杂地形区有效信息可能被过度平滑有关(陈冬梅等, 2023; 倪悦等, 2024)。此外, CMA-REPS 3 km 温度、风速峰谷值预报误差均小于 CMA-REPS 10 km, 亦表明高水平分辨率的 CMA 区域集合预报系统对近地面温度和风速的日变化特征模拟具有明显优势。

同时, 图 1 和图 2 中不同系统的预报 RMSE、Spread 以及 CRPS 均呈以 12 h 为周期的规律性增大, 该周期性特征主要源于近地面温度和风速预报场的日变化特征: 文中通过计算不同起报时间的预报场检验指标的平均值得到评估结果, 而预报数据来源于每日 08 时和 20 时起报且日变化特征呈 12 h 位相相反的近地面温度和风速预报场(图略)。

2.1.2 降水预报检验

检验时段内 4 个阈值(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2012)24~84 h 预报时效内不同系统的 24 h 累计降水检验评分(图 4)表明, 高分辨率系统可有效提升降水概率预报的可识别性, 即 AROC。首先, 所有预报时效下的两个系统各阈值降水的 AROC 评分均高于 0.5, 表明不同系统对复杂地形降水概率预报均为正技巧; 其次, 各预报时效下 CMA-REPS 3 km 对不同阈值降水的 AROC 评分普遍高于 CMA-REPS 10 km, 且相较于 CMA-REPS 10 km, CMA-REPS 3 km 的 AROC 评分增幅最高可达 19%, 表明高水平分辨率区域集合模式具有更高的降水预报可识别性。

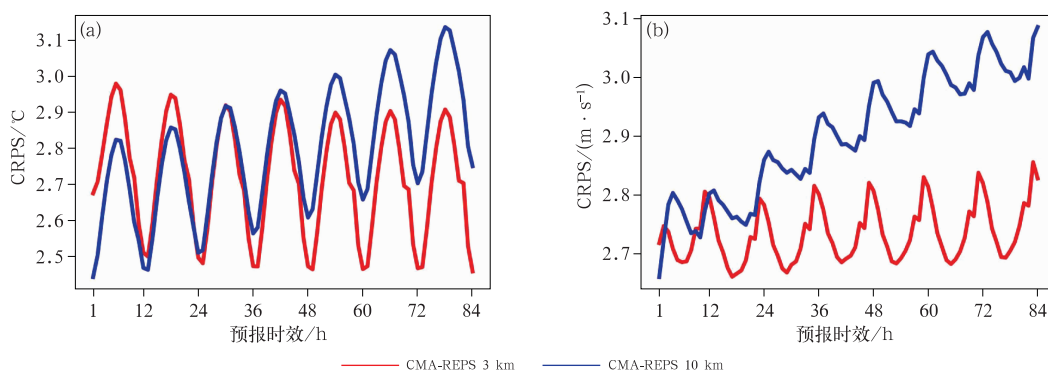


图 2 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 预报的 2023 年 6 月 1 日至

10 月 8 日浙江(a)2 m 温度和(b)10 m 风速的 CRPS 随预报时效的演变

Fig. 2 Evolution of CRPS with lead time for (a) 2 m temperature and (b) 10 m wind speed forecasted by CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

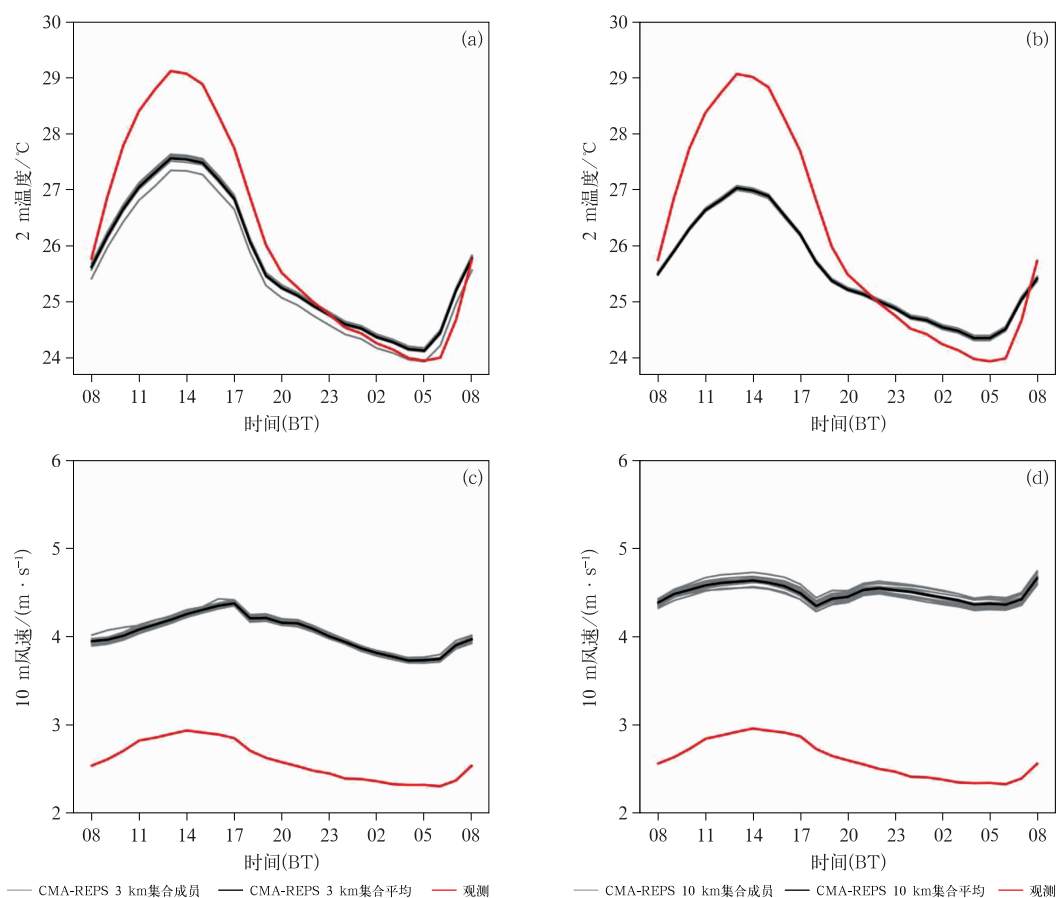


图 3 (a,c)CMA-REPS 3 km 和 (b,d)CMA-REPS 10 km 在 20 时起报的 12~36 h 预报时效的 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日浙江 (a,b)2 m 温度和 (c,d)10 m 风速与观测的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of (a, b) 2 m temperature and (c, d) 10 m wind speed forecasts with lead time 12–36 h initiated at 20:00 BT by (a, c) CMA-REPS 3 km and (b, d) CMA-REPS 10 km compared with observations in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

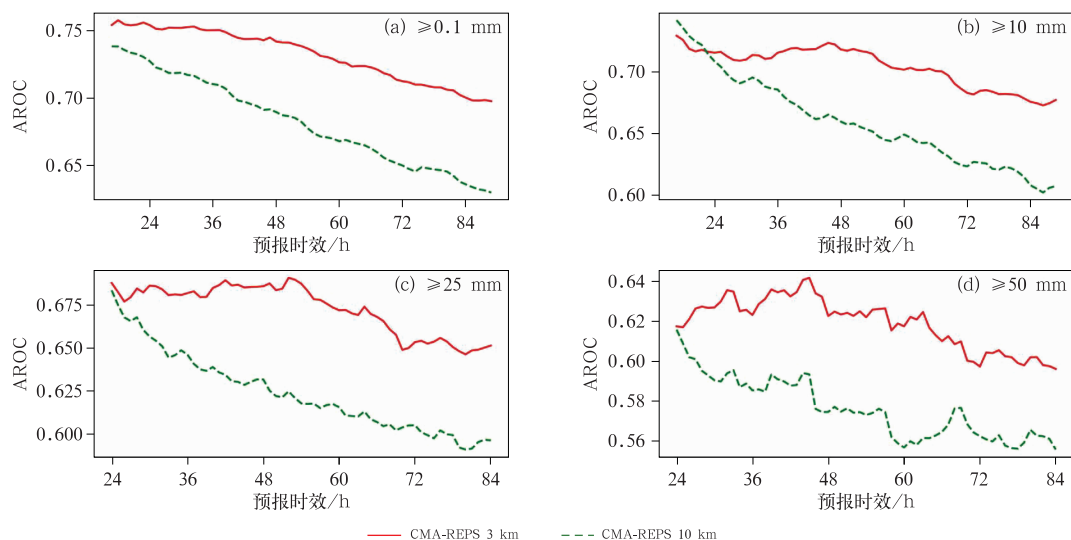


图 4 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 预报的 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日浙江不同降水阈值 24 h 累计降水量的 AROC 随预报时效的演变

