

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.010

河南“21.7”特大暴雨的区域集合预报检验和预报偏差分析

廉丹华¹, 袁慧玲^{1,2*}, 王婧羽^{1,3}, 陈法敬⁴

(1. 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023; 2. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 南京, 210023; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉, 430205; 4. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京, 100081)

摘要: 河南“21.7”特大暴雨覆盖范围广、强度大、降水时间段集中, 造成了严重损失。利用中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)多源融合降水分析产品(CMA Multisource Precipitation Analysis System, CMPAS-V2.1)和欧洲中期天气预报中心ERA5再分析数据, 对CMA区域集合预报系统(Regional Ensemble Prediction System, CMA-REPS)在此次暴雨事件中降水最强时间段(2021年7月20日14—20时, 北京时)的预报结果进行了评估与分析。研究结果显示, 预报时效越短, 集合平均和概率预报的降水效果越好, 但降水强度与大雨落区依然存在较大的预报偏差。结合多种降水预报评分筛选出最好和最坏的集成员, 并通过对比环流形势、水汽条件等因素, 探讨了降水预报偏差的成因。好成员在郑州地区预测了占总降水30%的对流性降水, 而坏成员则未能预报出对流性降水, 两者总降水的偏移与非对流性降水的表现一致。好成员预测的降水区域偏向东北, 与预报的副高位置偏东、台风“查帕卡”路径偏北以及南风偏强有关; 坏成员预测的降水区域偏西, 与相对湿度的大值区偏移一致, 可能是因为预报的台风“烟花”引导的低层东风更强。在925 hPa上, 好成员成功预测出郑州西部山脉迎风侧的强辐合区, 导致超过 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的强降水从山前延伸至地形高度800 m以上的迎风坡。相比之下, 由于预报的辐合区域小、强度弱, 坏成员的强降水仅分布在600 m以下的山前区域。总体而言, CMA-REPS对此次强降水过程的预报偏差主要源自大气环流的模拟偏差以及复杂地形作用。

关键词: 集合预报, “21.7”河南暴雨, 概率预报, 预报检验

中图分类号: P456.7

文献标志码: A

Verification and error analysis of regional ensemble forecasts for the torrential rain on 20 July 2021 in Henan province

Lian Danhua¹, Yuan Huiling^{1,2*}, Wang Jingyu^{1,3}, Chen Fajing⁴

(1. Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, 210023, China; 3. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan, 430205, China; 4. CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing, 100081, China)

Abstract: In July 2021, Henan province experienced widespread, intense, and concentrated extremely heavy rainfall, resulting in significant damage. This paper evaluates the forecast performance of the China Meteorological Administration (CMA) Regional Ensemble Forecast System (CMA-REPS) during the heaviest precipitation period from 1400 to 2000 China Standard Time on 20 July 2021, using the CMA Multisource Precipitation Analysis System (CMPAS)-V2.1 product and the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis (ERA5). The study findings

基金项目: 国家自然科学基金(U2342218)

收稿日期: 2024-02-01

* 通讯联系人, E-mail: yuanhl@nju.edu.cn

reveal that shorter lead times yield improved precipitation forecasts in terms of ensemble mean and probabilistic forecasts. However, notable forecast biases persist in precipitation intensity and spatial coverage of heavy rainfall. The best and worst ensemble members were identified by combining several precipitation verification scores. An analysis of atmospheric circulation and water vapor conditions was conducted to explore potential causes of precipitation forecast errors. The study identified that a good ensemble member successfully predicted convective precipitation, accounting for 30% of total precipitation in the Zhengzhou area, whereas a bad member failed to forecast convective precipitation. The overall precipitation distribution in both members aligned with the performance of non-convective precipitation. The precipitation area of the good member shifted northeastward, which is associated with the eastward deviation of the forecasted subtropical high position, the northward track deviation of typhoon "Cempaka", and the stronger south wind. In contrast, the precipitation area of the bad member shifted westward, consistent with the deviation of the maximum relative humidity area, possibly due to a stronger low-level east wind transported by the forecasted typhoon "Infa". At the 925 hPa level, the good member accurately predicted a strong convergence zone on the windward slope of the western mountains near Zhengzhou, causing intense rainfall exceeding $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$, extending from the foothills to elevations above 800 m. Conversely, the bad member predicted a small and weak convergence zone, leading to heavy rainfall confined to the foothill areas below 600 m. Overall, the forecast errors of CMA-REPS for this heavy rain event are primarily attributed to the simulated deviation of atmospheric circulation and the complex orographic effect.

Key words: ensemble forecast, the torrential rain in July 2021 in Henan province, probabilistic forecast, forecast verification

由于中国气候类型的多样性,一些地区受到季风、强降水天气系统和地形等多因素的影响,因此,这些地区更容易频繁发生破坏力强的暴雨灾害.罗亚丽等^[1]揭示了暴雨受多种因素影响:地形抬升、中尺度辐合线和涡旋等因素能触发对流,而条件性对称不稳定发展机制、惯性重力不稳定机制、对流风暴与低空急流相互作用等则为暴雨的维持和发展提供动力.

对于突发性和极端性强、形成机制复杂的暴雨,数值模式的预报准确性较低,天气形势的预报误差往往会影响暴雨落区和量级的准确性.例如,在针对2012年北京“7.21”特大暴雨的模拟中,Wen et al^[2]发现台风Vicente与副高的相互作用对东南水汽通道的发展起到了关键影响,台风的加强和副高的回撤导致降水区域的扩大和降水强度的增加.姜晓曼等^[3]对比研究了中尺度数值模式BJ-RUC v2.0和美国国家环境预报中心的全球预报系统(National Centers for Environmental Prediction - Global Forecast System, NCEP - GFS)对北京“7.21”特大暴雨的预报结果.BJ-RUC v2.0的降水预报更准确,但预报的降水落区偏南,并且形势预报未能体现低槽系统,降水预报的偏差主要来自水汽辐合和不稳定条件的预报误差.此外,数值模式的降水预报也受到分辨率

等因素的影响.季晓东和漆梁波^[4]评估了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)细网格模式对长三角地区暴雨的预报能力,发现随着预报时效的延长,预报技巧会变差,而在超过60 h预报时效后,降水极端天气预报指数的评分比模式降水预报更好.Kim et al^[5]验证了更高分辨率的数值模拟对夏季风相关的强降水预报有所改进.

集合预报方法和确定性预报相比具有更多的优势,也是改进极端暴雨预报的重要手段^[6-7].近年来,随着高性能计算和集合预报的发展,国际上主要的业务预报中心已经建立了全球和区域集合业务预报系统.Toth et al^[8]提出了增长模繁殖法(Breeding of Growing Modes, BGM)来建立集合预报的初始扰动,并在NCEP的集合业务预报系统中得到应用.Khan et al^[9]基于全球集合预报系统(The Observing Research and Predictability Experiment (THORPEX) Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)),研究证明集合预报结果的好坏与集合成员的数量无关,而是取决于集合成员构成的方法,基于各模式控制预报的小规模集合成员也能与基于很多成员组合成的大集合预报的效果一样好.Stensrud et al^[10]验证了在美国地区较低分辨率(80 km)的NCEP短期集合预报和

高分辨率(29 km)确定性预报对热带气旋位置预报的准确性相当. 中国气象局发展了GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System)区域集合预报系统(即目前的CMA-REPS),该系统能产生合理的扰动场,并且集合预报的结果明显优于控制预报,对强降水中心的预报较为准确^[11]. Xue et al^[12]通过评估美国发生的三个强降水个例,证明对流风暴尺度(4 km)集合预报优于高分辨率(1 km)中尺度模式的确定性预报.

