

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).

水平分辨率对 CMA-REPS 集合预报技巧的影响^{*}

叶 茂¹ 陈良吕¹ 王婧卓²

1 致灾降水数值模式与人工智能融合预报关键技术研究重点实验室, 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

提 要: 中国气象局地球系统数值预报中心目前正在研发 3 km 水平分辨率的区域集合预报系统, 鉴于西南地区复杂的地形和天气背景以及 CMA 区域模式在西南地区的降水预报产品适用性不强等问题, 拟在研发过程中重点关注提高 CMA 区域集合预报系统水平分辨率对西南地区降水预报的影响。鉴于此, 文章基于 CMA 区域集合预报系统设计水平分辨率为 3 km 和 10 km 的两组集合预报试验, 针对西南地区复杂地形下 2020 年 8 月四川盆地西部频繁的降水过程开展为期 25 d 的连续试验, 并对试验结果进行检验评估和对比分析。结果表明, 提高水平分辨率有助于增大各垂直层次的扰动能量, 更好地描述中小尺度波动的预报不确定性。由等压面和地面要素检验可知, 提高水平分辨率有助于增大集合离散度, 改进风场、温度和降水的概率预报技巧, 提高降水预报的准确率, 但 3 km 集合预报系统仍存在离散度明显不足的问题。强降水个例分析表明, 提高水平分辨率有助于更精细地模拟多尺度地形, 更准确地反映暴雨区的水汽条件和动力结构, 从而提升对强降水的预报效果。

关键词: 区域集合预报, 集合预报技巧, 水平分辨率, 西南地区

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122202

Impact of Horizontal Resolution on Ensemble Forecast Skill of CMA-REPS

YE Mao¹ CHEN Lianglü¹ WANG Jingzhuo²

1 Key Laboratory of Core Tech on Numerical Model-AI Integrated Forecast for Hazardous Precipitation,
Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

2 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: The CMA Earth System Modeling and Prediction Centre is currently developing a regional ensemble prediction system with a horizontal resolution of 3 km. In view of the intricate terrain and meteorological conditions in Southwest China, coupled with the limited efficacy of the precipitation forecast products from the CMA regional model in this particular area, it is intended to place a significant emphasis on the impact of enhancing the horizontal resolution of the CMA regional ensemble prediction system on the precipitation forecast performance for the southwestern region during the research and development phase. Considering the aforementioned, this study, grounded in the CMA regional ensemble prediction system, has formulated two ensemble forecast tests with horizontal resolutions of 3 km and 10 km, respectively. Focusing on the recurrent precipitation events in the western Sichuan Basin during August 2020, a 25-day continuous test was executed. The experimental results were subsequently evaluated and comparatively analyzed. The findings reveal that the augmentation of horizontal resolution contributes significantly to the escalation of perturbation energy within the vertical layers of the troposphere, and it facilitates a more

^{*} 中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSQ005)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0698)和重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202311、YWJSGG-202406)共同资助

2024 年 7 月 1 日收稿; 2024 年 12 月 22 日收修定稿

第一作者: 叶茂, 主要从事数值模拟研究. E-mail: ymyemao@163.com

precise delineation of the forecast uncertainties associated with mesoscale and smaller-scale waves. Evaluation based on isobaric surfaces and ground meteorological parameters demonstrates that increasing the horizontal resolution helps to amplify the ensemble spread, improve the probabilistic forecasting skill for wind field, temperature and precipitation, and elevate the precision of precipitation forecasts. Nonetheless, the 3 km ensemble prediction system still faces the problem of insufficient ensemble spread. The analysis of a heavy rainfall event shows that increasing the horizontal resolution facilitates more detailed simulation of multi-scale terrain and more accurate depiction of water vapor and dynamic structure in the rainstorm area, which in turn elevates the forecast performance for this event.

Key words: regional ensemble forecast, ensemble forecast skill, horizontal resolution, Southwest China

引 言

由于大气固有的混沌特性(Lorenz, 1963), 初始条件或预报模式的微小误差可能致使预报结果出现较大差异, 因此单一数值预报结果不可避免地存在不确定性(杜钧和陈静, 2010)。针对此问题, Leith (1974)提出了集合预报的思想, 通过一定的数学物理过程产生一组随机初始扰动, 将其叠加在模式初值上并进行数值积分, 得到一组预报值来估计未来状态的概率密度分布, 由此表征预报结果的不确定性。此后几十年, 集合预报技术不断发展, 理论与实际应用日益成熟, 在数值预报业务中发挥了重要作用(Schwartz et al, 2015; 邓国等, 2022; Fleury et al, 2022; Yang et al, 2023; Wang et al, 2023a)。

目前业务集合预报系统包括全球大尺度集合预报、区域中尺度集合预报及水平分辨率为 1~4 km 的对流尺度集合预报。随着对灾害性强天气预报需求的提高, 对流尺度集合预报受到越来越多的关注(Clark et al, 2016; Zhuang et al, 2021; Mori et al, 2021; Wang et al, 2023b)。庄潇然等(2017)和蔡沅辰等(2017)分别引入混合初始扰动方法和混合模式扰动方案进行对流尺度集合预报试验, 马雅楠等(2023)对比分析了不同尺度初始扰动能量的时空演变特征, 为构建适用于对流尺度集合预报系统的扰动场提供参考。陈良吕和高松(2023)针对一次暴雨过程开展对流尺度集合预报性能评估, 指出概率匹配平均预报以及 70% 和 80% 集合百分位预报产品更具有参考价值。陈涛等(2017)、Li et al(2017)针对极端暴雨过程、强飑线天气过程开展集合预报试验, 发现对流尺度集合预报能够提升降水预报准确率, 为强对流天气的预报预警提供重要支撑。

我国西南地区地处青藏高原东部, 囊括云贵高

原、武陵山脉、四川盆地等复杂地形, 加之高原低涡、西南低涡和切变线等系统影响, 西南地区暴雨频发, 易引起山体滑坡、泥石流、洪涝等灾害(黄楚惠等, 2020)。如 2020 年 8 月中下旬, 四川发生 4 次大范围暴雨天气过程, 引发 2091 起自然灾害, 造成 12 人失踪与死亡, 直接经济损失达 12.88 亿元(黄子立等, 2021)。由于强降水天气有限的可预报性以及西南地区复杂的地形和天气背景, 对西南地区强降水天气开展精细化预报一直是科研和业务中的难点。研究表明, 包括欧洲中期天气预报中心在内的多个数值模式对西南地区强降水的预报能力较东部平原明显偏弱(肖玉华等, 2010), 这可能与模式分辨率不足导致地形模拟偏差较大有关(江志红等, 2009)。

中国气象局地球系统数值预报中心经过多年的研发(谭燕和陈德辉, 2007; 田伟红和庄世宇, 2008), 于 2014 年实现了基于 CMA 模式的区域集合预报系统(CMA-REPS)的业务化(张涵斌等, 2014)。近 10 年来, 该系统不断优化升级(陈静和李晓莉, 2020), 预报性能不断提升。目前该系统的水平分辨率为 10 km, 连同控制预报共包含 15 个集合成员, 每日运行 2 次, 预报时效为 72 h, 除常规的确定性降水预报产品外, 还提供了大量的降水集合预报产品, 为西南地区的降水预报业务提供了重要的科学支撑。

为进一步提升 CMA-REPS 的预报性能, 中国气象局地球系统数值预报中心于 2023 年起开始研发 3 km 水平分辨率的区域集合预报系统, 拟于 2025 年汛期前投入业务运行。鉴于西南地区复杂的地形和天气背景以及中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)在西南地区的降水预报产品适用性不强等问题, 拟在研发过程中重点关注提高 CMA-REPS 分辨率对西南地区降水预报的影响。具体来说, CMA-REPS 的水平分辨率由 10 km

提升至3 km后,能否对集合扰动的发展、集合离散度的增长、降水集合预报概率密度函数分布等带来正面影响,并最终提高西南地区复杂地形下集合成员的确定性降水预报技巧及降水概率预报技巧?这值得进行系统性的研究。鉴于此,本文拟基于CMA-REPS设计水平分辨率为3 km和10 km的两组集合预报试验,针对2020年8月四川盆地西部频繁的降水过程进行为期25 d的连续试验,开展扰动特征分析、等压面和地面要素检验以及强降水个例分析,结合统计检验和天气学分析进一步认识CMA-REPS水平分辨率的提高对集合预报技巧的影响,为优化CMA-REPS在西南地区的降水预报性能提供参考。

1 试验方案与方法

1.1 集合预报试验方案

控制预报模式采用CMA-MESO V5.1,垂直方向共51层,模式层顶气压10 hPa。模式采用半隐式半拉格朗日差分方案、水平Arakawa-C网格点、垂直方向高度地形追随坐标和全可压非静力平衡动力框架,主要物理过程参数化方案包括WSM6云微物理方案、NMRF边界层方案、RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、Monin-Obukhov近地面层方案和Noah陆面过程方案。