Fig. 4 Evolution of AROC with lead time for 24 h accumulated precipitation under different thresholds forecasted by CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

此外,研究时段的日小时降水量呈单峰型(图 5),夜间降水量较大、白天降水量较小,峰值出现在 05 时,谷值出现在 14 时。各集成员在不同分辨率及不同起报时间下[08 时(图 5)与 20 时(图略)],均能有效捕捉夜间降水最强的单峰型分布特征,但存在系统性相位提前;CMA-REPS 3 km 的峰值与谷值分别出现在 04 时和 13 时,较观测提前 1~2 h;CMA-REPS 10 km 的峰值与谷值进一步提前至 03 时和 11 时,相位偏差达 2~3 h。值得注意的是,CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 具有更明显的降水日变化(CMA-REPS 3 km 集合平均预报的峰谷差值为 0.29 mm,CMA-REPS 10 km 为 0.07 mm),表明 CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 对午后至清晨的降水量存在系统性高估。

对于高分辨数值模式的降水预报,空间预报能力与量级预报能力同样重要。Roberts and Lean (2008)、刘雪晴等(2020)、李子良等(2021)常用邻域空间检验分数技巧评分比较预报和观测降水的频率覆盖率(刘志丽等,2022),从而评估集合预报系统的降水空间预报能力(图 6)。同一邻域半径下,CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 的各阈值降水 FSS 评分均随预报时效的延长呈 12 h 周期性下降,这一周期性同样与不同起报时刻下预报场的日变化特征有关(图略)。不同邻域半径下,CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 不同阈值降水 FSS 评分随空间尺度的增加而增大,随预报时效的增加而减小,综合分析表明 CMA-REPS 3 km 对强降水空

间预报能力更强。具体而言, ≥ 0.1 mm 阈值时,CMA-REPS 3 km 在不同时效、不同邻域半径下 FSS 低于 CMA-REPS 10 km; ≥ 10 mm 阈值时,24~36 h 预报时效小尺度(邻域半径 ≤ 30 km)CMA-REPS 10 km 占优,大尺度(邻域半径 > 30 km)CMA-REPS 3 km 更佳,但随着预报时效的增长,各邻域半径下的 CMA-REPS 3 km 的预报优势逐渐显著; ≥ 25 mm 阈值时,CMA-REPS 3 km 预报优势显著,各时效、各邻域半径下 FSS 评分更高; ≥ 50.0 mm 降水,在小尺度(邻域半径 ≤ 30 km)CMA-REPS 10 km 占优,大尺度(邻域半径 > 30 km)CMA-REPS 3 km 更佳,这一现象可能与插值误差有关:研究采用 10 km 分辨率预报插值到 3 km 分辨率网格的降尺度方案,会导致插值后降水场较为平滑,降水覆盖面广且容易命中,在小邻域半径下容易获得虚高的 FSS 评分。但这并不代表其捕捉中小尺度对流的能力更强,同时也佐证了高分辨率模式在局地刻画上有更细节的离散特征。

2.2 不同地形下的近地面要素预报能力对比

2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日共出现 3 次显著降水过程(小时降水格点观测降水量平均值的最大值超过 0.9 mm,且研究区域内 24 h 累计降水量超过 25.0 mm 的格点占比超过 8%),分别为 6 月 20—25 日梅汛期强降水(图略)、7 月 28 日至 8 月 1 日台风“杜苏芮”影响下的强降水(图略)以及 8 月 27 日至 9 月 16 日多股弱冷空气影响下的强降水

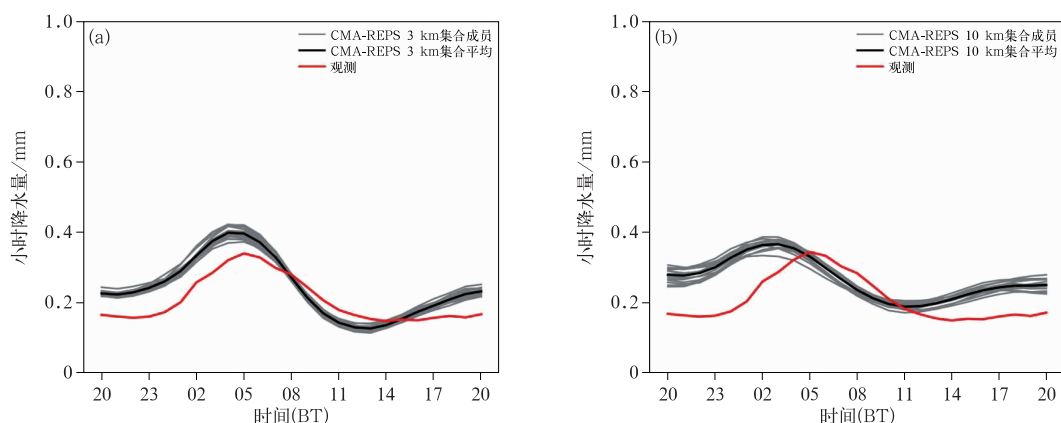


图 5 (a)CMA-REPS 3 km 和(b)CMA-REPS 10 km 在 08 时起报的 12~36 h

预报时效的 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日浙江小时降水量与观测的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of 1 h accumulated precipitation forecasts with 12–36 h lead time initiated at 08:00 BT by (a) CMA-REPS 3 km and (b) CMA-REPS 10 km compared with the observations in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

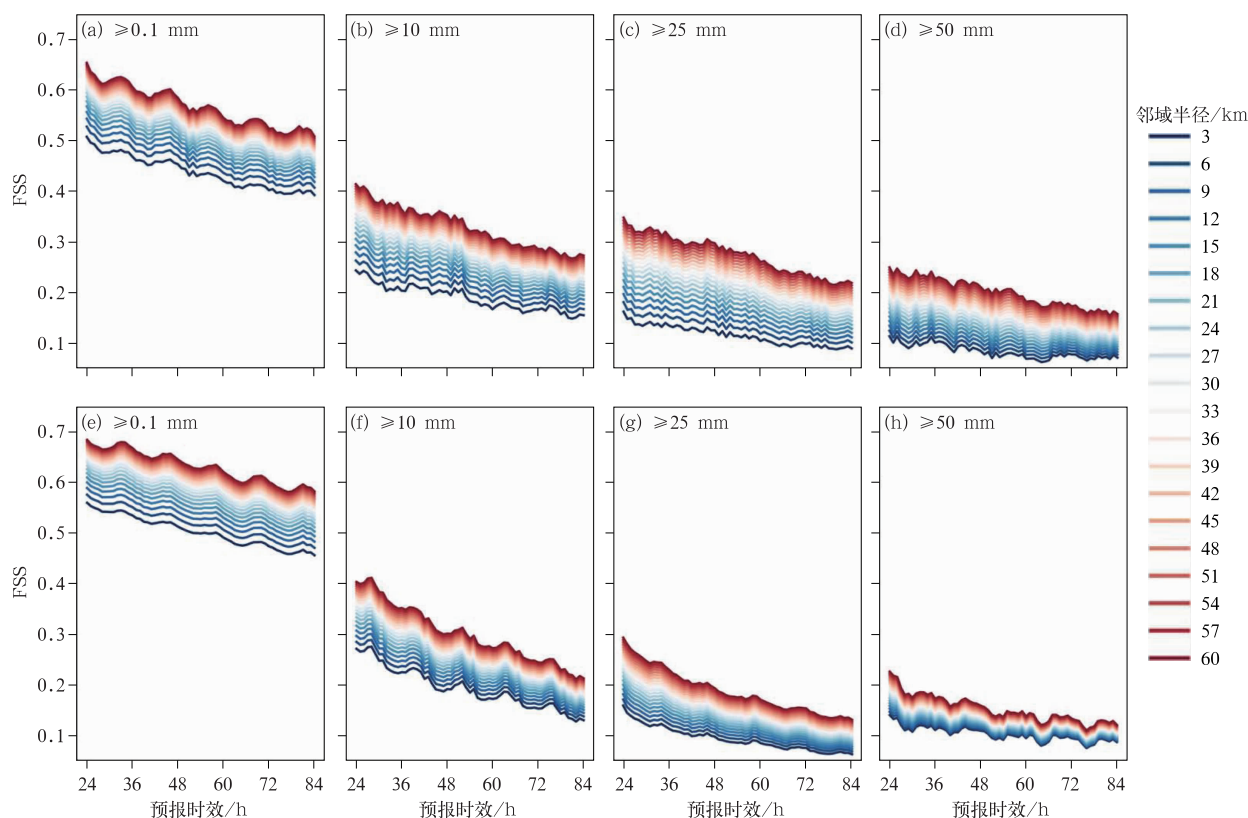


图 6 (a~d)CMA-REPS 3 km 和(e~h)CMA-REPS 10 km 预报的不同降水阈值下不同邻域半径的 2023 年 6 月 1 日至 10 月 8 日浙江 24 h 累计降水量 FSS 评分随预报时效的演变
Fig. 6 Evolution of 24 h accumulated precipitation FSS scores with lead time across different neighborhood radii under different thresholds forecasted by (a—d) CMA-REPS 3 km and (e—h) CMA-REPS 10 km in Zhejiang from 1 June to 8 October 2023