集合预报的评估对于提升集合预报系统性能至关重要,其中包括好坏成员的筛选及分析. Zhu and Xue^[13]基于对流尺度集合预报系统(Convective-permitting Ensemble Forecast System, CEFS)对2012年北京“7.21”特大暴雨进行了预报,结果显示部分好成员成功再现了中尺度对流系统的降水,并对输送水汽的气流方向预测得更好. 马申佳等^[14]利用频率偏差评分(Frequency Bias Score, *BIAS*)和公平技巧评分(Equitable Threat Score, *ETS*)对一次飑线天气过程的对流尺度集合预报进行了评估,发现集合平均在小量级降水上表现最佳,而概率匹配平均法在极端降水事件的预报技巧方面有明显优势. 此外, Wu et al^[15]不仅使用了24 h累积降水的*ETS*评分和500 hPa高度的均方根误差,还验证了综合可预测性指数(Index of Composite Predictability, *ICP*)评分可用于区分集合预报的好坏成员.

在2021年7月17日至23日期间,中国河南省遭遇了历史罕见的极端暴雨,此次降水过程中,河南省共有20个国家站的日累积降水量创下历史记录. 从7月19日08时(China Standard Time, CST,下同)至7月20日08时的24 h累积降水中,有794个气象测站降水超过了100 mm. 郑州站的24 h最大累积降水量出现在7月19日20时至20日20时,达到552.5 mm,20日16日至17时的单小时降水量达到201.9 mm,打破了该站自建站以来的历史记录. 许多学者已对此次暴雨过程的复杂形成机制开展了研究^[16-18],特别强调了台风对水汽输送的作用和地形的影响. 研究表明,西太平洋副高边缘的对流不稳定能量高,台风“烟花”和“查帕卡”带来东南气流,水汽主要来源于中国

南部和西北太平洋;嵩山阻挡边界层东风西进,抬升气流利于形成中尺度辐合线;对流单体系统在郑州的聚集、合并和停滞,使得此次暴雨过程格外强烈. 不同的数值模式对河南“21.7”特大暴雨的预报和模拟都表现出不同程度的偏差. 例如,朱科锋等^[19]评估了两组对流可分辨尺度集合预报的降水预报,发现所有集合成员都低估了此次过程的极端降水. 栗晗等^[20]基于多种降水评分综合评估了六个业务数值模式的预报结果,发现此次降水的预报偏差可能源自天气尺度系统的预报偏差以及复杂地形对模式降水预报的影响.

本研究旨在评估与分析区域集合预报系统CMA-REPS对河南“21.7”特大暴雨的预报结果,并探讨可能导致此次过程预报误差的原因. 通过分析CMA-REPS在不同预报时效下的集合预报结果,研究不同起报时间对此次降水预报的影响,并和NCEP全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System, NCEP-GEFS)对比全球和区域集合预报系统在预测极端降水方面的优劣. 在此基础上,结合降水量级、落区,根据降水评分挑选最好和最坏的集合成员,并通过对比好坏成员的环流形势等要素的预报来分析降水效果的关键影响因素,以期对极端强降水的预报提供建议.

1 数据与方法

1.1 数据 观测场数据来源于中国气象局多源降水分析系统(China Meteorological Administration Multisource Precipitation Analysis System, CMPAS-V2.1)^[21],这是一套中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水分析产品,具有高时空分辨率和优越降水分布特性,在中小尺度极端降水监测方面表现较好. 其空间范围为70°~140°E,15°~60°N,实时产品分辨率为0.05°,每小时更新一次,产品时效滞后时间约50 min. 本文关注的降水观测区域为110°~120°E,30°~40°N,覆盖了河南“21.7”特大暴雨的主要降水地区.

资料来自中国气象局区域集合预报业务系统CMA-REPS输出的集合预报^[11]. 该模式的预报区域为70°~145°E,15°~65°N(2022年6月7日后,该模式预报范围南扩5°,达到10°N),水平分辨率为0.1°,垂直分辨率有50层,主要适用于短

期预报,控制预报的初值和侧边界来自 NCEP-GFS 的预报场,集合成员的初值扰动采用 6 h 循环计算方案的 GRAPES 模式集合变换卡尔曼滤波方法^[22-25],14 个集合成员的扰动侧边界条件由 GRAPES 全球集合预报系统(Global Ensemble Prediction System, GEPS, 即目前的 CMA-GEPS)提供. 本文的集合平均结果基于 14 个扰动成员生成,模式扰动采用单一的物理过程参数化方案和随机物理过程倾向项方案^[26]. 本文选用的地面相对湿度和环流形势场数据的范围为 $105^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$,覆盖了影响河南地区降水的主要天气系统,包括台风与副高等环流场的形势变化.

天气形势场和地面相对湿度的检验数据分别来自 ECMWF 提供的逐小时、 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的再分析数据(The Fifth Generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis, ERA5)和 NCEP 提供的逐六小时、 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的 NCEP-GFS 分析场数据. 为了评估区域集合预报系统 CMA-REPS 的降水预报能力,采用 NCEP-GEFS 的预报场为对照. 该系统包括 31 个集合成员,水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,共有 64 个垂直层.

1.2 降水预报评估方法 为了评估模式对本次暴雨的预报能力,采用传统确定性预报的降水检验评分,包括风险评分(Threat Score, TS), ETS , $BIAS$, 它们都基于二分类法,根据每一个格点降水事件发生与否,统计选定区域降水预报的命中、空报、漏报的情况,计算相应评分.

TS 评分是一种世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)采用的评估定量降水预报准确率的评分,取值范围为 $0\sim 1$,数值越大越好. ETS 评分^[27]考虑降水发生频率带来的“随机命中”,能惩罚空报或漏报的失误,和 TS 评分相比更公平. ETS 评分的取值一般在 $-1/3\sim 1$,数值越大预报效果越好. $BIAS$ 评分主要用于评估预报模式对某一阈值降水区域大小的准确性, $BIAS > 1$ 时,该预报高估,空报格点数大于漏报数, $BIAS < 1$ 时则相反. 当 $BIAS = 1$ 时,频率偏差为最优,但不代表预报的准确率高.

此外,还使用了 BS 评分(Brier Score)来评估集合降水概率预报^[28],当观测值达到阈值时,其

概率记为 1,否则为 0. 通过计算区域内集合预报概率与观测概率的均方误差来得出 BS 评分,评分越接近 0 表示概率预报的效果越好. 有关降水预报评分信息的详细内容可参考世界气候研究计划的检验评分网站(<https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>).

2 区域集合降水预报的检验评估

2021 年 7 月 20 日 16 时至 17 时郑州站累积降水量达到了破纪录的最大值. CMPAS 降水数据显示,郑州地区的降水主要集中于下午和傍晚时段,下文主要针对 7 月 20 日 14 时至 20 时的 6 h 累积降水进行分析.