设计水平分辨率为3 km和10 km的两组集合预报试验,其中3 km试验未采用积云对流参数化方案,10 km试验采用KF对流参数化方案。每组试验均包含15个集合成员,包括1个控制预报和14个集合扰动成员。控制预报的初值和侧边界通过水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的美国国家环境研究中心全球综合预报系统(NCEP-GFS)模式的初值场和预报场动力降尺度获得,逐6 h更新一次侧边界数据。为表征集合预报的初值不确定性和侧边界条件不确定性,首先提取水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的中国气象局全球集合预报系统(CMA-GEPS)中集合成员相对于自身控制预报的扰动场,扰动变量为纬向风 u 、经向风 v 和温度 T ,然后将扰动场与NCEP-GFS提供的初值场和预报场相叠加,最后通过动力降尺度方法形成集合成员的初值和侧边界条件。在该过程中,初始扰动和侧边界扰动均来自CMA-GEPS,一定程度上避免了二者间的不协调,可减少

不连续和虚假波动的影响(Caron, 2013; 谭燕等, 2022)。为表征模式的不确定性,采用了随机物理过程倾向扰动方案(SPPT),对模式物理过程参数化方案的净倾向进行随机扰动,从而提高集合离散度和概率预报技巧(袁月等, 2016)。

集合预报试验的积分区域为($20^\circ \sim 38^\circ \text{N}$, $96^\circ \sim 120^\circ \text{E}$),涵盖青藏高原东部至中国东部地区。试验时段为2020年8月1日00时(世界时,下同)至25日12时,期间四川盆地西部受频繁降水影响,引发内涝、山体滑坡和洪水等灾害(Hu et al, 2021),尤其在8月10—13日和15—18日出现了持续性特大暴雨过程,导致了50年一遇的洪涝天气(周春花等, 2023)。模式每日于00时和12时启动,预报时效为48 h,模式结果输出的时间间隔为1 h。

1.2 资料与研究方法

为综合分析水平分辨率的提高对集合预报技巧的影响,对比分析了两组试验的扰动特征、等压面和地面要素的预报效果,并针对典型强降水个例开展天气学分析。采用的模式数据包括两组试验的静态地形高度场,以及逐日00时和12时起报的0~48 h的等压面和近地面风场和温度场、等压面湿度场、降水数据;实况降水采用试验时段内四川盆地及周边地区($26^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $99^\circ \sim 108^\circ \text{E}$)9100多个地面自动气象站的12 h累计降水数据;地形参考场采用美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供的ETOPO数据,水平分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 。

两组试验的扰动特征分析包括扰动能量和动能谱分析;等压面和近地面连续变量的检验采用整个预报范围内控制预报的初始时刻分析场(即模式积分0 h的初值场)为实况参考场,检验指标采用集合离散度、均方根误差(RMSE)和连续分级概率评分(CRPS);降水检验采用的指标包括成功指数(TS)、预报偏差(BIAS)、空报率(FAR)、命中率(POD)、Talagrand分布和相对作用特征曲线面积(AROC)评分。批量试验的检验结果均来自试验时段内逐日00时和12时预报(共计50个时次)的统计平均。

1.2.1 扰动能量

扰动能量是对集合离散度的度量,采用Palmer et al(1998)提出的适用于天气预报研究的集合扰动总能量 E_{DT} 开展分析,其表达式为:

$$E_{DT} = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) + \frac{c_p}{T_r} T'^2 \quad (1)$$

式中: u' 、 v' 、 T' 分别表示纬向风、经向风和温度的集合成员预报与集合平均的差值, T_r 为参考温度, c_p 为干空气的定压比热容。

1.2.2 动能谱

动能谱分析可有效描述数值模式所能识别的尺度信息。将二维离散余弦变换(2D-DCT)应用到有限区域气象场开展谱分解(郑永骏等, 2008), 得到二维气象场的功率谱 $S(k)$ 表达式为:

$$S(k) = S(\tilde{k}) \cdot \left(\frac{\pi}{\Delta}\right)^{-1} \cdot \left[\frac{\tilde{k}+1}{\min(M-1, N-1)} - \frac{\tilde{k}}{\min(M-1, N-1)}\right]^{-1} \\ = S(\tilde{k}) \cdot \frac{\Delta}{\pi} \cdot \min(M-1, N-1) \quad (2)$$

式中: $\tilde{k}=1, 2, \dots, \min(M-1, N-1)-1$; M 和 N 分别表示经向和纬向的格点总数, Δ 表示格距, k 代表采用圆频率表示的波数, $S(\tilde{k})$ 表示波数 $k \in \frac{\pi}{\Delta}$ 。

$\left[\frac{\tilde{k}}{\min(M-1, N-1)}, \frac{\tilde{k}+1}{\min(M-1, N-1)}\right]$ 区间的方差和。

水平动能谱定义为 $E(k) = \frac{1}{2}[S_u(k) + S_v(k)]$,

其中 $S_u(k)$ 和 $S_v(k)$ 分别代表纬向风和经向风的功率谱。

1.2.3 集合离散度和均方根误差

集合离散度用于衡量集合预报成员的发散程度, 一定范围内的离散度越大, 越能表征真实大气的各种可能性。设研究区域内经向和纬向的格点总数分别为 M 和 N , 集合成员数为 O , 集合成员预报场为 $f_{\text{men}}(i, j)$, 集合平均为 $\overline{f(i, j)}$, 则集合离散度 Spread 的表达式为:

$$\text{Spread} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{1}{O} \sum_{\text{men}=1}^O [f_{\text{men}}(i, j) - \overline{f(i, j)}]^2} \quad (3)$$

RMSE 用于检验预报场与分析场之间的差异, 值越大说明预报误差越大。设预报场为 $F(i, j)$, 相应的分析场为 $A(i, j)$, 则 RMSE 表达式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i, j) - A(i, j)]^2} \quad (4)$$

对于一个理想的集合预报系统, 集合成员的离散度应与集合平均的预报误差相当, 二者的比值(即

一致性)近似于 1。

1.2.4 连续分级概率评分

CRPS 可定量比较预报与观测的累积分布概率之间的差异(Hersbach, 2000), 用于衡量集合预报概率预报技巧。CRPS 的理想值为 0, 值小说明概率预报技巧越高, 其表达式为:

$$\text{CRPS} = \int_{-\infty}^{\infty} [P(x) - P_a(x)]^2 dx \quad (5)$$

式中: $P(x)$ 和 $P_a(x)$ 分别表示概率预报和观测真值的累积分布。

1.2.5 降水预报技巧综合图

TS 评分用以衡量预报降水与观测降水之间的匹配度, 取值范围为 0~1, 评分越高说明预报准确率越高; BIAS 评分表示预报降水与观测降水的偏差, 理想值为 1, 评分大于(小于)1 说明预报的降水范围大于(小于)观测; POD(FAR)的值介于 0~1, 评分越高说明命中率(空报率)越高。

Roebber(2009)指出 TS、BIAS、POD 和 FAR 存在如下关系:

$$\text{TS} = \frac{1}{\frac{1}{1-\text{FAR}} + \frac{1}{\text{POD}} - 1} \quad (6)$$

$$\text{BIAS} = \frac{\text{POD}}{1-\text{FAR}} \quad (7)$$

基于式(6)和式(7), 可用一张图综合描述 TS、BIAS、POD 和 FAR, 以此更直观和全面地表征降水预报技巧。

1.2.6 Talagrand 分布

Talagrand 分布用于检验集合预报系统概率分布情况。假设集合预报系统的成员数为 N , 对每个格点上的 N 个预报值按升序排列得到 $(N+1)$ 个区间, 分别计算实况分布在 $(N+1)$ 个区间的概率, 绘制为柱状图即为 Talagrand 分布(Talagrand et al, 1997)。对于一个理想的集合预报系统, Talagrand 分布平直, 即实况落在各等级区间的概率相同。

1.2.7 AROC 评分

AROC 评分用于衡量集合预报系统辨别特定阈值事件是否发生的能力。将 0~1 划分为一系列不同的概率区间, 以每个概率区间对应的命中率为纵轴、空报率为横轴绘制曲线(ROC 曲线), 该曲线与横轴所围面积即为 AROC。AROC 的取值范围为 0~1, 值为 1 说明预报完美, 值为 0.5 及以下说明预报无技巧。