(图 7)。为揭示不同地形下不同系统对近地面要素的精细化预报特点,选择南北地形差异较大且强降

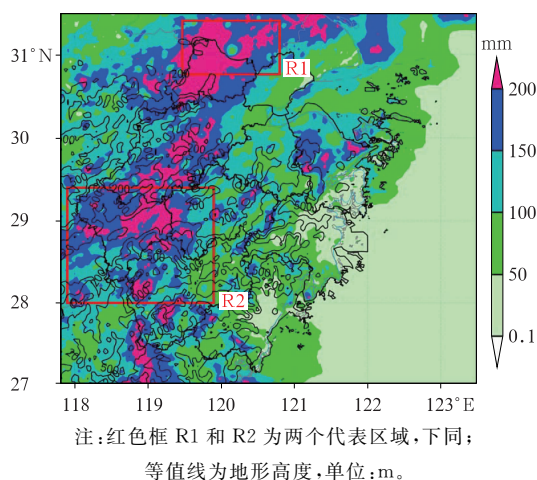


图 7 2023 年 8 月 27 日至 9 月 16 日浙江
累计降水量(填色)

Fig. 7 Accumulated precipitation (colored) in Zhejiang from 27 August to 16 September 2023

水落区同时覆盖的两个代表区域降水时段开展相关评估。北部平原区域($30.8^{\circ}\sim 31.4^{\circ}\text{N}$ 、 $119.5^{\circ}\sim 120.8^{\circ}\text{E}$; Region 1, 以下简称 R1 区域),主体位于太湖平原,地势低平;南部山地区域($28.0^{\circ}\sim 29.4^{\circ}\text{N}$ 、 $117.9^{\circ}\sim 119.9^{\circ}\text{E}$; Region 2, 以下简称 R2 区域)由丘陵、盆地和山地地形组成,区域北侧为浙西丘陵地,南部为浙南山地,南北区域由金衢盆地过渡,地势起伏相对较大。

2.2.1 不同地形下的近地面温度和风速预报检验

由图 8 可见,同一地形下,针对近地面温度和风速 CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 表现出更低的 RMSE 和 CRPS,表明高分辨率系统可有效降低近地面温度和风速的预报误差,提高预报技巧。不同地形下,相较于 CMA-REPS 10 km, R1 区域的 CMA-REPS 3 km 近地面温度的 RMSE、CRPS 评分下降幅度分别为 $0.5\%\sim 18.0\%$ 、 $1.2\%\sim 19.2\%$ (图 8a, 8c),近地面风速的 RMSE、CRPS 评分下降幅度分别为 $0.7\%\sim 16.4\%$ 、 $0.4\%\sim 12.6\%$ (图略); R2

区域的 CMA-REPS 3 km 近地面温度 RMSE、CRPS 评分下降幅度分别为 8.0%~38.0%、0.2%~17.9%(图 8b,8d),近地面风速的 RMSE、CRPS 评分下降幅度分别为 7.4%~23.0%、8.0%~23.1%(图略),CMA-REPS 3 km 对 R2 区域近地面温度和风速预报改进明显高于 R1 区域,表明高分率集合系统对山地区域近地面温度和风速的预报改进效果较平原更明显。

取不同分辨率区域集合预报系统在近地面温度和风速预报差异较大预报时刻(近地面温度取 78 h 预报时效,近地面风速取 30 h 预报时效)的集合平均 RMSE 和 Consistency 的空间分布进一步对比与分析。在近地面温度预报方面(图 9),首先,在 R1 和 R2 区域 CMA-REPS 3 km 都能较 CMA-REPS

10 km 明显降低空间集合平均 RMSE,有效提高 R1 和 R2 区域的近地面温度空间 Consistency;其次,相较于 CMA-REPS 10 km,不同地形下 CMA-REPS 3 km 对 R2 区域南部山地的 RMSE 下降幅度高于 R2 中部盆地和 R1 区域,最高可达 50.0%,但对 R2 区域北侧丘陵和南部山地的改善能力显著弱于 R1 区域和 R2 中部盆地。与温度相似,在近地面风速预报方面(图略),CMA-REPS 3 km 能较 CMA-REPS 10 km 明显降低空间集合平均 RMSE,在不同地形下 CMA-REPS 3 km 对 R2 北部丘陵和南部山地预报 RMSE 和 Consistency 的改善能力高于 R1 区域和 R2 中部盆地。