2.1 不同预报时效下累积降水预报比较 为了比较不同预报时效的降水预报结果,选取 CMA-REPS 7 月 18 日 20 时、19 日 08 时、19 日 20 时和 20 日 08 时起报的 20 日 14 时至 20 时的降水分布,预报时效分别为 42~48 h, 30~36 h, 18~24 h 和 6~12 h. 降水观测场(图 1)显示,大于 100 mm 的 6 h 累积降水区域主要集中在郑州附近,最大降水量达到 237.3 mm. 而 CMA-REPS 的预报结果显示(图 2),所有预报时效的模式结果均低估了降水.

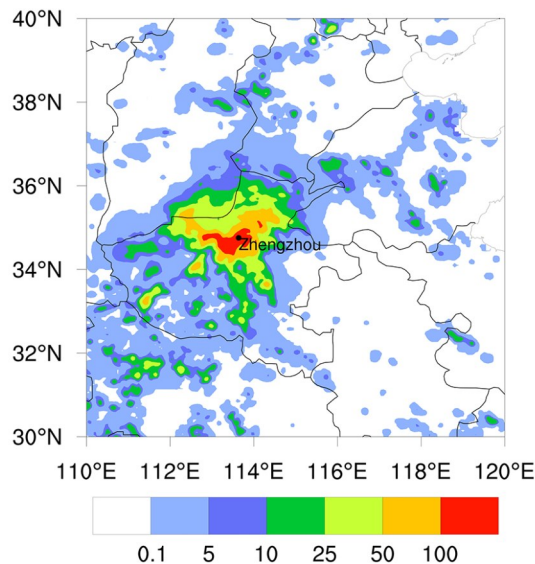


图 1 CMPAS 产品 7 月 20 日 14 时至 20 时累积降水量空间分布图(单位:mm)

Fig. 1 Spatial distribution of accumulative CMPAS precipitation analysis (unit: mm) from 14:00 to 20:00 CST on 20 July

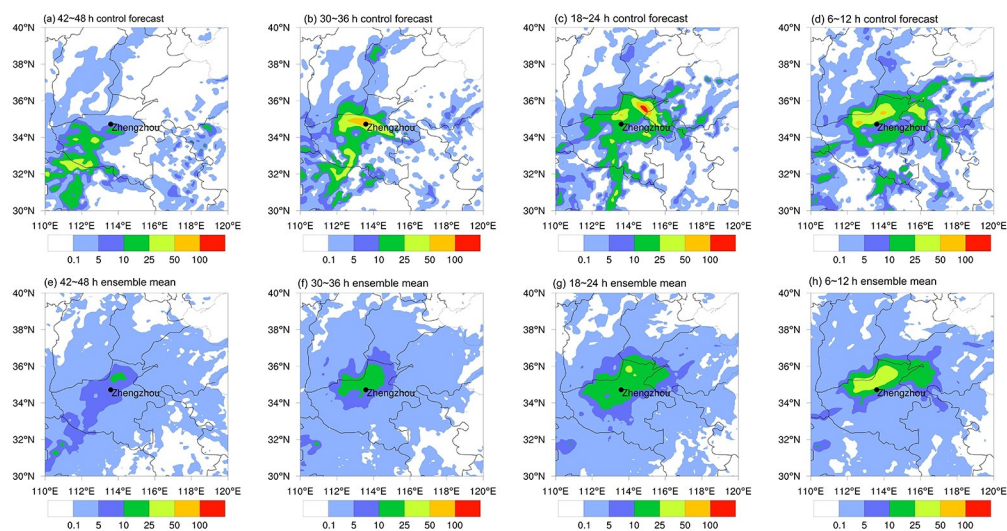
在不同预报时效的控制预报中,42~48 h预报的降水区偏西南(图2a),且最大值只有33.6 mm;30~36 h预报的降水同样偏西(图2b),最大值仅有85.4 mm;18~24 h预报的降水最大值(117.0 mm)在郑州东北侧(图2c),在郑州附近则没有预报出大的降水;6~12 h预报的降水最大值虽有所不足,但整体降水落区的预报更佳(图2d).在四个集合平均结果中,随着预报时效减小,最大降水量增加.尽管6~12 h集合平均预报(图2h)的最大降水量仅为40.3 mm,远低于观测值,但扰动成员预报有更大的可能预测出降水极大值.表1是不同预报时效的成员预报的最大值,在6~12 h预报中为110.8 mm,其次是18~24 h预报的降水最大值(107.5 mm).

综合看,预报时效越临近的集合预报结果越好,具体表现在降水空间分布和扰动成员预报的降水最大值.18~24 h控制预报的最大降水量最大,但位置偏差大,且大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的集合平均区域也很小;6~12 h集合平均预报的降雨区域位置最好,且大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的区域覆盖最大,扰动成员预报的降水极值也更接近观测,整体上6~12 h预报时效下集合预报的效果更好.

2.2 概率预报评估 采用的概率预报方法为等权概率.首先选取降水阈值(针对6 h累积降水,

使用0.1,10,25和50 mm四个阈值),在某一格点上计算预报值大于阈值的集合成员数占总集合成员数(14)的比例得到.与观测降水(图1)相比,起报时间更早的集合概率预报更加偏西,对强降水的预报都欠佳(图3).对于阈值为0.1 mm和10 mm的降水,预报时效为18~24 h的BS评分(表2)更好,而对于阈值为25 mm和50 mm的降水,预报时效为6~12 h的预报评分更好,强降水的概率预报也表现为越临近的预报效果越好.即使是6~12 h临近预报,也只有四分之一的成员预报将会有大于50 mm的强降水出现,覆盖区域也远小于观测的强降水区面积.

与相同预报时效下CMA-REPS的概率预报(图3)相比,NCEP-GEFS表现略显逊色,特别是降水落区预报较差,降水区域集中在郑州西北、东南和西南,而在郑州区域没有预报出降水.在郑州附近地区,对于大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的降水,NCEP-GEFS的概率预报小于10%且覆盖区域非常小;同时,NCEP-GEFS几乎没有报出超过 $50 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的极强降水概率(零星格点小于5%).因此,可以推断NCEP-GEFS缺乏对特大暴雨的预报能力.而CMA-REPS的概率预报在强降水阈值上仍覆盖一定区域,说明低概率值对极端暴雨依然有较好的指示意义.此外,表2显



The subtitles represent the forecast leadtimes.

图2 CMA-REPS预报的7月20日14时至20时的6 h累积降水量(单位:mm):(a~d)控制预报和(e~h)集合平均

Fig. 2 CMA-REPS forecasts of 6 h accumulative precipitation (unit: mm) from 14:00 to 20:00 CST on 20 July for (a~d) control forecasts and (e~h) ensemble averages

表 1 不同预报时效下控制预报(mem00)和各集合成员 7 月 20 日 14 时至 20 时的累积降水量最大值(单位:mm)

Table 1 Maximum values of accumulative precipitation (unit: mm) from 14:00 to 20:00 CST on 20 July for the control member (mem00) and perturbed ensemble members with different initialization times