2 扰动特征对比分析

扰动分布与增长特征可体现集合预报系统对预报不确定性的描述能力,故首先结合扰动能量和动能谱开展分析,来揭示水平分辨率的提高对集合预报系统扰动演变特征的影响。图1为研究时段内两组试验集合成员平均扰动能量垂直分布。由图1a可看出,两组试验初始时刻的扰动总能量相当,其数值均较小,这是因为CMA-GEPS本身在初始时刻的扰动总能量较小(图略)。随预报时效延长,两组试验的扰动总能量逐渐发展,其中3 km试验的增长更明显,在之后预报时效的各层次扰动总能量均高于10 km试验,如在975 hPa和200 hPa上,3 km试验在0~48 h的能量增幅分别为 $4.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $9.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,而10 km的能量增幅分别为 $4.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明提高水平分辨率有助于增大集合离散度,可以更有效地捕捉到预报的不确定性。同时发现两组试验的扰动总能量在各个预报时效的垂直分布不均匀,峰值出现在急流轴附近的200 hPa,次峰值位于975 hPa。结合扰动动能的垂直分布(图1b)分析扰动总能量来源,在对流层中高层,扰动总能量和扰动动能的分布特征和数值较为一致,说明扰动总能量主要来自扰动动能的贡献;在

对流层低层,扰动动能的数值相对扰动总能量偏小,说明此时扰动内能对总能量亦有较大贡献,这一现象在近地面层更明显,可能和地表与大气辐射交换、感热与潜热输送等引起的热量明显变化有关(王婧卓等,2018)。

进一步分析不同水平分辨率的集合预报系统所能识别的尺度信息,采用2D-DCT对扰动场进行谱分解。图2a为两组试验集合成员平均的850 hPa动能谱分布,扰动波谱能量随预报时效延长而增大,说明两组试验均能较好描述不同尺度波动的预报不确定性。两组试验所能识别的最小尺度分别约6 km和20 km,即均约为自身水平分辨率的2倍,这与Skamarock(2004)的研究结果一致。随着水平尺度增大,扰动波谱能量逐渐增大,在100 km以上波长范围内,10 km试验的扰动波谱能量更高;在100 km及以下波长范围内,3 km试验的扰动波谱能量更高,且能捕捉到10 km以下波段的扰动波谱能量。为了更直观地分析中小尺度扰动的演变特征,通过2D-DCT获得两组试验在100 km以下水平尺度范围内的 u' 、 v' 、 T' ,结合式(1)计算850 hPa上该尺度范围内的扰动总能量随预报时效的演变(图2b)。两组试验在初始时刻的扰动能量近乎为零,这是因为CMA-GEPS(水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)几乎不能识别100 km以下尺度范围内的信息,因此动力降

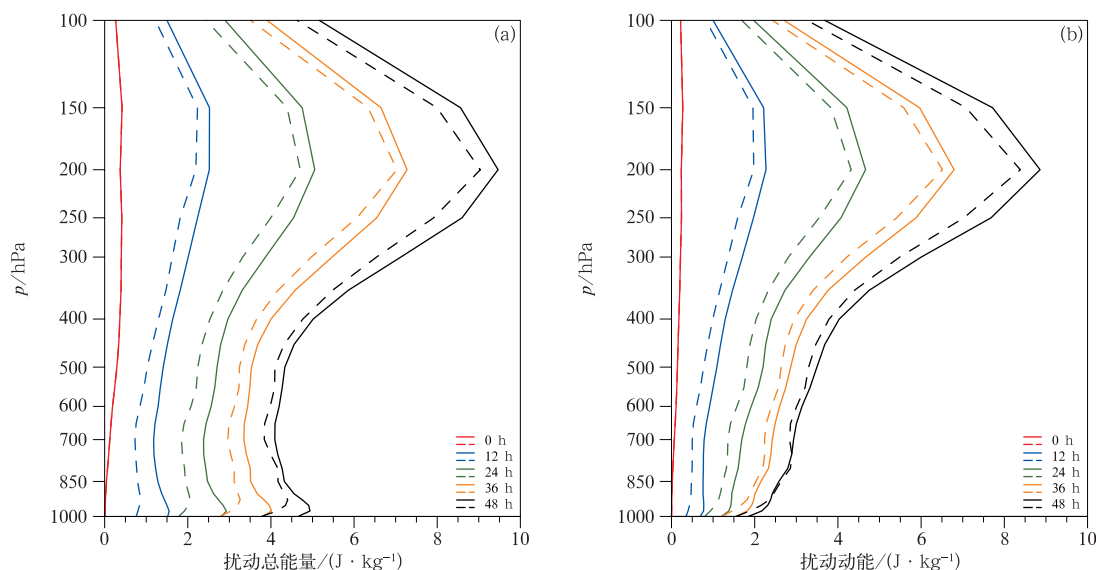


图1 2020年8月1日00时至25日12时3 km试验(实线)和10 km试验(虚线)集合成员平均的
(a)扰动总能量和(b)扰动动能垂直分布

Fig. 1 Vertical distributions of (a) perturbation total energy and (b) perturbation kinetic energy of ensemble mean in 3 km test (solid line) and 10 km test (dashed line) from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

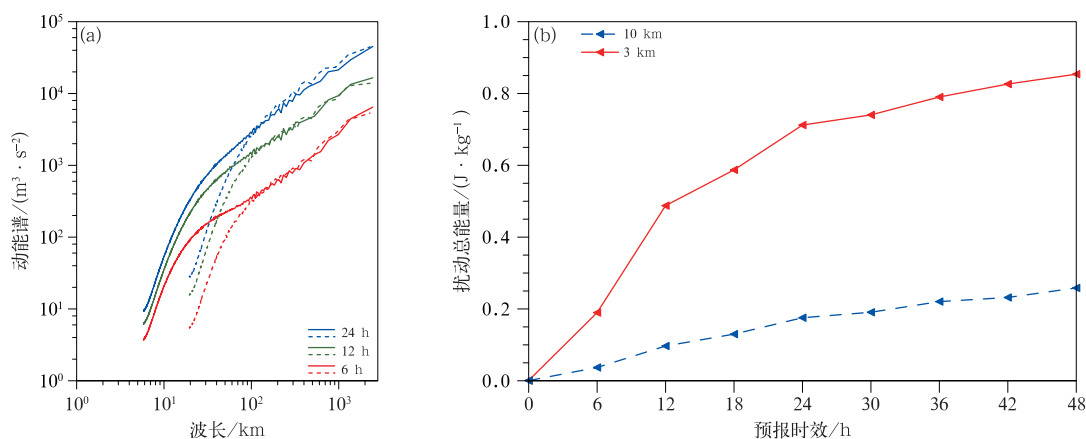


图 2 2020 年 8 月 1 日 00 时至 25 日 12 时 850 hPa 上 3 km 试验(实线)和 10 km 试验(虚线)集合成员平均的(a)动能谱分布和(b)100 km 以下尺度范围内的扰动总能量随预报时效的演变

Fig. 2 (a) Distribution of ensemble mean kinetic energy spectrum and (b) variation of ensemble mean perturbation total energy within scale of 100 km with forecast lead time at 850 hPa in 3 km test (solid line) and 10 km test (dashed line) from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

尺度初值扰动方法难以在初始时刻产生该尺度范围内的扰动能量。随后扰动能量逐渐发展,3 km 试验的增长速度明显大于 10 km,说明提高水平分辨率有助于获得更多的中小尺度扰动能量,更好地描述中小尺度波动的预报不确定性。

3 集合预报检验

3.1 等压面和近地面要素检验

图 3 为两组试验中 10 m 纬向风、经向风和 2 m 温度以及 850、500、200 hPa 的纬向风、经向风、温度的集合平均 RMSE 和集合离散度随预报时效的演变。整体而言,两组试验中水平风场、温度场的集合离散度和集合平均 RMSE 随预报时效的增长趋势一致,能够表征预报的不确定性,但集合离散度的数值明显小于 RMSE,说明集合预报成员存在欠发散的问题。进一步对比不同水平分辨率的试验结果,对于纬向风和经向风,3 km 试验的 RMSE 整体更小,同时风场集合离散度更大,即集合预报一致性更接近 1,说明系统可靠性更高,尤其是对近地面层(图 3a,3b)和对流层低层风场(图 3d,3e)改进明显。对于近地面温度场(图 3c),3 km 试验提高了集合离散度,但集合平均 RMSE 有所增长,对比两组试验的控制预报 RMSE 发现亦存在这一问题(图略),这可能和 CMA-MESO 模式固有的系统性误差、模式采用的物理过程(如边界层方案、辐射方案等)有关;

对于等压面温度场,3 km 试验改善了集合平均 RMSE 和集合离散度的关系,具体表现为在 850 hPa 提高了温度集合离散度(图 3f),在 500 hPa 对温度离散度和 RMSE 均有改善(图 3i),在 200 hPa 明显减小了 RMSE(图 3l),即在各层次的集合预报一致性均更接近 1。