2.2.2 不同地形下的降水预报检验

在 2023 年 8 月 27 日至 9 月 18 日弱冷空气影

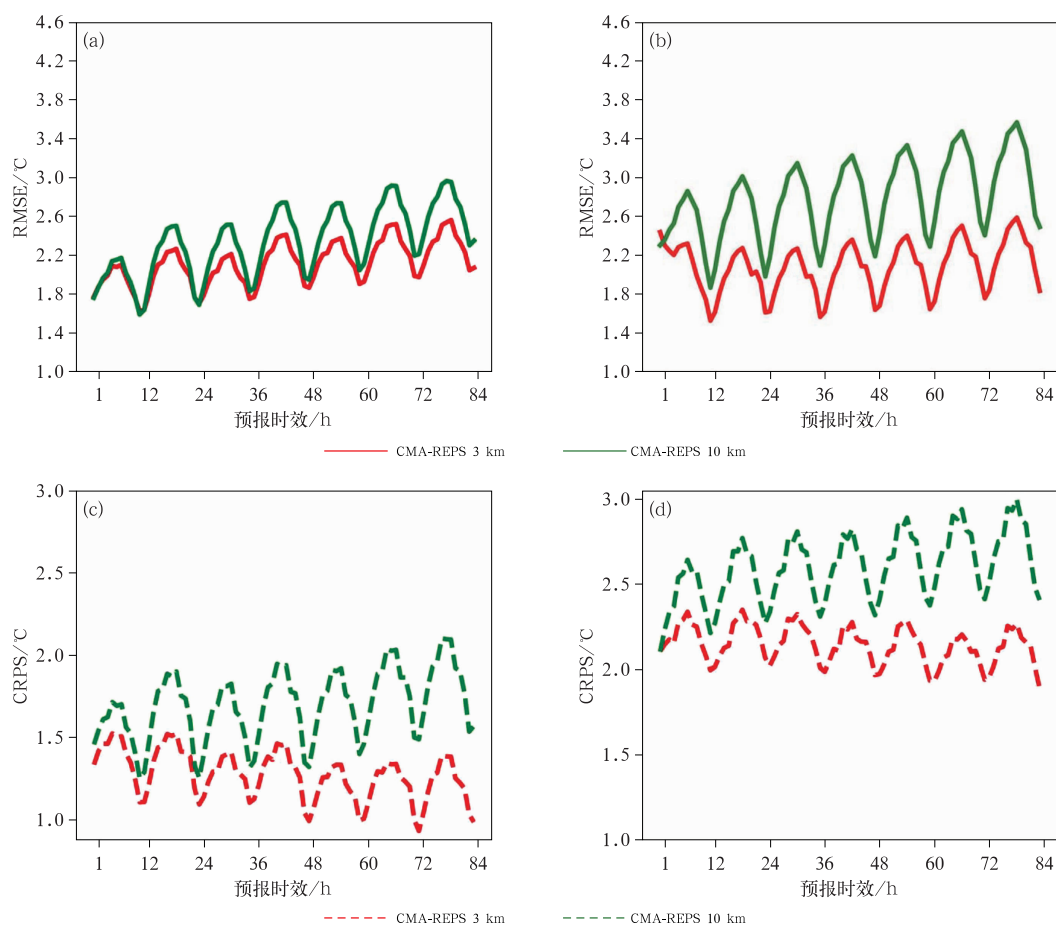
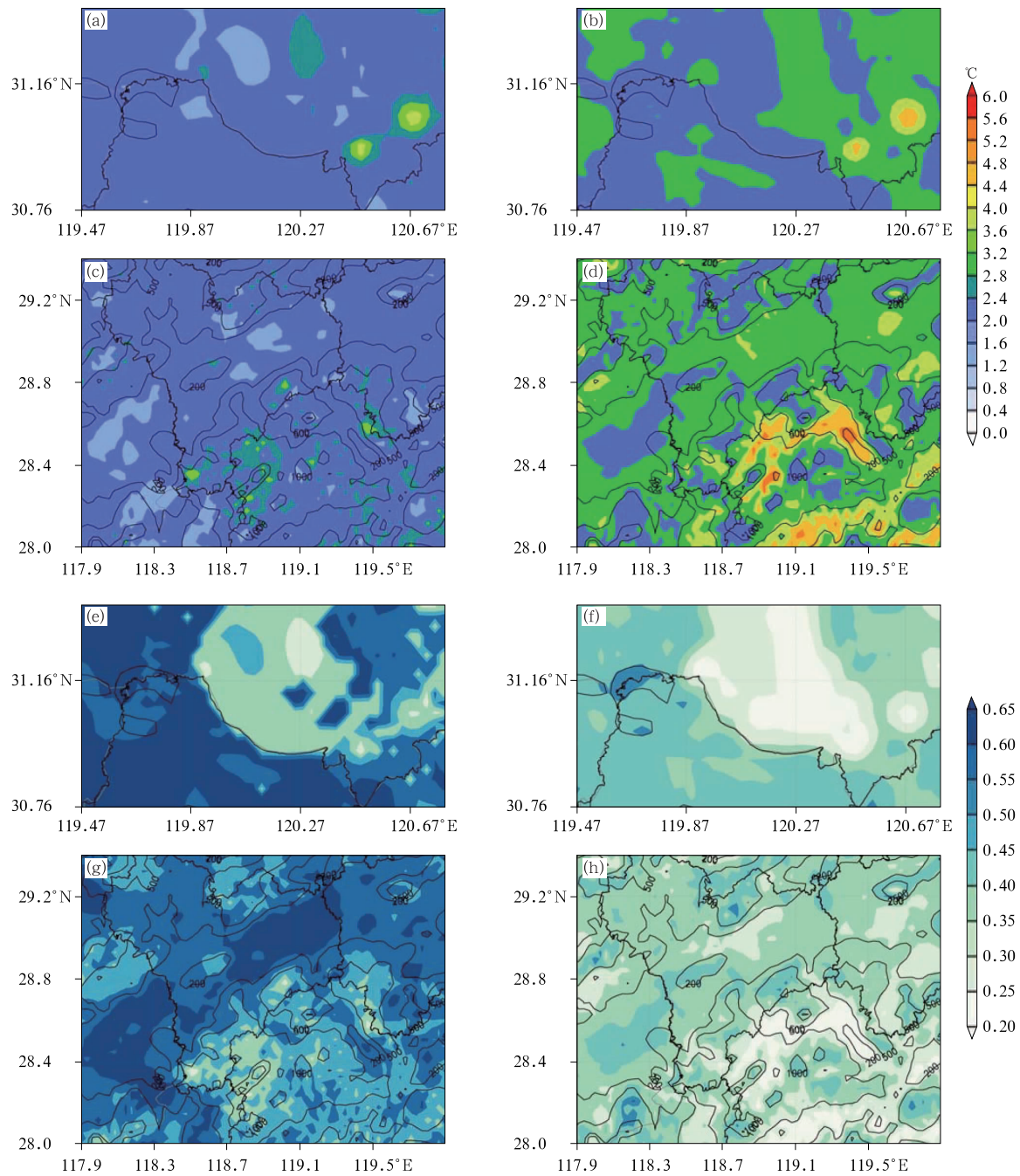


图 8 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 预报的 2023 年 8 月 27 日至 9 月 16 日浙江 (a,c)R1 区域和(b,d)R2 区域 2 m 温度(a,b)RMSE 和(c,d)CRPS 随预报时效的演变

Fig. 8 Evolution of (a, b) RMSE and (c, d) CRPS of 2 m temperature forecasts with lead time by CMA-REPS 3 km and CMA-REPS 10 km for sub-regions of (a, c) R1 and (b, d) R2 in Zhejiang from 27 August to 16 September 2023



注:等值线为地形高度,单位:m。

图 9 (a,c,e,g)CMA-REPS 3 km 和(b,d,f,h)CMA-REPS 10 km 对 2023 年 8 月 27 日至 9 月 16 日
浙江(a,b,e,f)R1 和(c,d,g,h)R2 区域 78 h 时效的 2 m 温度预报检验
(a~d)集合平均 RMSE,(e~h)Consistency

Fig. 9 Verification of 2 m temperature forecasts with 78 h lead time by (a, c, e, g) CMA-REPS 3 km
and (b, d, f, h) CMA-REPS 10 km for sub-regions of (a, b, e, f) R1 and
(c, d, g, h) R2 in Zhejiang from 27 August to 16 September 2023
(a—d) ensemble mean RMSE, (e—h) Consistency

响下的显著降水过程中,9 月 13 日 08 时至 16 日 08 时为降水集中时段,空间上降水集中在 R1 和 R2 两

个区域(图 10a),其中 R1 大部分区域 24 h 累计降水量观测平均值超过 45 mm,而 R2 区域超 35 mm 的区

域位于盆地和南部山地,超 45 mm 的降水量大值区主要分布在盆地和南部海拔超 500 m 的山地。对于 R1 区域的强降水,CMA-REPS 3 km(图 10b)与 CMA-REPS 10 km(图 10c)的 24 h 累计降水量预报平均值在降水落区和降水量级上预报差异较小;而对于 R2 区域,CMA-REPS 3 km(图 10b)较 CMA-REPS 10 km(图 10c)表现出更强的预报优势,即 CMA-REPS 3 km 对 R2 北部丘陵和中部盆地 30 mm 以上降水的落区精细化分布预报能力更强且预报量级与观测更接近,然而其虽对 R2 南部山地日均降水量超 25 mm 的落区有预报能力,但落区偏东南且量级依旧较观测偏小。

图 11 展示了两个系统不同成员在 R1 及 R2 区域逐 24 h 累计降水量综合预报技巧,可定量评估不同地形下的降水预报能力差异。基于预报准确性的

定量评估,在不同预报时效下 CMA-REPS 3 km 不同成员和集合平均较 CMA-REPS 10 km 的 TS 和 POD 均更高,且对于不同阈值的降水保持稳定的预报优势,表明高分辨系统有助于提升预报降水与观测的匹配度和命中率。其中,提升效果最明显的是 48 h 和 72 h 预报时效下的 ≥ 25 mm 及以上阈值降水; ≥ 25 mm 阈值的集合平均降水预报检验表明,48 h 时效下 R1、R2 区域的 CMA-REPS 3 km 预报 TS 和 POD 分别为 0.65 和 0.84、0.445 和 0.550, CMA-REPS 10 km 分别为 0.12 和 0.18、0.058 和 0.066;72 h 时效下 R1、R2 区域的 CMA-REPS 3 km 预报 TS 和 POD 分别为 0.145 和 0.150、0.192 和 0.207, CMA-REPS 10 km 分别为空值(NaN)和 0、0.001 和 0.002, CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 的 TS 和 POD 提升率均超过