预报时效	42—48 h	30—36 h	18—24 h	6—12 h
mem00	33.6	85.4	<u>117.0</u>	70.1
mem01	19.9	26.9	43.4	40.5
mem02	19.9	45.9	36.2	53.6
mem03	45.4	34.2	59.3	86.8
mem04	19.8	25.8	29.4	50.5
mem05	34.4	29.5	58.8	57.1
mem06	26.0	26.6	61.1	<i>110.8</i>
mem07	23.5	36.3	<i>107.5</i>	94.7
mem08	33.4	79.4	46.6	50.7
mem09	36.4	46.6	40.4	46.9
mem10	22.3	35.3	49.9	41.1
mem11	43.8	61.4	74.1	54.9
mem12	28.1	34.2	95.6	63.3
mem13	28.7	36.5	38.5	71.7
mem14	44.3	31.1	50.5	96.4

注:表中黑体下划线数据代表了所有成员的最大值,黑斜体数据代表不同预报时效下最大的扰动成员降水值

示了不同预报时效和降水阈值的 BS 评分,整体上 NCEP-GEFS 的概率预报的偏差比 CMA-REPS 的更大。

综上所述,CMA-REPS 是较为可靠的短期区域集合预报系统,对极强暴雨降水的强度和落区预报都具有重要的参考价值。

3 集合降水预报成员筛选

3.1 集合预报成员概况 根据第 2 节的分析结果,20 日 08 时起报的 6~12 h 降水集合平均效果最好,因此选取该时效的预报挑选集合成员进行分析。根据 CMA-REPS 预报的 6 h 累积降水量的集合成员邮票图(图 4),其中 00 成员为控制预报。大多数集合成员对大于 $100 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的降水区域的预报都有所欠缺。只有成员 06 预报出了 100 mm 以上的降水,但位置向西南偏移。成员 07 预报的大于 $50 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的降水大值区域的位置和数值更接近观测。观测场的最大累积降水量

值接近 240 mm,而在所有集合成员中,即使是预报的最大值,也只有约观测最大值的一半(表 1)。成员 06、成员 07、成员 14 的预报降水最大值较大;成员 01、成员 10 预报的降水最大值严重低估,只有 40 mm 左右。

3.2 好坏成员选择 本文选取 TS , ETS , $BIAS$ 三种降水评分方法,对 15 个集合预报成员的降水预报进行评估。所选取的阈值分别为 0.1, 10, 25 和 50 mm。由于本次降水为大暴雨,因此给 25 mm 和 50 mm 的降水阈值赋更高的权重,来计算预报评估的总得分。四个降水阈值下,某成员的分数占该阈值所有成员总分数的比例分别为 a , b , c , d , 并将他们分别乘以系数 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 相加得到该评分方法下的得分 ($0.1a + 0.2b + 0.3c + 0.4d$)。由于降水预报低估导致 $BIAS$ 评分均小于 1, 最后将三种评分方法的结果相加来综合考虑预报效果。成员 07 在评分方面表现更好,选定为好成员,其降水最大值位置偏向东北;成员 04 和成员 09 评分较低,为了研究实际预报大值向西偏移的原因,故从这两个成员中挑选降水大值落区偏西的成员 04 为坏成员(图 5)。针对选定的好成员 07、坏成员 04,从环流形势和地面相对湿度预报等方面进行诊断分析,以探究本次 CMA-REPS 模式降水预报不佳的可能原因。

4 集合降水预报的偏差分析

4.1 降水组成与相对湿度预报分析 模式中的总降水量是由可解析的网格尺度非对流性降水与对流参数化方案所产生的对流性降水共同组成的。图 6 是 CMA-REPS 模式在 08 时起报得到的 6 h 累积对流性和非对流性降水量分布。

在对流性降水方面,因为对流参数化方案中判断对流触发的判据较简单、对流在边界层的夹卷不受约束等问题,对流参数化方案的误差被认为是降水预报模拟的可能误差来源之一。好成员与坏成员对本次降水的对流性降水的预报差距较大。好成员预报的 6 h 累积对流性降水(图 6a)最大值大于 20 mm,区域在郑州附近,与预报的总降水量大值区域基本符合,雨带呈西南-东北走向,与观测降水(图 1)走向相似。该成员在郑州周边区域预报的对流性降水占总降水量预报的 30%

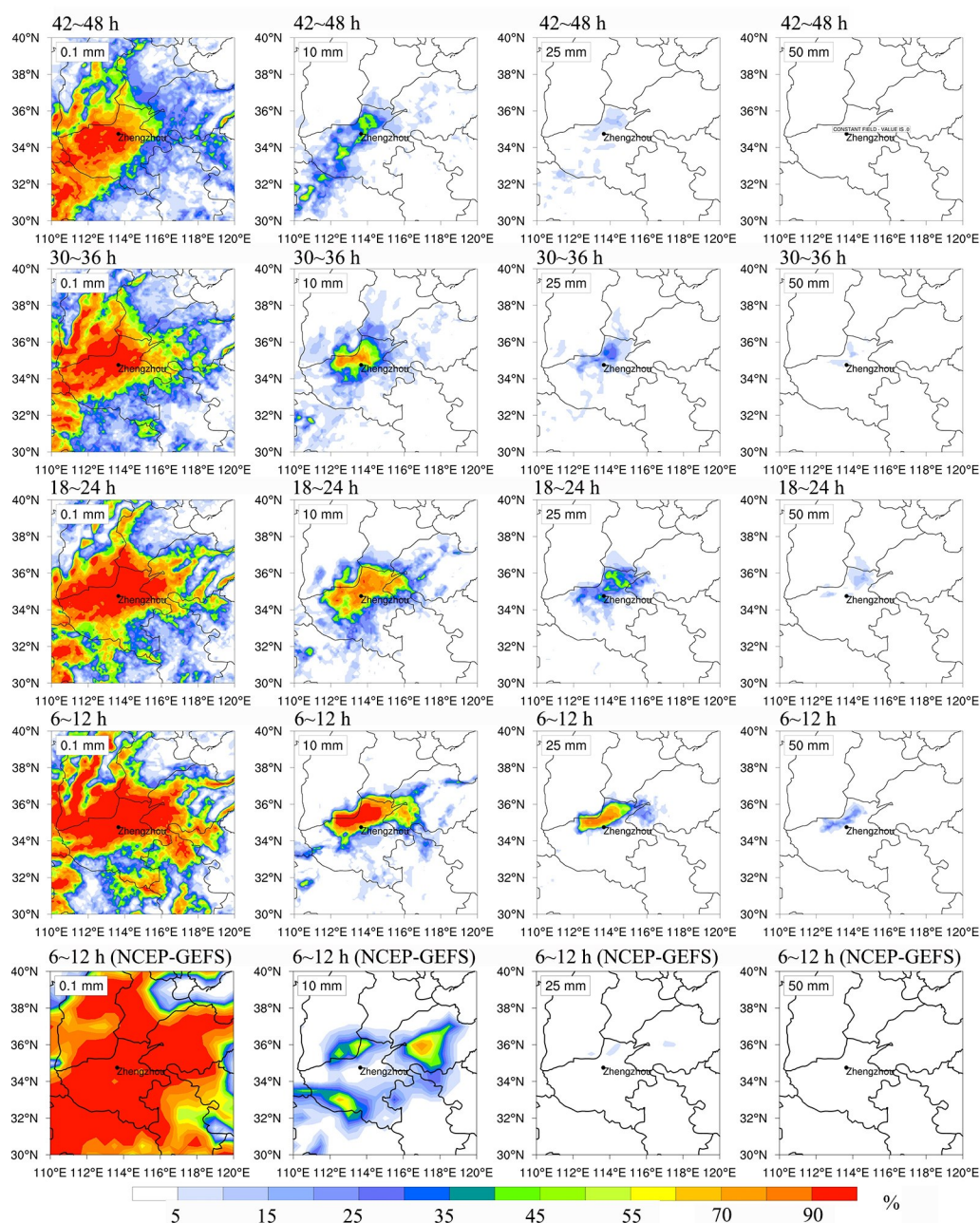


图3 CMA-REPS(1~4行)和NCEP-GEFS(第5行)预报的7月20日14时至20时的6 h累积降水概率预报

Fig. 3 The 6 h accumulative precipitation probabilistic forecasts for CMA-REPS (rows 1~4) and NCEP-GEFS (row 5) forecasts from 14:00 to 20:00 CST on 20 July

左右. 坏成员预报的对流性降水(图6b)最大值区域在河南省以西和东北,但在郑州附近基本没有预报,没有较规则的雨带形状,这也许是坏成员在郑州累积降水的数值上较欠缺的原因之一.