由两组试验中等压面和近地面的风场和温度的 CRPS 时序图(图 4),除 2 m 温度外,3 km 试验的 CRPS 整体低于 10 km 试验,说明风场和温度的概率预报技巧有所提升,但对于不同层次的不同变量,3 km 试验的改进效果存在差异:对于 10 m(图 4a,4b)和 850 hPa(图 4d,4e)风场,3 km 试验的 CRPS 在大多时机明显低于 10 km 试验,而对于 500 hPa(图 4g,4h)和 200 hPa 的风场(图 4j,4k),CRPS 的降低幅度相对较小;对于等压面温度场(图 4f,4i,4l),3 km 试验的 CRPS 整体低于 10 km 试验,这一改进效果随垂直层次的升高逐渐提高,200 hPa 上不同预报时效的 CRPS 降低幅度均超过 35%。综合图 3 和图 4,提高水平分辨率有助于改进风场和温度的预报效果,尤其对近地面和对流层低层的风场、对流层高层的温度改进明显。

3.2 降水检验

参考国家标准 GB/T 28592—2012(中国气象局,2012),分别以 0.1、5、15、30、70、140 mm 为阈值,将 12 h 累计降水量划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨,针对四川盆地及周边地区

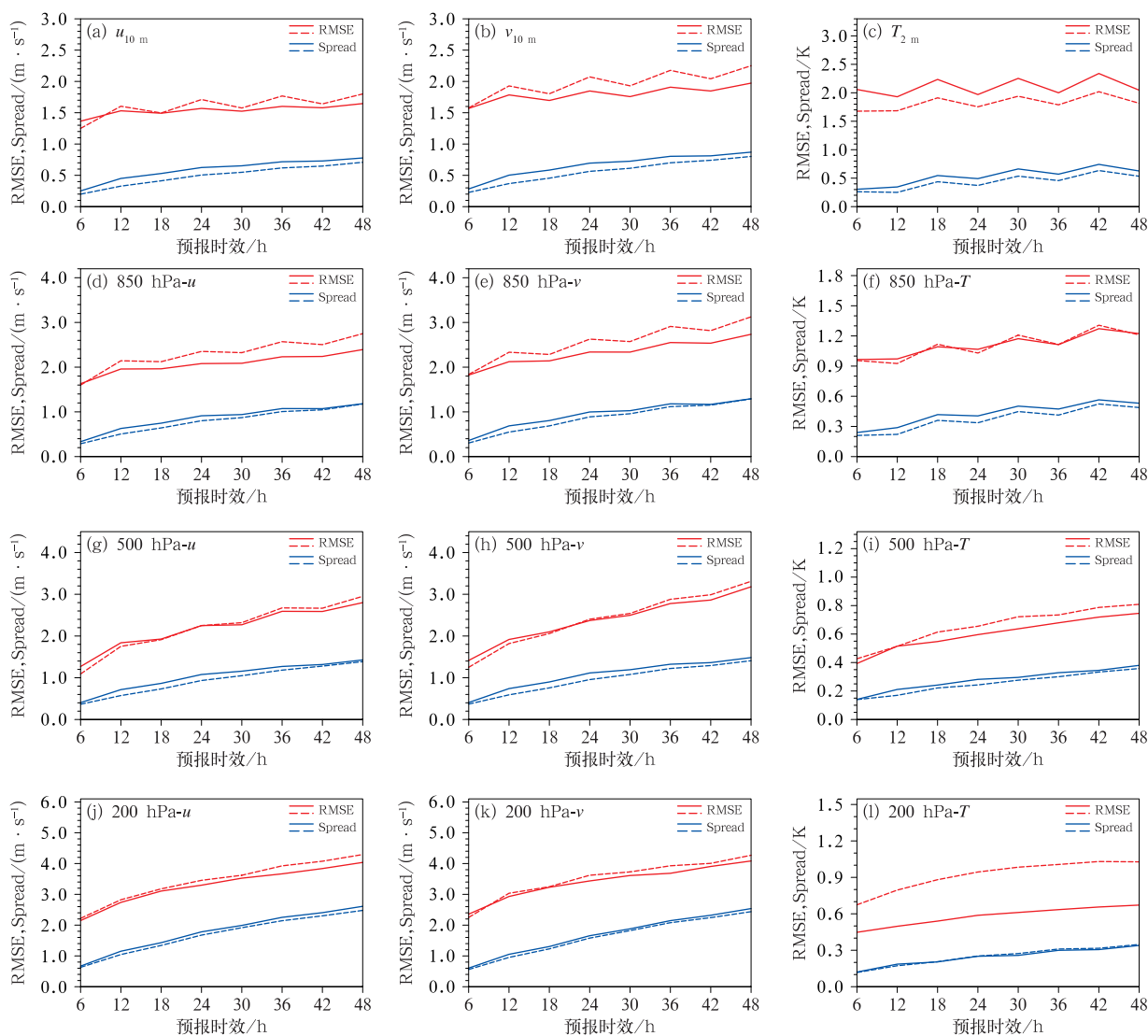


图 3 2020 年 8 月 1 日 00 时至 25 日 12 时 3 km 试验(实线)和 10 km 试验(虚线)的(a~c)近地面、(d~f)850 hPa、(g~i)500 hPa 和(j~l)200 hPa 纬向风、经向风和温度的集合平均 RMSE 和集合离散度 Spread 随预报时效的演变
Fig. 3 Variations of the ensemble mean RMSE and ensemble spread in zonal wind, meridional wind, and temperature (a~c) near surface, (d~f) at 850 hPa, (g~i) at 500 hPa, and (j~l) at 200 hPa with forecast lead time in 3 km test (solid line) and 10 km test (dashed line) from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

开展 12 h 累计降水检验。图 5 为两组试验中各集合成员对不同量级降水的预报技巧综合表现图,预报技巧综合评分的位置越趋近图的右上角,说明 1-FAR、POD、BIAS 和 TS 评分越趋近 1,即降水预报效果越好。随降水量级的增大,每组试验的集合成员之间的降水预报评分差异均有所增大,这是由强降水天气的可预报性降低造成的。进一步分析两组试验集合平均的降水预报评分,3 km 试验的 BIAS 评分整体大于 1,说明降水预报范围大于观测,尤其对小雨和中雨量级降水预报表现明显,这是

由于集合平均的平滑作用造成了弱降水区的扩张;10 km 试验的 BIAS 评分随降水量级增加由大于 1 逐渐转为小于 1,说明 10 km 试验对小量级降水预报范围偏大、对大量级降水的预报范围偏小。相较于 10 km 试验,3 km 试验在各个预报时效内对不同量级降水预报的 TS 和 POD 评分均更高,说明提高水平分辨率有助于提升预报降水与实况的匹配度和命中率。对比分析两组试验的控制预报亦可得到类似结论,即提高水平分辨率能够改进单一控制预报和集合预报系统的降水预报技巧。