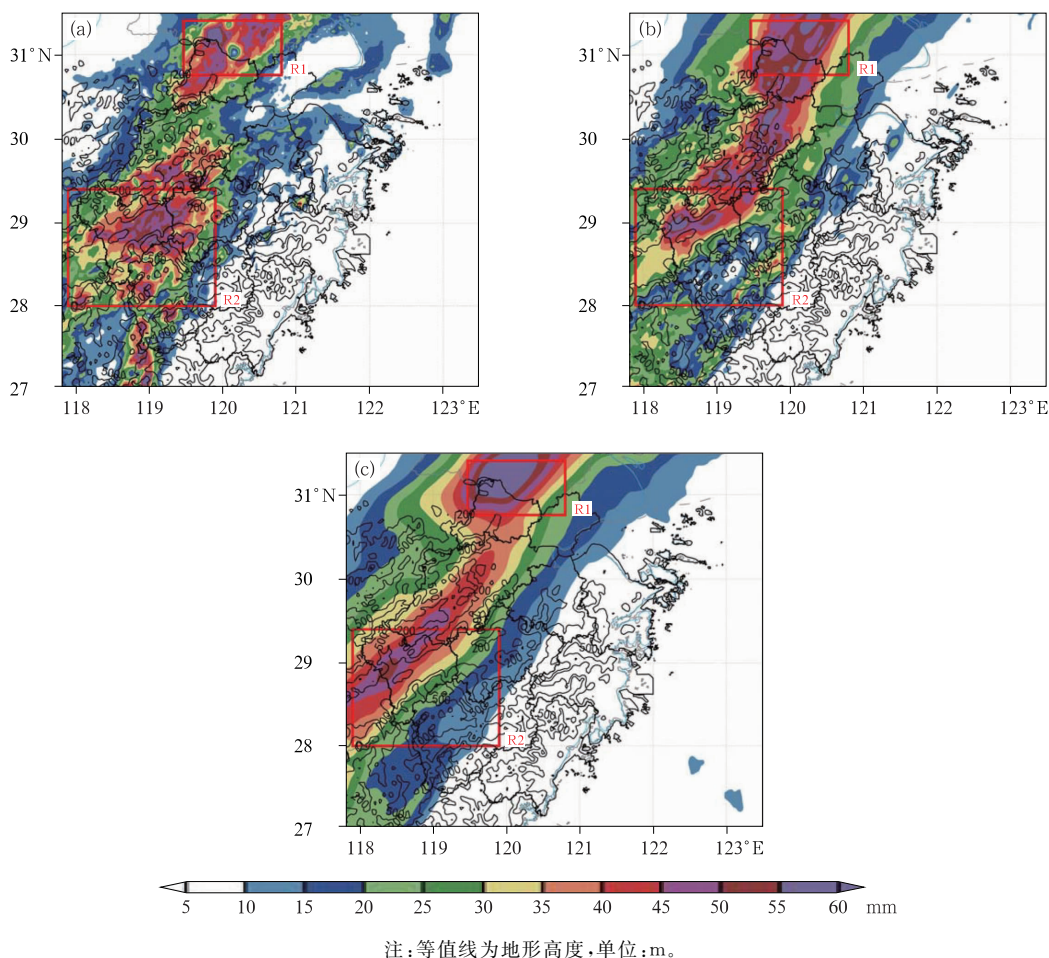


图 10 2023 年 9 月 13 日 08 时至 16 日 08 时浙江 24 h 累计降水量(a)观测平均值,
(b)CMA-REPS 3 km、(c)CMA-REPS 10 km 的 24 h 预报平均值

Fig. 10 (a) The observation and (b, c) forecast averages of 24 h accumulated precipitation by (b) CMA-REPS 3 km and (c) CMA-REPS 10 km in Zhejiang from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 16 September 2023

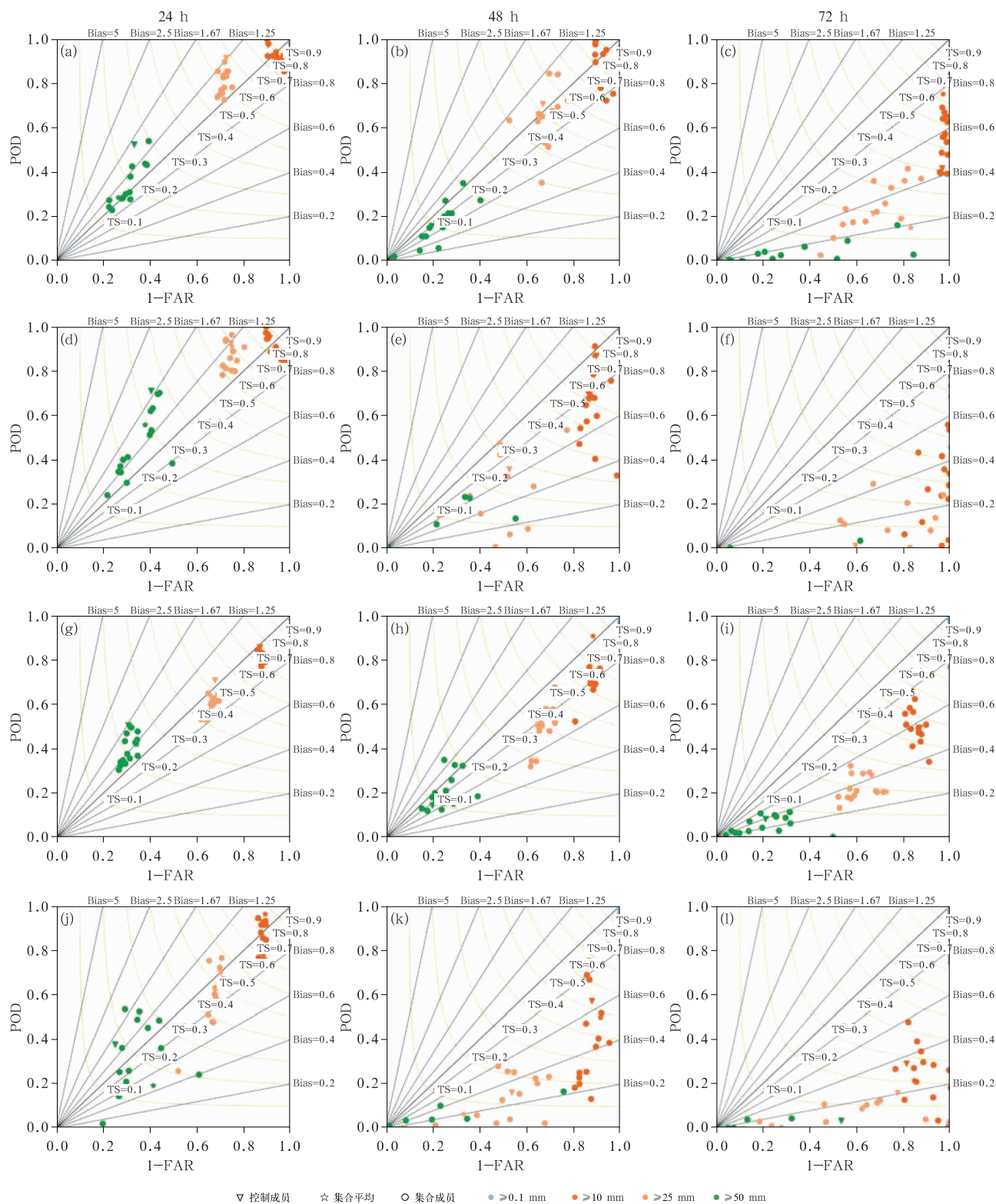


图 11 2023 年 9 月 13—16 日浙江(a~f)R1 区域和(g~l)R2 区域的(a~c, g~i)CMA-REPS 3 km, (d~f, j~l)CMA-REPS 10 km 的控制成员、集合成员和集合平均在不同预报时效的 24 h 累计降水量预报技巧综合图

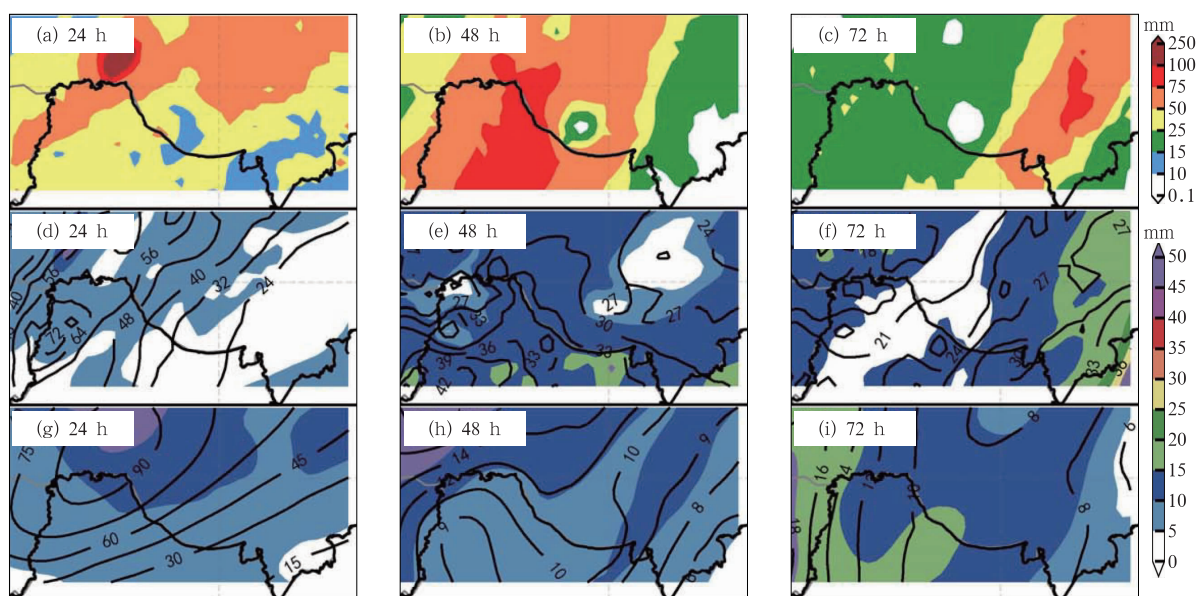
Fig. 11 Comprehensive verification of 24 h accumulated precipitation forecast skills of control members, ensemble members and ensemble mean with different lead times by (a~c, g~i) CMA-REPS 3 km and (d~f, j~l) CMA-REPS 10 km for sub-regions of (a~f) R1 and (g~l) R2 in Zhejiang from 13 to 16 September 2023