而在非对流性降水方面,两个成员的分布都

与总降水类似. 好成员(图6c)最大非对流性降水量超过50 mm,占总降水的70%左右. 坏成员(图6d)在郑州附近的降水主要为非对流性降水,其落区形态也与总降水相似.

图7显示了20日14时NCEP-GFS分析场和

表 2 针对 20 日 14 时至 20 时的 6 h 累积降水,不同预报时效下 CMA-REPS 和 NCEP-GEFS 概率预报的不同阈值的 BS 评分

Table 2 Brier scores of probabilistic forecasts from CMA-REPS and NCEP-GEFS from 14:00 to 20:00 CST on 20 July with different leadtimes for different thresholds

	0.1 mm	10 mm	25 mm	50 mm
42~48 h (CMA)	0.177	0.067	0.037	0.015
30~36 h (CMA)	0.192	0.052	0.032	0.015
18~24 h (CMA)	0.172	0.053	0.029	0.015
6~12 h (CMA)	0.245	0.059	0.024	0.013
6~12 h (NCEP)	0.347	0.075	0.037	0.014

CMA-REPS 预报场的 2 m 相对湿度分布图. 分析场中达到 90% 的相对湿度的区域扩张到郑州的大部分区域. 整体来说,两个成员在河南省的东南部的相对湿度预报都不是很好. 其中,好成员在郑州区域能预报出 95% 以上的相对湿度,且相对湿度大值区域较大,呈“西南-东北”走向. 而坏成员的相对湿度大值区与降水预报大值区域都向西偏移,说明这两个区域的偏移有一致性.

4.2 环流形势预报分析 在河南暴雨发生的整

个降水时段内,副高西伸北抬,发展异常强盛. 台风“烟花”加强西行,从海上带来更强盛的东南气流;台风“查帕卡”移动缓慢,将南面海上的暖湿空气裹挟向内陆. 850 hPa 上在郑州附近有一倒槽,东南风与偏东风在河南辐合抬升,向高层输送水汽. 500 hPa 上的温度上升,东南气流变强,洛阳附近有一低涡延伸出“人”字形切变线,干冷空气沿低涡南部侵入郑州西南部,一个准静止的对流单体在郑州上空停留,有利于郑州附近强对流产生与发展^[29-31].

我们选择了 20 日 17 时的环流形势场进行分析,与 ERA5 再分析场对比. 由于 ERA5 再分析场的分辨率较低,低压中心的强度小于实际,因此本文还加入了好坏成员的风速差值对比. 总体来说,预报成员在两个台风周围的风速都较大,这表明台风的预报位置准确且强度强,但在台风“烟花”西北方的风速更小,可能导致输送向河南的水汽不足. 郑州地区东北部的风速较大,而西北部的风速较小. 在 850 hPa 上,好成员比坏成员在台风“烟花”和“查帕卡”附近的风速更大(图 8d). 相对于再分析资料,好成员从台风“查帕卡”而来的南风分量更大(图 8e),而坏成员从台风“烟花”而

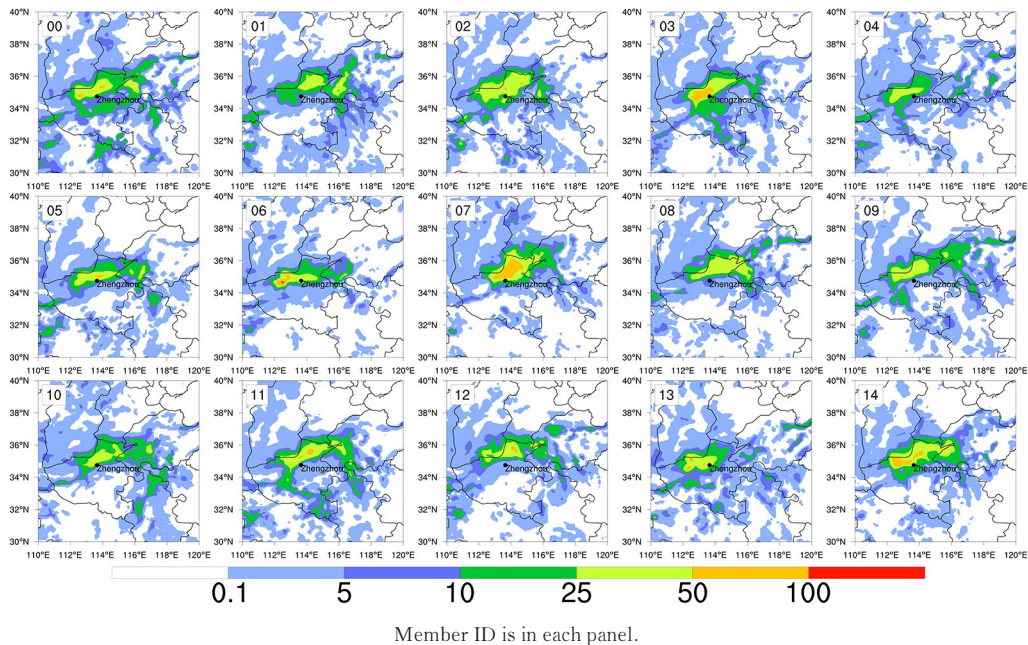


图 4 CMA-REPS 的 15 个集合成员于 20 日 08 时预报的当日 14 时至 20 时累积降水量分布图(单位:mm)

Fig. 4 Accumulative precipitation forecasts (unit: mm) from CMA-REPS from 14:00 to 20:00 CST for different ensemble members initialized at 08:00 CST on 20 July

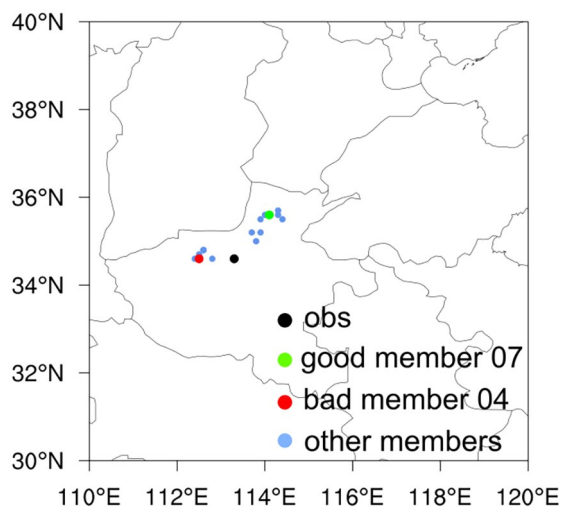


图5 观测场和集合成员预报的20日14时至20时累积降水量的最大值落点分布

Fig. 5 Spatial distribution of maximum values of accumulative precipitation from 14:00 to 20:00 CST on 20 July for the observation and ensemble members