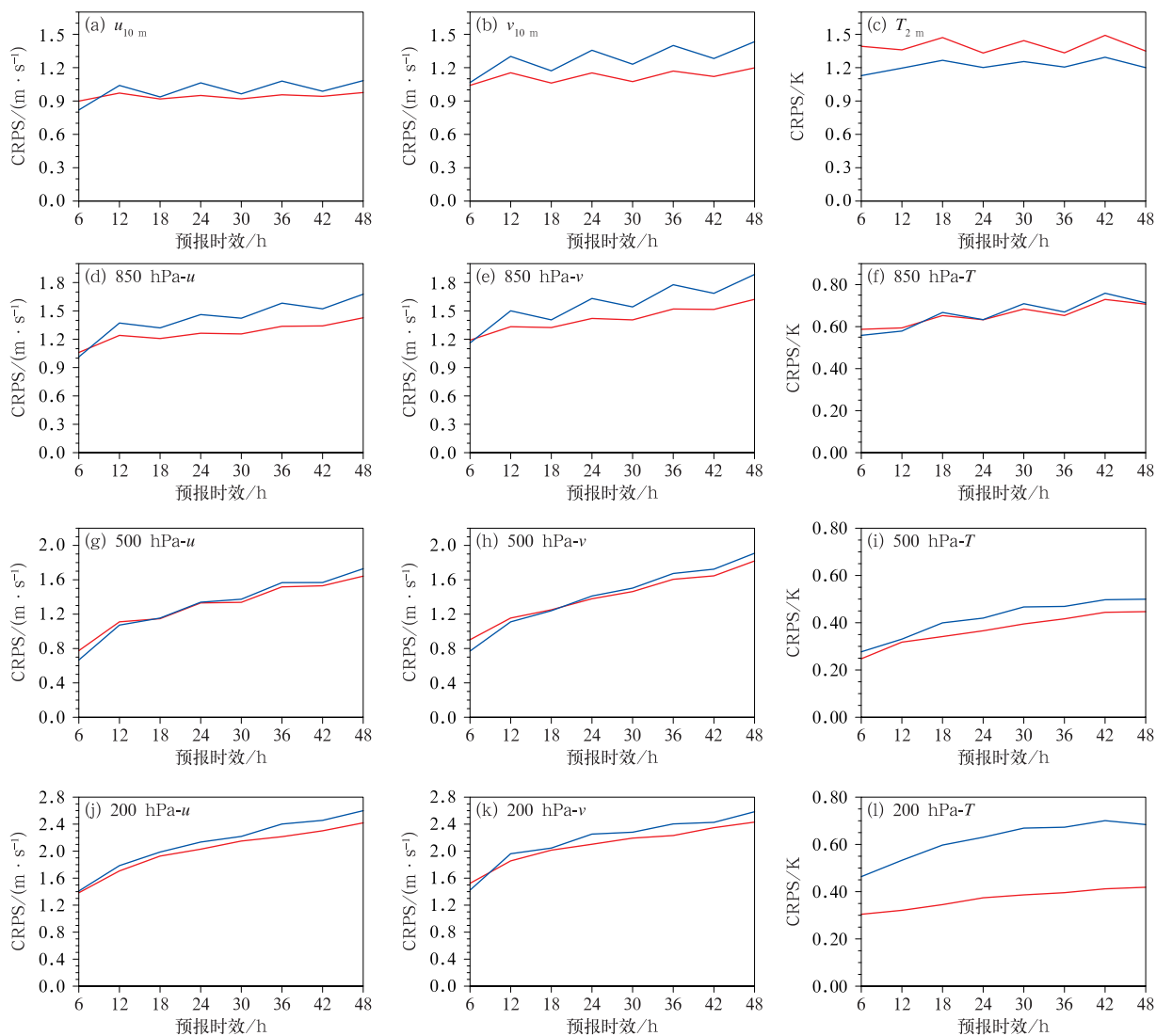


图 4 2020 年 8 月 1 日 00 时至 25 日 12 时 3 km 试验(红线)和 10 km 试验(蓝线)(a~c)近地面、(d~f)850 hPa、(g~i)500 hPa 和(j~l)200 hPa 纬向风、经向风和温度的 CRPS 随预报时效的演变

Fig. 4 Variations of CRPS in zonal wind, meridional wind, and temperature (a~c) near surface, (d~f) at 850 hPa, (g~i) at 500 hPa, and (j~l) at 200 hPa with forecast lead time in 3 km test (red line) and 10 km test (blue line) from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

图 6 为两组试验不同预报时效的 12 h 累计降水量 Talagrand 分布,可见两组试验总体呈“U”型分布,说明系统的降水离散度不足使得实况值大多落在集合预报区间之外,这一现象在 12 h 预报时效最明显,这与预报早期模式调整适应(spin-up)导致预报误差较大有关(陈良吕和夏宇,2023),而后随预报时效的延长逐渐好转。相较 10 km 试验,3 km 试验的 Talagrand 分布更平直,说明提高水平分辨率在一定程度上改善了系统降水离散度不足的问题。

图 7 为两组试验不同预报时效的 12 h 累计降水量 AROC 评分,两组试验在所有时效内的 AROC

评分均高于 0.5,说明均存在降水概率预报正技巧。3 km 试验对各个量级降水量的 AROC 评分均高于 10 km 试验,大雨至大暴雨量级降水的 AROC 评分增幅均超过 15%,体现了更高的集合预报降水概率预报技巧。

4 降水个例对比分析

为进一步了解模式水平分辨率的提高对西南地区强降水预报技巧的改进机制,选取试验期内一次典型的强降水过程进行细致的对比分析。2020 年 8 月

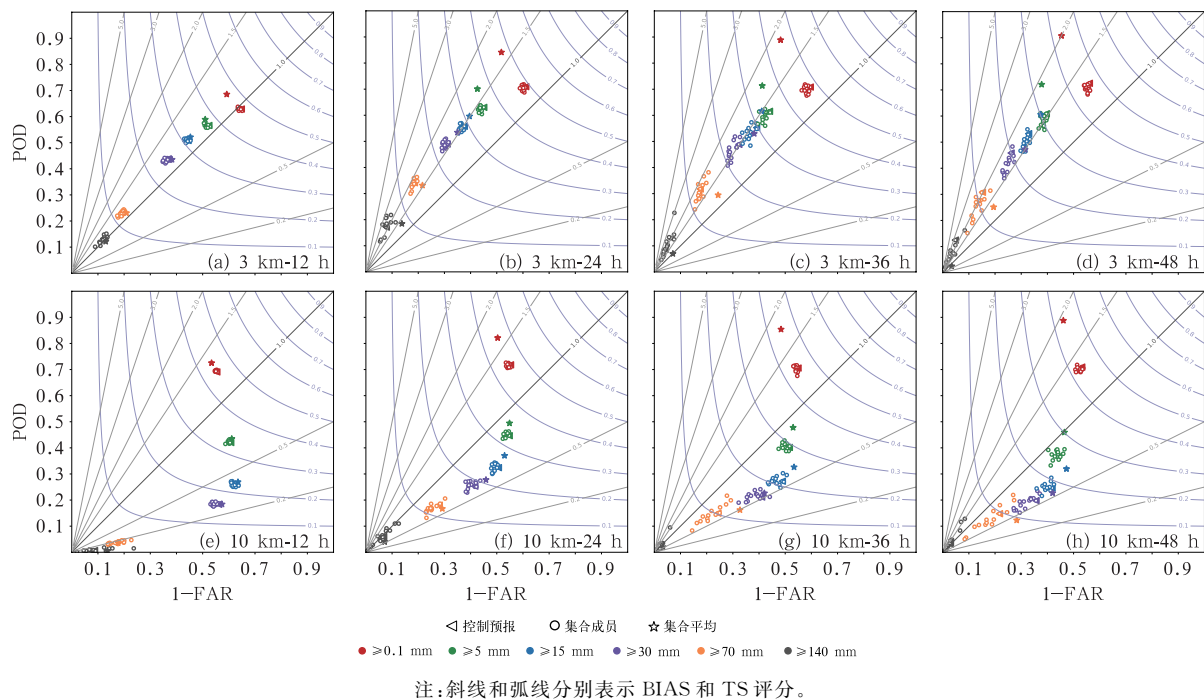


图5 2020年8月1日00时至25日12时四川盆地及周边地区(a~d)3 km试验和(e~h)10 km试验的控制预报、集合成员和集合平均在(a,e)12 h、(b,f)24 h、(c,g)36 h、(d,h)48 h 预报时效的12 h累计降水量预报技巧综合图

Fig. 5 The 12 h accumulated precipitation performance diagrams of control forecast, ensemble forecast, and ensemble mean with forecast lead time of (a, e) 12 h, (b, f) 24 h, (c, g) 36 h and (d, h) 48 h in (a—d) 3 km test and (e—h) 10 km test over the Sichuan Basin and surrounding areas from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

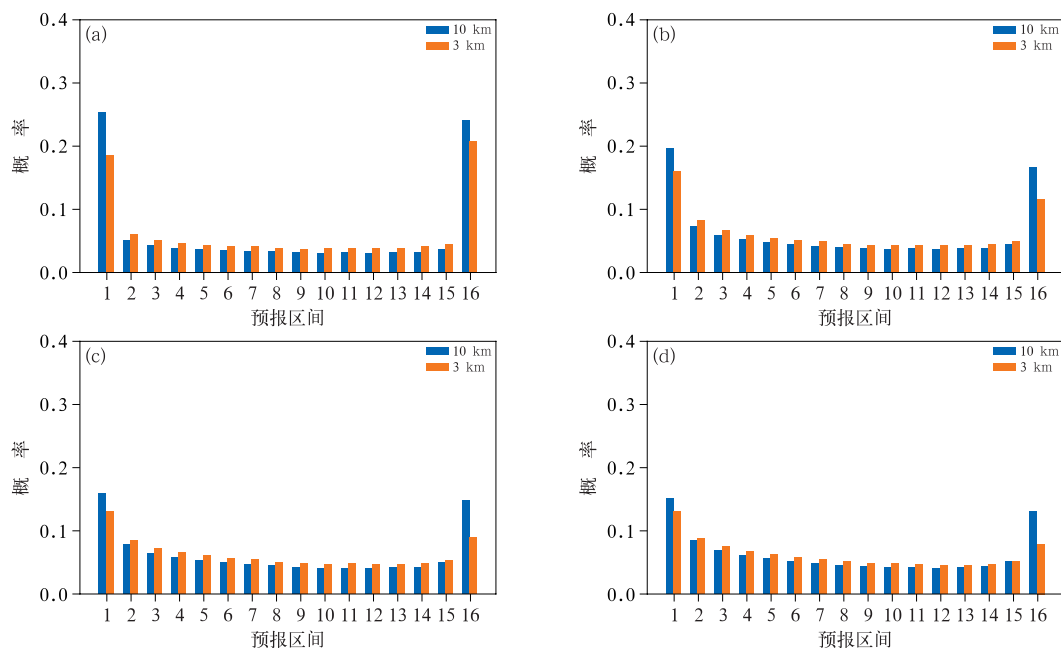


图6 2020年8月1日00时至25日12时四川盆地及周边地区3 km试验和10 km试验在(a)12 h、(b)24 h、(c)36 h和(d)48 h预报时效的12 h累计降水量Talagrand分布