367.0%, R2 区域的提升率高于 R1 区域; ≥ 50 mm 阈值的集合平均降水预报检验表明, 不同预报时效下 CMA-REPS 3 km 的 TS 和 POD 分别为 0.006~0.11 和 0.012~0.15, 而 CMA-REPS 10 km 常为 0 或空值, 此外 CMA-REPS 3 km 在 R2 区域的得分均高于 R1 区域, 表明高分辨率集合系统可有效提高长预报时效下、地势起伏区域的大量级降水落区与观测的匹配度及预报命中率。

基于 Bias, 同一地形条件下, R1 区域(图 11a~11f) 24 h 时效下的 CMA-REPS 3 km 和 CMA-REPS 10 km 预报 Bias 评分整体大于 1, 但 CMA-REPS 3 km 评分散点更接近对角线, 24 h 预报时效下 CMA-REPS 10 km 降水预报范围较观测偏大, 而 CMA-REPS 3 km 可改善降水预报范围偏大的现象。48 h 预报时效下, CMA-REPS 3 km 不同成员的各阈值降水评分散点趋近对角线, 降水预报范围与观测趋近; 而 CMA-REPS 10 km 不同成员的 Bias 整体小于 1, 降水预报范围小于观测。72 h 预报时效下, 两个系统对不同阈值降水的 Bias 均以小于 1 为主, 说明 72 h 预报时效下降水预报范围小于观测, 但 CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 的评分散点更趋近于对角线和右上角, 降水预报效果更好; R2 区域(图 11g~11l)不同预报时效下的两

个系统的各阈值降水 Bias 普遍小于 1, CMA-REPS 3 km 的评分散点更接近对角线, 表明 R2 区域的降水预报范围较观测系统性偏小, 而 CMA-REPS 3 km 可改善降水预报范围偏小的现象, 此外, 不同预报时效下的 CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 评分散点更趋近于右上角。对于不同地形下的 ≥ 25 mm 降水, R2 区域 48 h 预报时效下 CMA-REPS 3 km (Bias 为 0.696) 较 CMA-REPS 10 km (Bias 为 0.200) 改进幅度为 62.00%; 72 h 预报时效下 CMA-REPS 3 km (Bias 为 0.274) 较 CMA-REPS 10 km (Bias 为 0.008) 改进幅度为 26.85%。R1 区域 48 h 预报时效下 CMA-REPS 3 km (Bias 为 1.135) 较 CMA-REPS 10 km (Bias 为 0.621) 改进幅度为 135.6%; 72 h 预报时效下 CMA-REPS 3 km 的 Bias 为 0.180, 而 CMA-REPS 10 km 评分为空值; ≥ 50 mm 时也存在相似的情况, CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 有更接近 1 的 Bias。由此, R2 区域 CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 对 ≥ 25 mm 以上降水的 Bias 改进能力优于 R1 区域。

而对于降水的不确定性演变和极值, 预报前期(24 h 预报时效)不同区域分辨率的集合预报在 R1 区域(图 12)的集合成员预报差异(即 Spread)较小,



注: 图 d~i 等值线为集合平均, 填色为 Spread, 单位: mm。

图 12 2023 年 9 月 13 日 08 时起报的不同预报时效浙江 R1 区域的 (d~f) CMA-REPS 3 km 和 (g~i) CMA-REPS 10 km 24 h 累计降水预报及 (a~c) 观测的空间分布

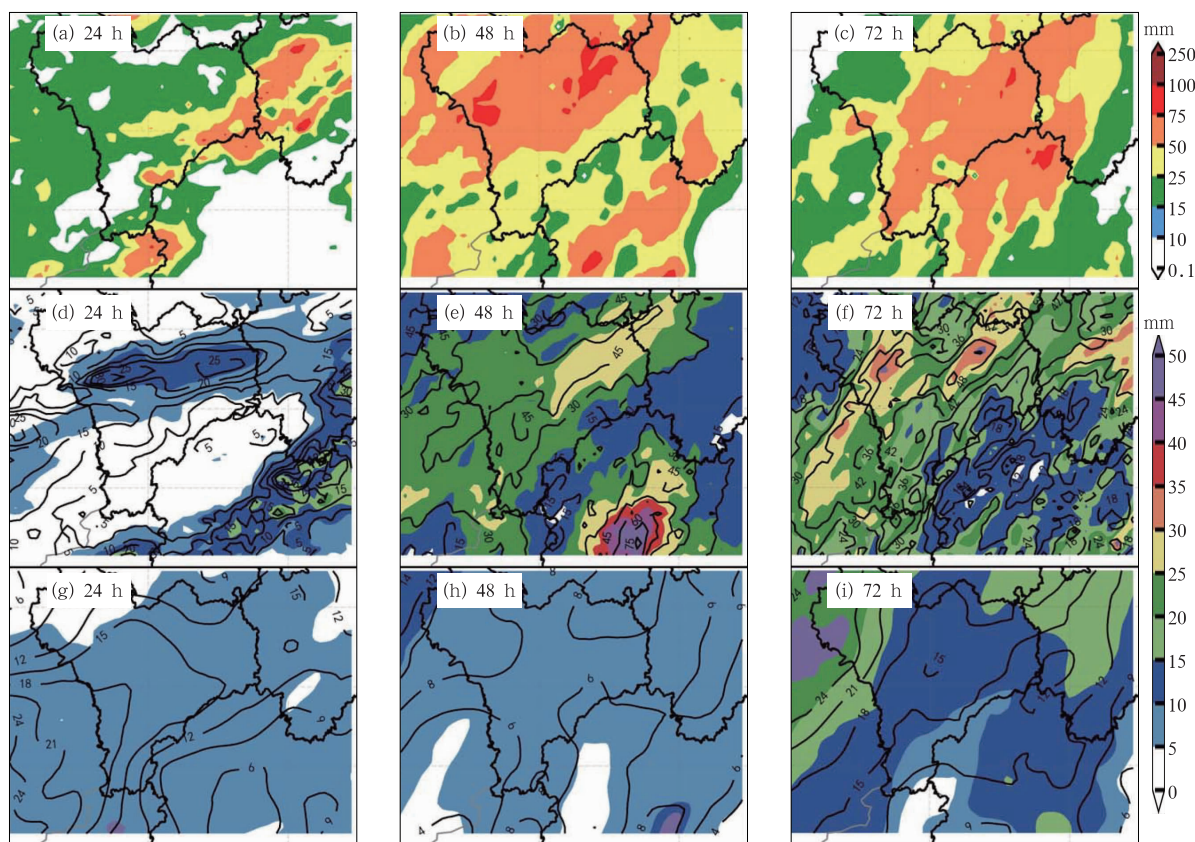
Fig. 12 Spatial distribution of (a~c) the observations and (d~f, g~i) the 24 h accumulated precipitation forecasts with different lead times by (d~f) CMA-REPS 3 km and (g~i) CMA-REPS 10 km for the R1 sub-region in Zhejiang initiated at 08:00 BT 13 September 2023