来的东南风分量更大(图8f). 因此,在郑州附近,好成员的南风分量更大,而坏成员的东北风分量更大. 风速和风向与水汽输送相关,更多的水汽输送到了郑州以北(好成员)和西南(坏成员),这与降水区域的偏移对应. 在500 hPa上,好成员的副高比分析场更偏东(图9b),这也许是其降水大值区域更偏东的原因之一. 对于河南西面的低涡,观测场中有明显的风速大值区(图9a),但两个成员都没有预报出来(图9b和图9c). 两个成员在河南以南长江中游的5860线都偏西,从两个台风到河南的路径上东风分量基本都不足. 好成员对台风“查帕卡”输送的风预报更强(图9e),但两个成员都低估了台风“烟花”输送的东南海上气流.

图10是CMA最佳路径数据集^[32-33]与CMA-REPS模拟的台风路径图. 图中两点之间的间隔为6 h. 本文研究的时间对应第2至第3个点. 显而易见,台风“查帕卡”的路径预报更偏向北,而台风“烟花”的路径预报更偏向东南,甚至在两个台风的预报中,好成员偏离最佳路径的距离更远一些. 台风“查帕卡”在20日14时至20时尚未登陆,但预报中都显示处于登陆阶段. 结合风速强度分析,好成员对于台风“查帕卡”的路径预报更

偏北,这可能导致该时段的风速南风分量更强,且降水区域偏北. 对于台风“烟花”,好成员相比坏成员更接近观测,因此坏成员的东南风分量更大,且两个成员的台风中心都偏东南,这也可能导致低估了“烟花”输送的东南海上气流.

4.3 地形高度上的降水 郑州地区附近的太行山与伏牛山地形对降水也有显著的影响. 风在山坡上的辐合抬升有利于降水的形成与发展. 在925 hPa高度上,好成员(图11a)显示河南西北部有明显的散度负值区,表明该地区存在大范围较强的辐合上升,有利于降水的产生. 而坏成员的预报(图11b)在该地区的散度负值区面积小、强度弱,不利于降水的产生. 图11c为观测与模拟降水大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的空间分布,并叠加了地形. 观测显示强降水主要分布在山前区域1 km高度以下,而好成员的降水区域分布较广,甚至可以出现在海拔800 m高度以上的山坡. 相比之下,坏成员的强降水区域较小,且仅分布在地形高度600 m以下的山前地区. 这些区域都与山脉附近925 hPa风场的辐合区相对应.

综上所述,在郑州地区,好成员的对流性降水占30%左右,而坏成员的对流性降水在降水大值区域存在漏报,这表明在此次降水过程中,对流性降水起着重要的作用. 两个成员的非对流性降水的偏移也与总降水一致. 好成员的降水区域偏东北,且覆盖范围较大;坏成员的降水区域偏西,且覆盖范围较小. 同时,水汽场的误差也是不可忽视的,好成员对相对湿度的分布有更准确的预报,从而使得降水大值区域的位置和量级预报更准确. 20日08时起报的好成员对副高位置的预报偏东,而台风“查帕卡”受到的影响更为显著,因为引导该台风的路径预测偏北,南风分量也更大. 同时,坏成员对台风“查帕卡”水汽输送的预报不足,在850 hPa高度预报的东北气流较强,导致降水区向西偏移但强度不够. 好成员在925 hPa上存在风场的辐合区,因此在地形高度800 m以上预报出了大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的降水,而坏成员未能预报出辐合区,因此降水只存在于600 m以下的区域.

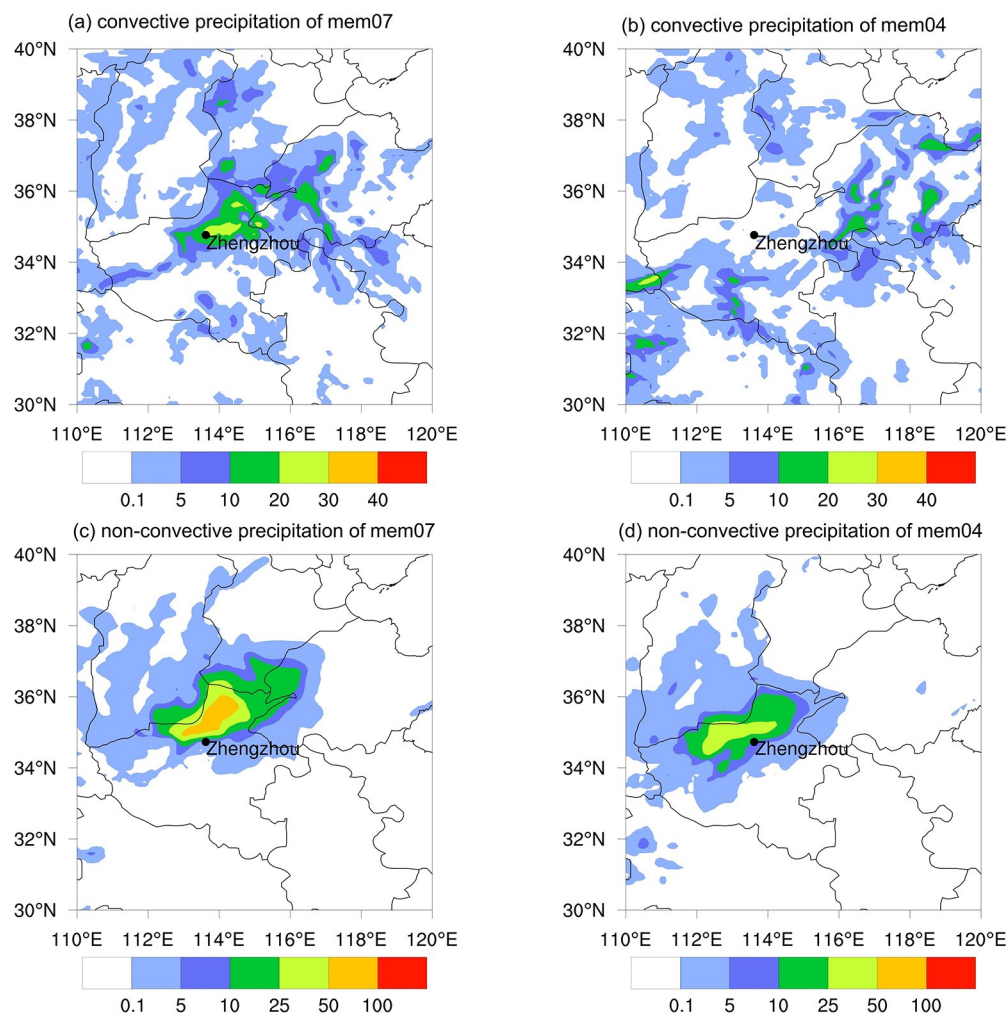


图 6 CMA-REPS 好成员 07(左)和坏成员 04(右)于 20 日 08 时起报的当日 14 时至 20 时
累积对流性降水和非对流性降水量分布图(单位:mm)