Fig. 6 Talagrand diagrams of 12 h accumulated precipitation with forecast lead time of (a) 12 h, (b) 24 h, (c) 36 h and (d) 48 h in 3 km test and 10 km test over the Sichuan Basin and surrounding areas from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

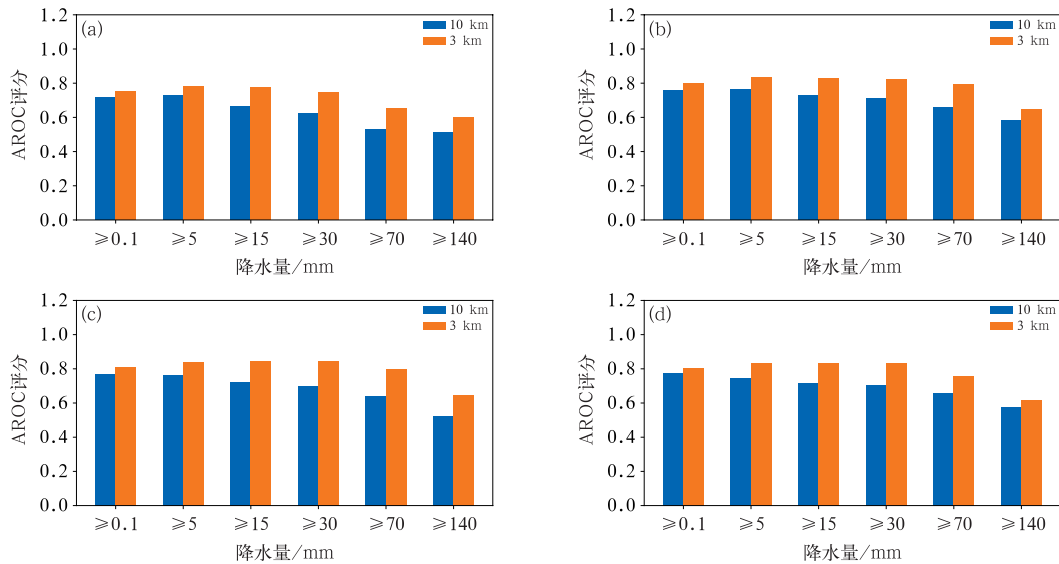


图 7 2020 年 8 月 1 日 00 时至 25 日 12 时四川盆地及周边地区 3 km 试验和 10 km 试验在 (a) 12 h、(b) 24 h、(c) 36 h 和 (d) 48 h 预报时效的 12 h 累计降水量 AROC 评分

Fig. 7 AROC scores of 12 h accumulated precipitation with forecast lead time of (a) 12 h, (b) 24 h, (c) 36 h and (d) 48 h in 3 km test and 10 km test over the Sichuan Basin and surrounding areas from 00 UTC 1 to 12 UTC 25 August 2020

10 日夜間,四川盆地西部出現大暴雨過程,芦山站的 24 h 累計降水量達 425.2 mm,位列四川省國家級氣象觀測站歷史日降水量第二(周春花等,2022)。針對該過程開展分析,試驗起報時間為 2020 年 8 月 9 日 12 時。

圖 8 為 2020 年 8 月 11 日 00 時實況和兩組試驗預報的 12 h 累計降水量郵票圖,預報時效為 36 h。實況降水表現為沿川隴交界地區和龍門山脉的暴雨帶,大暴雨帶沿龍門山脉向西南延伸至雅安附近,在芦山達到特大暴雨量級。3 km 試驗的控制預報和集合扰动成員均捕捉到川西北部 and 龍門山脉的暴雨帶以及芦山的特大暴雨,其集合平均较好地把握了降水的落区、形态和强度(图 8a)。10 km 試驗包括控制預報在內所有成員預報的小雨量級降水范围偏大、大雨及以上量級降水范围偏小,对芦山的强降水有一定指示但預報强度偏弱,大多成員預報降水仅达暴雨量級,仅两个成員預報降水达到特大暴雨量級(图 8b),其預報效果整体不及 3 km 試驗。

結合强降水区和周边的地形高度进行分析,暴雨区周边的地形错综复杂,100 mm 以上的實況降水主要分布在东北向的“喇叭口”地形內(图 9a 黑色实线),250 mm 以上降水集中在西南向的“Λ”形峡谷內(图 9a 红色实线),12 h 累計降水量最大值达

423.2 mm。圖 9b 為 3 km 試驗預報的降水量最大值分布及其静态地形高度場,3 km 試驗较好地把握了“喇叭口”和“Λ”形峡谷地形以及相应的降水分布,預報的 12 h 降水量最大值达 419.5 mm(来自成員 m07),尽管預報的强降水相对實況范围偏大、中心偏右,但对本次极端强降水过程仍有较好指示意义。圖 9c 為 10 km 試驗預報的降水量最大值分布及其静态地形高度場,10 km 試驗对川西地区多尺度地形的模拟不够精准,預報降水强度偏弱,預報降水量最大值仅有 211.8 mm(来自成員 m11)。

黃子立等(2021)研究指出,水平分辨率会影响模式对地形的描述,进而影响地形强迫水汽输送和垂直上升运动模拟,导致降水的預報差异。圖 10a 為 2020 年 8 月 10 日 15 時 3 km 試驗集合平均的水汽通量散度、 u 和 w 風場、渦度場沿 30.15°N 的纬向垂直剖面。 102.5°E 以東的对流層低層盛行偏东风,偏东风沿山坡爬升并输送水汽,受青藏高原大地形阻挡以及“喇叭口”地形侧向辐合等作用(黃楚惠等,2022),水汽在山前辐合抬升,为暴雨区提供了充沛的水汽条件。同时暴雨区上空近乎整层为上升运动和正渦度柱,正渦度造成的低層辐合配合迎风坡的动力抬升,有利于垂直上升运动的维持和发展。相较 3 km 試驗,10 km 試驗集合平均預報的水汽偏