两个系统 $\text{Spread} > 5 \text{ mm}$ 的区域与强降水 ($> 25 \text{ mm}$) 落区相似, Spread 大值中心 ($> 45 \text{ mm}$) 与强降水中心 ($> 75 \text{ mm}$) 相近。随着预报时效的增长, R1 区域雨带和降水中心向东南方向移动, CMA-REPS 3 km Spread 增大, 雨带沿东南方向发展, 并在预报后期 (72 h 预报时效) Spread 大值区 ($> 20 \text{ mm}$) 与强降水 ($> 25 \text{ mm}$) 落区相近; 而 CMA-REPS 10 km 集合成员 Spread 虽有增长并有沿东南向移动的趋势, 但 Spread 大值区依旧位于 R1 区域西侧, 与观测差异较大。在 R2 区域 (图 13), 虽在预报早期 (24 h 预报时效) 两个系统 Spread 大值区与强降水落区空间分布差异较大, 但随着预报时效的增长, R2 区域 CMA-REPS 3 km 的 Spread 快速增长, Spread 大值区随雨带向东向南发展明显, 48 h 时 $\text{Spread} > 15 \text{ mm}$ 的区域与 50 mm 以上强降水落区几乎重合, 72 h 时 Spread 大值区与强降水落区接近且空间分布形态

相似; CMA-REPS 10 km 在 R2 区域从 24 h 到 48 h 预报时效 Spread 增长不明显, 虽在 72 h Spread 有所增长, 但 $\text{Spread} > 15 \text{ mm}$ 的区域较降水观测大值区偏西、偏北。整体而言, 相较于 R1 区域, CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 在地形更为陡峭的 R2 区域对雨带的发展、集合成员之间的预报差异以及降水大值落区的预报优势更大, 这也说明在地形陡峭区域发展高分辨率区域集合预报模式具有必要性。

3 结论与讨论

本文以浙江为研究区域, 针对暖季复杂地形下 CMA 不同分辨率区域集合预报系统对近地面温度、风速以及降水的预报误差特征和集合预报性能进行评估与分析。得到的主要结论如下:



注: 图 d~i 等值线为集合平均, 填色为 Spread , 单位: mm。

图 13 2023 年 9 月 13 日 08 时起报的不同预报时效浙江 R2 区域的 (d~f) CMA-REPS 3 km 和 (g~i) CMA-REPS 10 km 24 h 累计降水预报及 (a~c) 观测的空间分布

Fig. 13 Spatial distributions of (a~c) the observations and (d~f, g~i) the 24 h accumulated precipitation forecasts with different lead times by (d~f) CMA-REPS 3 km and (g~i) CMA-REPS 10 km for the R2 sub-region in Zhejiang initiated at 08:00 BT 13 September 2023

(1) CMA 不同分辨率区域集合预报系统所有成员均能有效把握近地面温度和风速的日变化特征,但高温预报系统性偏低,低温预报系统性偏高,风速预报存在普遍高估倾向。相较于 CMA-REPS 10 km, CMA-REPS 3 km 近地面温度和风速的连续等级概率评分更小,并且预报后期的离散度-技巧关系改进明显,但在预报前期离散度和离散度-技巧关系不如 CMA-REPS 10 km。

(2) 相较于 CMA-REPS 10 km, CMA-REPS 3 km 能有效提高集合预报降水预报的相对作用特征面积,增幅最高可达 19%,且每日降水量峰值及谷值的出现时间预报更准确,但对午后至清晨的降水量普遍会高估。此外, CMA-REPS 3 km 对强降水的空间预报能力更强, 36 h 以上预报时效下的 ≥ 10 mm 和各预报时效下的 ≥ 25 mm 及以上阈值在 30 km 以上邻域半径 FSS 评分优势明显。

(3) 不同地形下, CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 能有效降低近地面温度和风速的预报误差,提高降水准确性并改进不同阈值降水落区偏差。其中,概率预报误差和风速离散度-技巧关系在丘陵和山地区域较平原和盆地改进更大,而温度离散度-技巧关系在平原和盆地地区改进更大。此外, CMA-REPS 3 km 较 CMA-REPS 10 km 在地形更为陡峭的区域能更好地对雨带的发展、集合成员之间的预报差异以及降水大值落区的预报优势更大。

需要指出的是,由于两个系统在初始扰动方案上存在本质差异,因此,上述结论为两个业务系统的整体性能对比分析结果,其预报性能的差异是模式分辨率、物理过程与扰动方案共同作用的结果,而不仅仅是分辨率的贡献。此外,本文采用三次样条插值方案对低分辨率预报进行降尺度处理时,会引入插值误差,进而导致近地面要素预报的系统性高估、低估以及小尺度网格上的预报差异较小等问题,造成虚假的预报技巧。同时,上述结论仅为 2023 年 6—10 月暖季连续检验结果,缺乏冷季层状云降水或弱强迫等天气背景下的评估,不同天气背景下研究结论的适用性需进一步研究才可说明。此外, CMA-REPS 3 km 预报前期离散度较小的具体原因仅为结合文献的初猜,还需进一步从不同初始扰动方案的扰动结构、扰动振幅等多方面具体分析,同时, CMA-REPS 3 km 虽可改进预报后期离散度技巧关系但仍旧存在离散度不足的现象,而预报后期的集合预报技巧主要由模式和侧边界扰动发挥主要作用,因此后续还需开展两个集合系统的初始扰动

特征分析,以确定预报前期离散度差异来源,并进一步发展模式扰动、侧边界扰动以及地形扰动方案。另外,研究也指出近地面风速和温度预报的系统性偏差可能与原始地形数据在复杂地形区的固有误差以及插值滤波方案有关,因此在后续的 CMA-REPS 3 km 应用中需考虑地形偏差发展后处理订正算法,以进一步提高要素预报能力。还需指出的是,由于水平分辨率的提升, 3 km 集合预报的计算资源消耗及积分时长均高于 10 km,未来如何在保证高分辨率集合预报性能和业务时效性的同时,通过合理降低集合成员数等途径提高计算成本和收益比也是值得深思的问题。

参考文献

- 陈冬梅,马玉龙,李源,等,2023. 高分辨率地形资料应用对 CMA-MESO 模式地面气象要素的影响[J]. 气象学报, 81(6): 897-910. Chen D M, Ma Y L, Li Y, et al, 2023. The impact of high-resolution topographic data on the CMA-MESO model prediction of ground meteorological elements[J]. Acta Meteor Sin, 81(6): 897-910(in Chinese).
- 陈静,薛纪善,颜宏,2003. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报, 61(2): 203-218. Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation[J]. Acta Meteor Sin, 61(2): 203-218(in Chinese).
- 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).
- 陈静,朱跃建,段晚锁,等,2025. 集合预报进展、挑战及展望[J]. 气象学报, 83(3): 480-502. Chen J, Zhu Y J, Duan W S, et al, 2025. A review on development, challenges, and future perspectives of ensemble forecast[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 480-502(in Chinese).
- 陈良吕,吴钰,高松,2019. 对流尺度集合预报中模式地形扰动对其预报技巧的影响研究[J]. 暴雨灾害, 38(6): 649-657. Chen L L, Wu Z, Gao S, 2019. Study on the influence of model topography perturbation on prediction skill in a convection-allowing scale ensemble prediction system[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 649-657(in Chinese).
- 陈桥驿,臧威霆,毛必林,1985. 浙江省地理[M]. 杭州:浙江教育出版社. Chen Q Y, Zang W T, Mao B L, 1985. The Geograph of Zhejiang Province[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Press(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).