Fig. 6 Distribution of accumulative convective and non-convective precipitation of CMA-REPS for the good member 07 (left) and bad member 04 (right) (unit: mm) from 14:00 to 20:00 CST initialized at 08:00 CST on 20 July

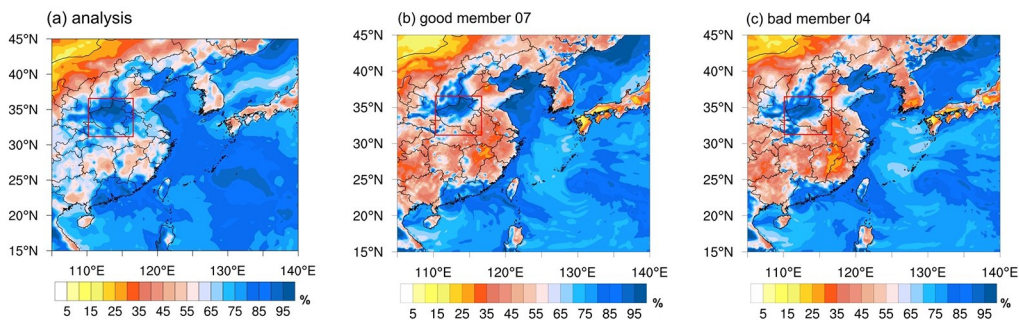


图 7 (a) NCEP-GFS 分析场在 20 日 14 时的地面 2 m 高度相对湿度场, (b) 和 (c) 分别是好成员 07 和坏成员 04 在 08 时预报的对应时间相对湿度场(红框为河南地区)

Fig. 7 The relative humidity at 2 m height above the ground level at 14:00 on 20 July from the (a) NCEP-GFS analysis, (b) good member 07, and (c) bad member 04 from CMA-REPS (The red box covers the Henan area)

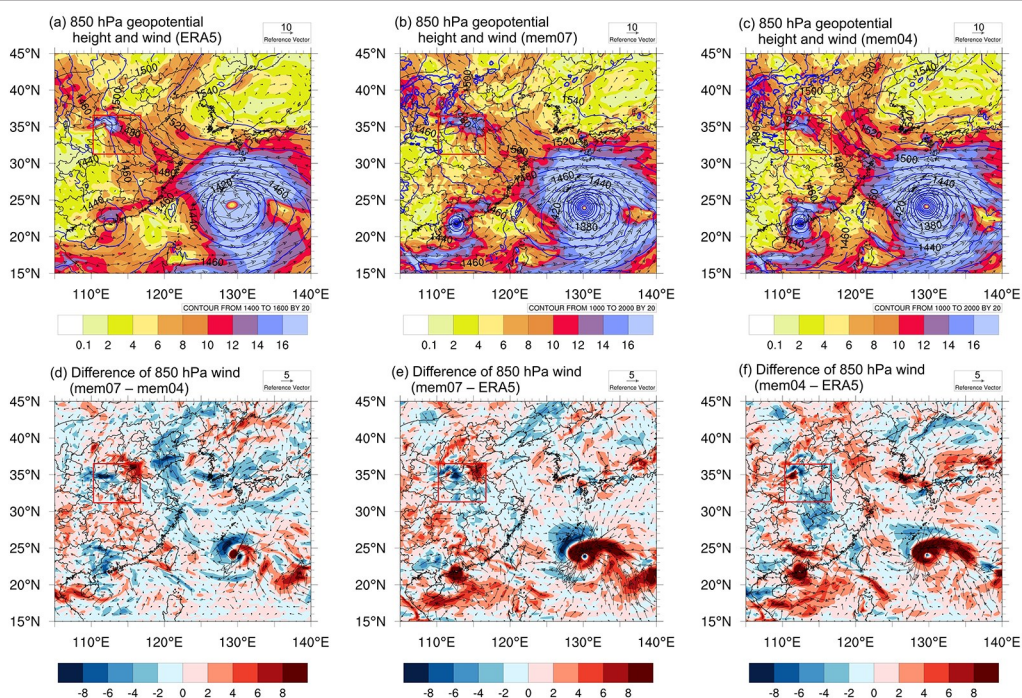


图8 20日17时的(a) ERA5分析场、(b)好成员07、(c)坏成员04的850 hPa位势高度场(等值线)和风场(矢量场);
(d~f)分别是上述风场与ERA5分析场的差值(填色为风速,红框范围内为河南省)

Fig. 8 The 850 hPa geopotential height (contours) and the wind field (vectors) of the (a) ERA5 reanalysis, (b) good member 07, and (c) bad member 04 at 17:00 CST on 20 July; (d~f) the differences between the abovementioned wind fields and ERA5 reanalysis, respectively (Shades denote wind speeds, and the red box covers the Henan Province)

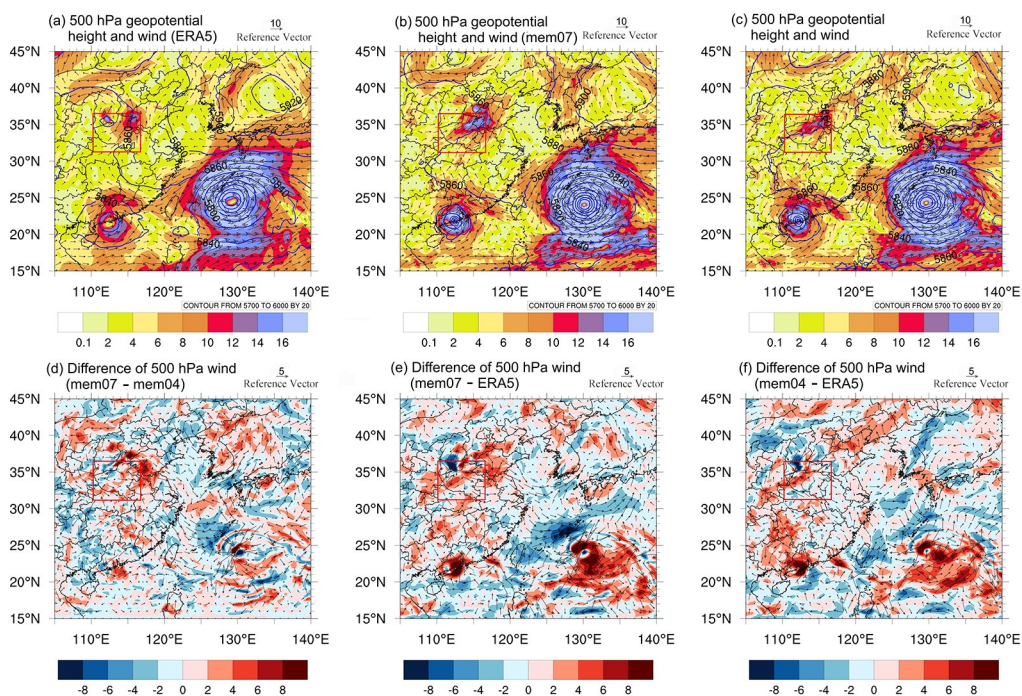
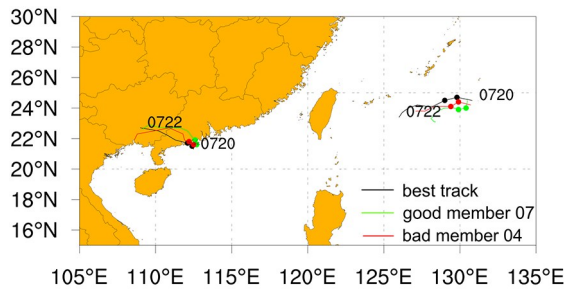


图9 同图8,但为500 hPa形势场

Fig. 9 Same as Fig. 8, but at 500 hPa height



Highlighted dots represent 14:00 and 20:00 CST on 20 July.