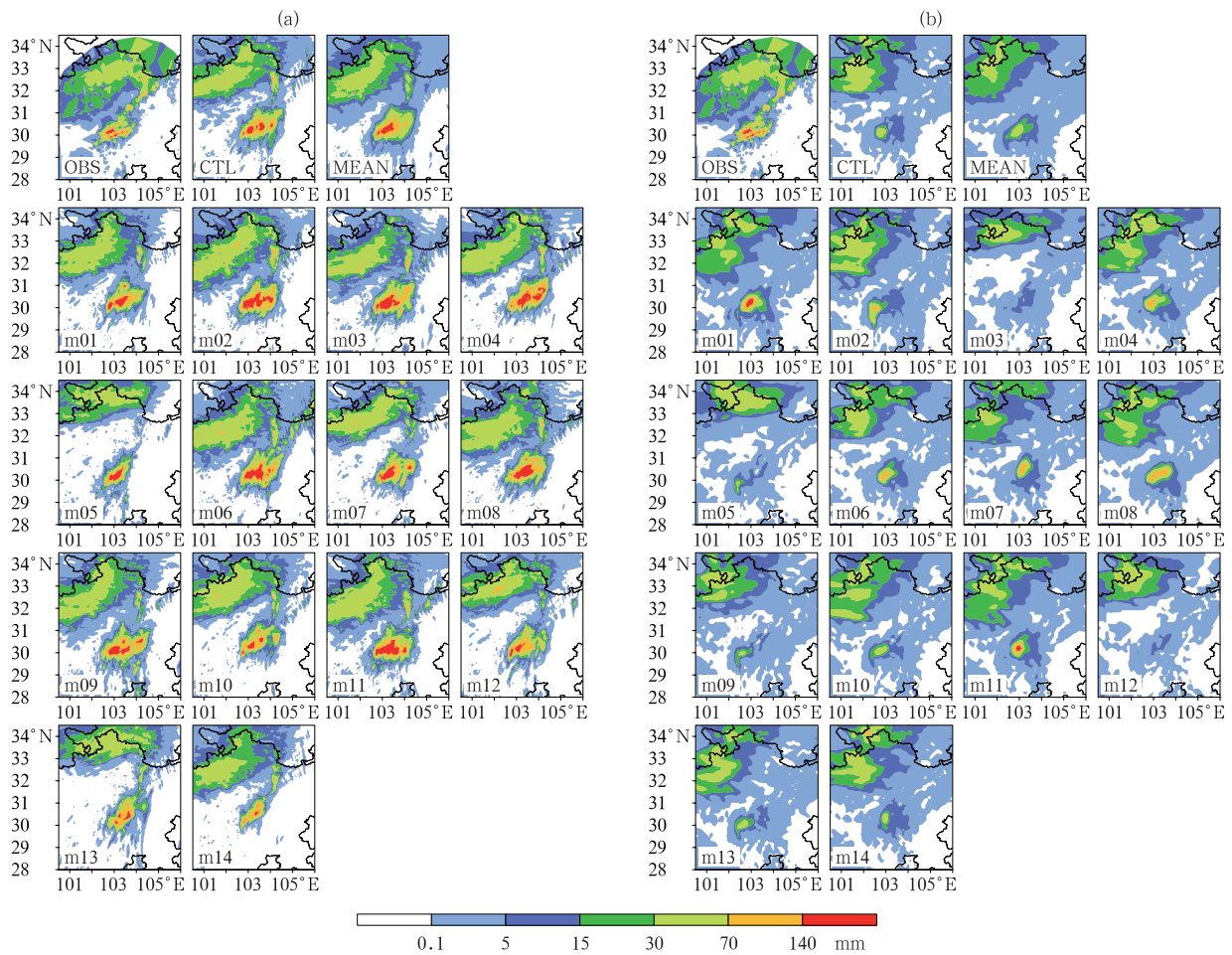


图8 2020年8月11日00时四川盆地西部(a)3 km试验和(b)10 km试验的控制预报(CTL)、集合成员(m01~m14)和集合平均(MEAN)及实况(OBS)的12 h累计降水量分布

Fig. 8 The 12 h accumulated forecast precipitation of control forecast (CTL), ensemble forecast (m01—m14), ensemble mean (MEAN) and observations (OBS) obtained in (a) 3 km test and (b) 10 km test over the western Sichuan Basin at 00 UTC 11 August 2020

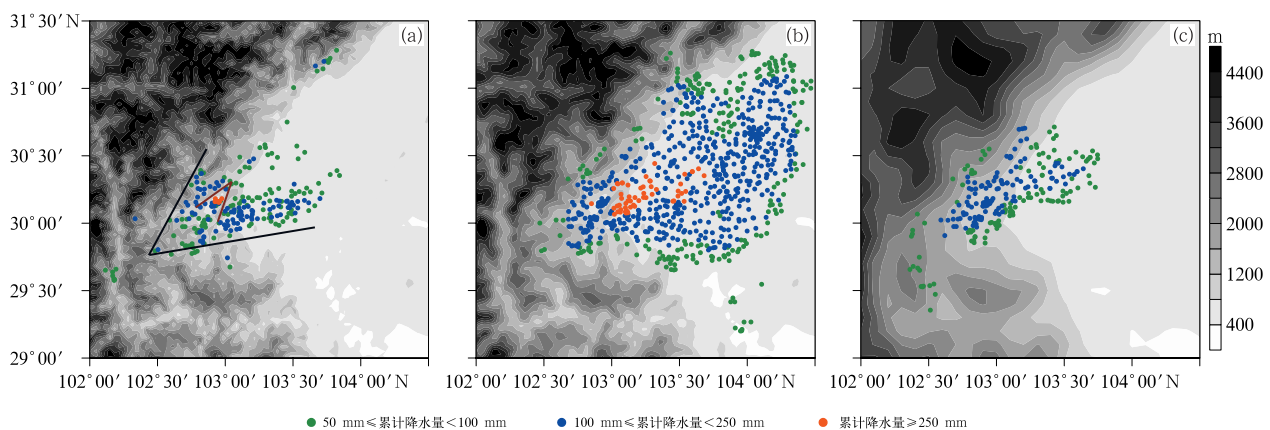
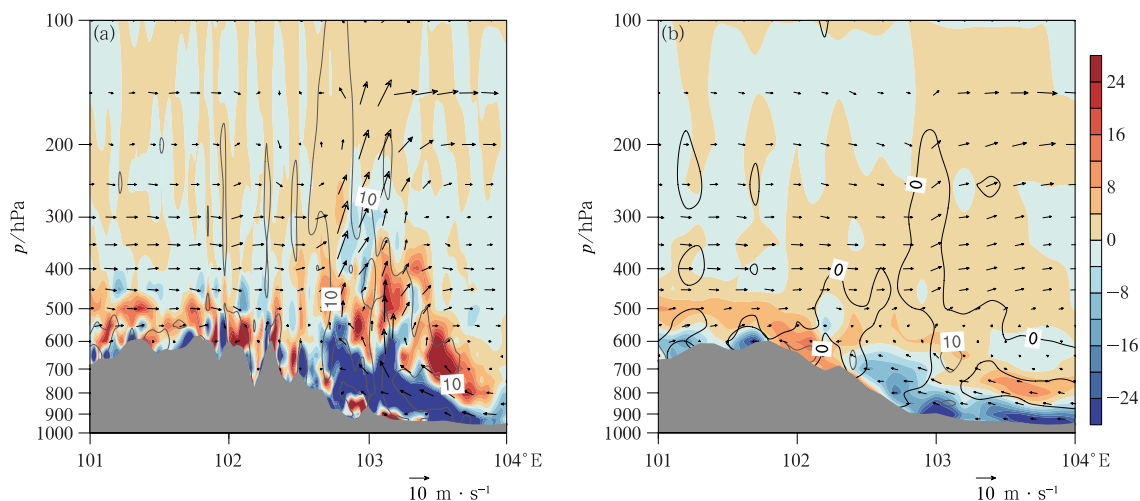


图9 2020年8月11日00时四川盆地西部的12 h累计降水量(圆点)分布与地形(阴影)叠加
(a)实况降水和地形,(b)3 km试验集合最大值及其静态地形高度场,(c)10 km试验集合最大值及其静态地形高度场
Fig. 9 Distribution of 12 h accumulated precipitation (dot) over the western Sichuan Basin at 00 UTC 11 August 2020 and terrain (shaded)

(a) observation, (b) ensemble maximum forecast and topographic height of 3 km test, (c) ensemble maximum forecast and topographic height of 10 km test



注:灰色阴影表示地形。

图 10 2020 年 8 月 10 日 15 时(a)3 km 试验和(b)10 km 试验集合平均沿 30.15°N 的水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、 u 和 w 风场(箭头, w 扩大了 10 倍)、涡度(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})的纬向垂直剖面

Fig. 10 Zonal-vertical cross-sections of ensemble mean moisture flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), u and w wind fields (arrow, w magnified 10 times), and vorticity (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 30.15°N in (a) 3 km test and (b) 10 km test at 15 UTC 10 August 2020

少且主要聚集在对流层低层,水汽辐合抬升的高度和强度不够,且暴雨区上空垂直速度和正涡度强度偏小,上升运动相对较弱(图 10b)。总体而言,提高水平分辨率有助于模拟更精细准确的多尺度地形,更合理地反映暴雨区充沛的水汽和强烈的上升运动,使得 3 km 试验预报降水更接近实况。

5 结论与讨论

本文基于 CMA-REPS 设计水平分辨率为 3 km 和 10 km 的两组集合预报试验,针对 2020 年 8 月四川盆地西部频繁的降水过程开展为期 25 d 的连续试验,对比分析两组试验的扰动特征、等压面和地面要素的预报效果,并选取典型强降水个例开展天气学分析,以研究模式水平分辨率的提高对集合预报技巧的影响。主要结论如下:

(1) 两组试验的扰动能量垂直分布不均匀,对流层高层以扰动动能为主,对流层低层的扰动内能对总能量亦有较大贡献。提高水平分辨率有助于增大各垂直层次的扰动能量,弥补中小尺度上的能量缺失。

(2) 两组试验的扰动能量和集合离散度均随预报时效延长逐渐发展,能够表征预报不确定性。提

高水平分辨率有助于增大集合离散度,但其数值仍明显低于集合平均 RMSE,即仍存在离散度明显不足的问题。

(3) 等压面和近地面要素检验表明,提高水平分辨率有助于改进风场和温度的集合预报效果,尤其对近地面和对流层低层的风场、对流层高层的温度改进明显;降水检验表明,提高水平分辨率有助于提高控制预报和集合平均的降水预报准确率,改进集合降水概率预报技巧。