- 丁一汇,2008. 高等天气学[M]. 2版. 北京:气象出版社. Ding Y H, 2008. Advanced Synoptic Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(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).
- 李俊,王明欢,公颖,等,2010. AREM短期集合预报系统及其降水预报检验[J]. 暴雨灾害,29(1):30-37. Li J, Wang M H, Gong Y, et al, 2010. Precipitation verifications to an ensemble prediction system based on AREM[J]. Torr Rain Dis, 29(1):30-37(in Chinese).
- 李子良,赵滨,李国平,2021. 邻域空间检验技术在集合降水预报检验中的应用[J]. 大气科学学报,44(2):189-198. Li Z L, Zhao B, Li G P, 2021. An extended spatial verification technique for ensemble precipitation forecasts[J]. Trans Atmos Sci, 44(2):189-198(in Chinese).
- 刘侃,陈超辉,何宏让,2024. 对流尺度集合预报在复杂地形中的应用研究概述[J]. 气象科技进展,14(5):22-28, 70. Liu K, Chen C H, He H R, 2024. Application research of convective scale ensemble prediction in complex terrain[J]. Adv Meteor Sci Technol, 14(5):22-28, 70(in Chinese).
- 刘璐,冉令坤,周玉淑,等,2015. 北京“7. 21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J]. 大气科学,39(3):583-595. Liu L, Ran L K, Zhou Y S, et al, 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. Chin J Atmos Sci, 39(3):583-595(in Chinese).
- 刘雪晴,陈静,陈法敬,等,2020. 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验[J]. 大气科学,44(2):282-296. Liu X Q, Chen J, Chen F J, et al, 2020. Scale sensitivity experiments of precipitation neighborhood ensemble probability method[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2):282-296(in Chinese).
- 刘志丽, Duthia 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, Duthia 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).
- 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).
- 马雅楠,陈静,徐致真,等,2023. GRAPES对流尺度集合预报模式中不同尺度初始扰动能量的演变特征[J]. 大气科学,47(5):1541-1556. Ma Y N, Chen J, Xu Z Z, et al, 2023. Evolution characteristics of initial perturbation energy at different scales in convection-permitting ensemble prediction of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5):1541-1556(in Chinese).
- 倪悦,冯业荣,黄燕燕,等,2024. 基于CMA-TRAMS模式地形高度偏差的地面气温误差订正方法研究[J]. 热带气象学报,40(1):1-10. Ni Y, Feng Y R, Huang Y Y, et al, 2024. Study on surface temperature error correction method based on the terrain height deviation of CMA-TRAMS model[J]. J Trop Meteor, 40(1):1-10(in Chinese).
- 潘旸,谷军霞,宇婧婧,等,2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报,76(5):755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China [J]. Acta Meteor Sin, 76(5):755-766(in Chinese).
- 彭飞,李晓莉,陈静,等,2023. CMA全球集合预报系统误差增长及预报性能的尺度依赖特征诊断分析[J]. 气象学报,81(4):605-618. Peng F, Li X L, Chen J, et al, 2023. Diagnostic analysis on the scale-dependent features in error growth and forecast performance of the CMA global ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 81(4):605-618(in Chinese).
- 师春香,潘旸,谷军霞,等,2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报,77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):774-783(in Chinese).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社. Tao S Y, 1980. Torrential Rains in China [M]. Beijing: Science Press (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).
- 王婧卓,陈静,庄照荣,等,2018. GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征[J]. 大气科学,42(2):367-382. Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al, 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):367-382(in Chinese).
- 王婧卓,李红祺,陈静,等,2025. 高分辨率区域集合预报混合侧边界扰动方法研究[J]. 气象,51(9):1029-1045. Wang J Z, Li H Q, Chen J, et al, 2025. Research on the mixed lateral boundary perturbation method for high-resolution regional ensemble forecast [J]. Meteor Mon, 51(9):1029-1045(in Chinese).
- 王其伟,谈哲敏,2006. 我国主要地形上空理想定常流的流域分界分析[J]. 地球物理学报,49(4):971-982. Wang Q W, Tan Z M, 2006. Flow regimes for major topographic obstacles of China [J]. Chin J Geophys, 49(4):971-982(in Chinese).
- 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).
- 徐渊,闵锦忠,庄潇然,等,2024. 基于集合匹配尺度的邻域集合概率法及其在梅雨锋暴雨预报中的适用性[J]. 热带气象学报,40(2):313-325. Xu Y, Min J Z, Zhuang X R, et al, 2024. Neighborhood ensemble probability method based on ensemble agreement scale and its application on quantitative probability forecast of Meiyu frontal heavy rainfall[J]. J Trop Meteor, 40(2):313-325

- (in Chinese).
- 叶茂,陈良吕,王婧卓,2025.水平分辨率对CMA-REPS集合预报技巧的影响[J].气象,51(2):153-166. Ye M, Chen L L, Wang J Z, 2025. Impact of horizontal resolution on ensemble forecast skill of CMA-REPS[J]. Meteor Mon, 51(2):153-166(in Chinese).
- 曾礼,高艳红,蒋盈沙,等,2022.地形因子对华东地区降水影响的尺度效应研究[J].地球科学进展,37(5):535-548. Zeng L, Gao Y H, Jiang Y S, et al, 2022. Scale effects of terrain factors on precipitation in East China[J]. Adv Earth Sci, 37(5):535-548(in Chinese).
- 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 H B, Chen J, Zhi X F, et al, 2014. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 40(9):1076-1087(in Chinese).
- 张璐,庄潇然,闵锦忠,等,2025.基于对流尺度集合模拟的江淮暴雨预报不确定性来源分析[J].气象学报,83(2):286-303. Zhang L, Zhuang X R, Min J Z, et al, 2025. Understanding forecast uncertainties in convective-scale ensemble simulations of heavy rainfall cases in the Yangtze-Huai River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 83(2):286-303(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012.降水量等级:GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2012. Grade of precipitation: GB/T 28592—2012[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 庄潇然,2020.江淮地区强对流天气的对流尺度可预报性和集合预报方法研究[D].江苏:南京信息工程大学. Zhuang X R, 2020. Study on convective-scale predictability and ensemble approach over the Yangtze and Huai River basin[D]. Jiang Su: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 庄潇然,代刊,曾康,等,2026.利用生成对抗网络提升江淮地区强降水临近预报性能[J].气象,52(5):552-565. Zhuang X R, Dai K, Zeng K, et al, 2026. Using generative adversarial network to improve heavy precipitation nowcasting in the Jianghuai Area[J]. Meteor Mon, 52(5):552-565(in Chinese).
- 庄潇然,闵锦忠,蔡沅辰,等,2016.不同大尺度强迫条件下考虑初始场与侧边界条件不确定性的对流尺度集合预报试验[J].气象学报,74(2):244-258. Zhuang X R, Min J Z, Cai Y C, et al, 2016. Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary condition[J]. Acta Meteor Sin, 74(2):244-258(in Chinese).
- 庄潇然,闵锦忠,武天杰,等,2017.风暴尺度集合预报中不同初始扰动的多尺度发展特征研究[J].高原气象,36(3):811-825. Zhuang X R, Min J Z, Wu T J, et al, 2017. Development mechanism of multi-scale perturbation based on different perturbation methods in convection-allowing ensemble prediction[J]. Plateau Meteor, 36(3):811-825(in Chinese).
- Buizza R, 2008. The value of probabilistic prediction[J]. Atmos Sci Lett, 9(2):36-42.
- Friederichs P, Hense A, 2008. A probabilistic forecast approach for daily precipitation totals[J]. Wea Forecasting, 23(4):659-673.
- Huo Z H, Duan W S, Zhou F F, 2019. Ensemble forecasts of tropical cyclone track with orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations[J]. Adv Atmos Sci, 36(2):231-247.
- Li J, Du J, Xiong J, et al, 2021. Perturbing topography in a convection-allowing ensemble prediction system for heavy rain forecasts[J]. J Geophys Res Atmos, 126(14):e2020JD033898.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al, 1996. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 122(529):73-119.
- 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.
- Roebber P J, 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality [J]. Wea Forecasting, 24(2):601-608.
- Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. Research and operational development of numerical weather prediction in China [J]. J Meteor Res, 34(4):675-698.
- Wang J Z, Chen J, Ma Y N, et al, 2026. Sensitivity analysis of singular vectors (SVs) with diverse configurations and application of multiscale SV initial perturbations in convection-permitting ensemble prediction[J]. Atmos Res, 331:108683.
- Wang J Z, Chen J, Xue H L, et al, 2022. The roles of small-scale topographic perturbations in precipitation forecasting using a convection-permitting ensemble prediction system over southern China[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 148(746):2468-2489.
- Wang J Z, Chen J, Zhang H B, et al, 2023. Impacts of multiscale components of initial perturbations on error growth characteristics and ensemble forecasting skill[J]. J Appl Meteor Climatol, 62(11):1677-1692.
- Wang J Z, Zhang H B, Chen J, et al, 2024. Construction of multiscale initial perturbations and the associated impacts on convection-permitting ensemble forecasting[J]. Atmos Res, 297:107121.
- Wang J Z, Chen J, Chen F J, et al, 2025a. Interactions between initial and lateral boundary perturbations in convection-permitting ensemble prediction[J]. J Meteor Res, 39(1):116-131.
- Wang J Z, Zhang H B, Liu Y Z, et al, 2025b. The effects of moist physics on the singular vector downscaling initial perturbations in convection-permitting ensemble prediction[J]. J Appl Meteor Climatol, 64(12):1909-1929.
- Wendoloski E B, Stauffer D R, Suarez A, 2016. A subkilometer-gridlength ensemble for representing stable boundary layer forecast uncertainty over complex terrain[J]. Mon Wea Rev, 144(8):2769-2792.

(本文责编:何晓欢)