(4) 强降水个例分析表明,提高水平分辨率有助于更精细地模拟四川盆地西部的多尺度地形,更准确地反映暴雨区的水汽输送和垂直运动,使得 3 km 试验预报的降水强度、落区和形态较 10 km 试验更接近实况。

本文研究表明,水平分辨率的提高明显改进了集合预报系统在复杂地形地区的预报技巧,但集合预报系统离散度的增长仍不够理想,还需进一步研究适用于 3 km 高分辨率区域集合预报系统的扰动方法。由于模式静态地形高度场与降水预报效果密切相关,后续将进行模式地形扰动的研究,进一步优化高分辨率区域集合预报系统。需指出的是,受计算资源限制,上述结论仅来自 25 d 的连续试验,后期还应开展更长时间的集合预报试验加以验证。

参考文献

- 蔡沅辰, 闵锦忠, 庄潇然, 2017. 不同随机物理扰动方案在一次暴雨集合预报中的对比研究[J]. 高原气象, 36(2): 407-423. Cai Y C, Min J Z, Zhuang X R, 2017. Comparison of different stochastic physics perturbation schemes on a storm-scale ensemble forecast in a heavy rain event[J]. Plateau Meteor, 36(2): 407-423 (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).
- 陈良吕, 高松, 2023. 基于对流尺度集合预报方法对一次暴雨过程预报的分析[J]. 暴雨灾害, 42(2): 160-169. Chen L L, Gao S, 2023. Analysis of the forecast performance of a rainstorm process based on a convective scale ensemble prediction system[J]. Torr Rain Dis, 42(2): 160-169 (in Chinese).
- 陈良吕, 夏宇, 2023. 对流尺度集合预报成员数对降水预报的影响[J]. 应用气象学报, 34(2): 142-153. Chen L L, Xia Y, 2023. The influence of ensemble size on precipitation forecast in a convective scale ensemble forecast system[J]. J Appl Meteor Sci, 34(2): 142-153 (in Chinese).
- 陈涛, 林建, 张芳华, 等, 2017. “16·7”华北极端强降水过程对流尺度集合模拟试验不确定性分析[J]. 气象, 43(5): 513-527. Chen T, Lin J, Zhang F H, et al, 2017. Uncertainty analysis on the July 2016 extreme precipitation event in North China using convection-allowing ensemble simulation[J]. Meteor Mon, 43(5): 513-527 (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).
- 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).
- 黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等, 2022. 2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J]. 大气科学, 46(4): 989-1001. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al, 2022. Dynamic and thermal structure and topographic impact of the night torrential rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 989-1001 (in Chinese).
- 黄楚惠, 李国平, 张芳丽, 等, 2020. 近 10 a 气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J]. 暴雨灾害, 39(4): 335-343. Huang C H, Li G P, Zhang F L, et al, 2020. Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change[J]. Torr Rain Dis, 39(4): 335-343 (in Chinese).
- 黄子立, 吴小飞, 毛江玉, 2021. CMIP6 模式水平分辨率对模拟我国西南地区夏季极端降水的影响评估[J]. 高原气象, 40(6): 1470-1483. Huang Z L, Wu X F, Mao J Y, 2021. An evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 40(6): 1470-1483 (in Chinese).
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等, 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J]. 大气科学, 33(1): 109-120. Jiang Z H, Chen W L, Song J, et al, 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models[J]. Chin J Atmos Sci, 33(1): 109-120 (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).
- 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).
- 谭燕, 黄伟, 杨玉华, 等, 2022. 华东区域中尺度集合预报系统的改进及 2020 年梅雨期降水试验[J]. 大气科学, 46(6): 1437-1453. Tan Y, Huang W, Yang Y H, et al, 2022. Improvement in the mesoscale ensemble forecast system in East China and a precipitation experiment in the 2020 Meiyu season[J]. Chin J Atmos Sci, 46(6): 1437-1453 (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).
- 肖玉华, 赵静, 蒋丽娟, 2010. 数值模式预报性能的地域性特点初步分析[J]. 暴雨灾害, 29(4): 322-327. Xiao Y H, Zhao J, Jiang L J, 2010. Analysis on geography & physiognomy character of numerical model prediction performance[J]. Torr Rain Dis, 29(4): 322-327 (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).

- 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).
- 郑永骏,金之雁,陈德辉,2008. 半隐式半拉格朗日动力框架的动能谱分析[J]. 气象学报,66(2):143-157. Zheng Y J, Jin Z Y, Chen D H, 2008. Kinetic energy spectrum analysis in a semi-implicit semi-Lagrangian dynamical framework[J]. Acta Meteor Sin, 66(2):143-157 (in Chinese).
- 中国气象局,2012. 降水量等级:GB/T 28592—2012[S]. 北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2012. Grade of precipitation: GB/T 28592 — 2012 [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 周春花,肖递祥,陈朝平,2023. 四川盆地西部连续两次特大暴雨过程的西南涡特征分析[J]. 高原山地气象研究,43(1):26-33. Zhou C H, Xiao D X, Chen Z P, 2023. Characteristics of southwest vortex during two consecutive heavy rains in western Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 43(1):26-33 (in Chinese).
- 周春花,肖递祥,郁淑华,2022. 四川盆地 2020 年“8·11”特大暴雨过程中尺度系统演变特征[J]. 热带气象学报,38(6):812-824. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022. Evolution characteristic of mesoscale system during “8·11”, 2020 torrential rain in Sichuan Basin[J]. J Trop Meteor, 38(6):812-824 (in Chinese).
- 庄潇然,闵锦忠,王世璋,等,2017. 风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京 2012 年“7·21”暴雨预报中的应用[J]. 大气科学,41(1):30-42. Zhuang X R, Min J Z, Wang S Z, et al, 2017. A blending method for storm-scale ensemble forecast and its application to Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 41(1):30-42 (in Chinese).
- Caron J F, 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: a case study[J]. Mon Wea Rev, 141(1):356-374.
- Clark P, Roberts N, Lean H, et al, 2016. Convection-permitting models: a step-change in rainfall forecasting[J]. Meteor Appl, 23(2):165-181.
- Fleury A, Bouttier F, Couvreux F, 2022. Process-oriented stochastic perturbations applied to the parametrization of turbulence and shallow convection for ensemble prediction[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 148(743):981-1000.
- Hersbach H, 2000. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems[J]. Wea Forecasting, 15(5):559-570.
- Hu X L, Yuan W H, Yu R C, 2021. The extraordinary rainfall over the Eastern Periphery of the Tibetan Plateau in August 2020 [J]. Adv Atmos Sci, 38(12):2097-2107.
- Leith C E, 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. Mon Wea Rev, 102(6):409-418.
- Li X, He H R, Chen C H, et al, 2017. A convection-allowing ensemble forecast based on the breeding growth mode and associated optimization of precipitation forecast[J]. J Meteor Res, 31(5):955-964.
- Lorenz E N, 1963. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 20(2):130-141.
- Mori P, Schwitalla T, Ware M B, et al, 2021. Downscaling of seasonal ensemble forecasts to the convection-permitting scale over the Horn of Africa using the WRF model[J]. Int J Climatol, 41(S1):E1791-E1811.
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al, 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations[J]. J Atmos Sci, 55(4):633-653.
- Roebber P J, 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality [J]. Wea Forecasting, 24(2):601-608.
- Schwartz C S, Romine G S, Sobash R A, et al, 2015. NCAR's experimental real-time convection-allowing ensemble prediction system[J]. Wea Forecasting, 30(6):1645-1654.
- Skamarock W C, 2004. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra[J]. Mon Wea Rev, 132(12):3019-3032.
- Talagrand O, Vautard R, Strauss B, 1997. Evaluation of probabilistic prediction systems[C]// Workshop on Predictability ECMWF. Shinfield Park, Reading, ECMWF:20-22.
- Wang J Z, Chen J, Li H Q, et al, 2023a. The roles of chaos seeding and multiple perturbations in convection-permitting ensemble forecasting over southern China[J]. Wea Forecasting, 38(9):1519-1537.
- Wang J Z, Chen J, Zhang H B, et al, 2023b. Impacts of multiscale components of initial perturbations on error growth characteristics and ensemble forecasting skill[J]. J Appl Meteor Climatol, 62(11):1677-1692.
- Yang Y L X, Yuan H L, Chen W B, 2023. Convection-permitting ensemble forecasts of a double-rainbelt event in South China during the pre-summer rainy season[J]. Atmos Res, 284:106599.
- Zhuang X R, Xue M, Min J Z, et al, 2021. Error growth dynamics within convection-allowing ensemble forecasts over central U. S. regions for days of active convection[J]. Mon Wea Rev, 149(4):959-977.

(本文责编:侯翠梅)