图 10 CMA 台风最佳路径与好坏预报成员从 20 日 08 时起报到 22 日 08 时的台风路径,左为“查帕卡”,右为“烟花”
Fig. 10 The CMA typhoon best track and forecasted typhoon track of the good and bad members from 08:00 CST on 20 July to 08:00 CST on 22 July, with "Cempa-ka" on the left and "Infa" on the right

5 结论和展望

本研究使用 CMPAS 降水分析产品和再分析数据,选取了包含 2021 年 7 月河南特大暴雨期间(20 日 14—20 时)的 6 h 累积强降水时段。评估和分析了 CMA-REPS 的集合成员和概率预报对该次暴雨的降水预报情况,并通过分析环流场与水汽等因素探讨了降水预报误差的可能来源。研究得到了以下主要结论。

(1) 比较四个不同预报时效下最强降水时段的控制预报与集合平均结果,发现更临近的降水预报结果更优,尤其是降水落区,但仍存在偏西的

误差。当降水阈值设为 50 mm 时,所有预报时效的集成员员的降水概率都极小。与 NCEP-GEFS 的预报相比,CMA-REPS 表现更为可靠且有更多成员预报出了大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的降水。

(2) 根据 TS , ETS , $BIAS$ 等降水的综合评分,在 20 日 08 时起报的集合预报成员中,选出了一个最好成员和一个最坏成员。所有成员的降水大值都明显低估,最好成员 07 的降水最大量级仅为观测值的一半。预报的降水最大位置普遍存在偏差,少数成员的最大值位置偏向东北(如好成员 07),而大多数成员的最大值位置偏向西(如坏成员 04)。

(3) 20 日 08 时起报的集合预报中,好成员预报了郑州地区占总降水约 30% 的对流性降水,坏成员未能预报对流性降水;两个成员的非对流性降水偏移也与总降水一致。好成员对相对湿度分布作出了更准确的预报,从而更准确地预报了强降水的落区和量级。对于降水区域的预报,好成员偏东北而坏成员偏西,与好成员对副高位置的预报偏移一致,其预报的台风“查帕卡”更偏北,南风分量强。两个成员都没有预报出郑州西面的低涡风速大值区且预报的台风“烟花”路径偏东南。坏成员预报的 850 hPa 东南风比好成员更强。在 925 hPa 上,好成员在郑州西部山脉迎风侧的强辐合区有利于 800 m 以上的降水产生,而坏成员的辐合区面积小、强度弱,强降水仅出现在 600 m 以

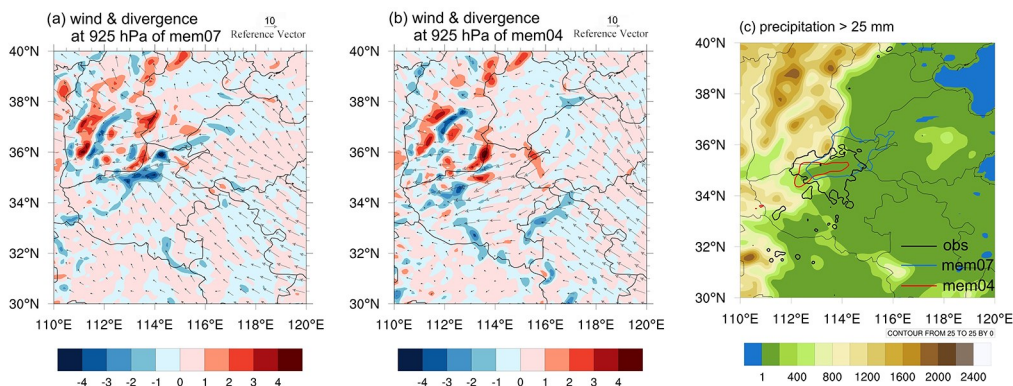


图 11 20 日 17 时 (a) 07 和 (b) 04 成员预报的 925 hPa 上的风场和散度 (10^{-4} s^{-1}), (c) 20 日 14 时至 20 时的观测数据与 20 日 08 时预报累积 6 h 降水叠加地形图,其中等值线代表降水大于 $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$ 的区域

Fig. 11 Wind and divergence (10^{-4} s^{-1}) at 925 hPa of (a) member 07 and (b) member 04 at 17:00 CST on 20 July, and (c) observed and forecasted 6 h accumulative precipitation overlaying the topographic map during the study period, where contours represent areas with precipitation greater than $25 \text{ mm} \cdot (6 \text{ h})^{-1}$

下的山前。CMA-REPS对此次强降水过程的预报偏差主要源自大气环流的模拟偏差以及复杂地形作用。

本研究仅针对“21.7”河南暴雨过程开展区域集合预报的检验评估与误差分析,因此研究结果还存在一定局限性。本次降水的评估仅限于传统检验方法,还可以参考其他空间降水检验方法等,从多角度分析降水预报的强度与落区误差。未来的研究需要考虑更多的台风暴雨过程,以系统评估中国气象局区域集合预报系统的性能。此外,由于历史数据的有限性,一些要素如水汽通量等未能加以分析。因此,还需要探索与暴雨相关的其他模式要素,并深入理解暴雨发生的机理,结合数据资料同化来改善数值模式及集合预报系统,以更好地提高预报预警的准确性。

参考文献

- [1] 罗亚丽,孙继松,李英,等. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放40年研究成果. 气象学报, 2020, 78(3): 419—450. (Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 419—450.)
- [2] Wen Y R, Xue L, Li Y, et al. Interaction between typhoon Vicente (1208) and the Western Pacific Subtropical High During the Beijing extreme rainfall of 21 July 2012. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(2): 293—304.
- [3] 姜晓曼,袁慧玲,薛明,等. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析. 气象学报, 2014, 72(2): 207—219. (Jiang X M, Yuan H L, Xue M, et al. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21—22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(2): 207—219.)
- [4] 季晓东,漆梁波. ECMWF模式降水预报与极端天气预报指数在暴雨预报中的评估与应用. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 566—573. (Ji X D, Qi L B. Evaluation and application of ECMWF model precipitation and extreme weather forecast index of precipitation on heavy rainfall forecast. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(6): 566—573.)
- [5] Kim I W, Oh J, Woo S, et al. Evaluation of precipitation extremes over the Asian domain: Observation and modelling studies. *Climate Dynamics*, 2019, 52(3): 1317—1342.
- [6] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, 21(6): 739—759.
- [7] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6): 409—418.
- [8] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3297—3319.
- [9] Khan M M, Shamseldin A Y, Melville B W. Impact of ensemble size on forecasting occurrence of rainfall using TIGGE precipitation forecasts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(4): 732—738.
- [10] Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. Using ensembles for short-range forecasting. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(4): 433—446.
- [11] 张涵斌,陈静,智协飞,等. GRAPES区域集合预报系统应用研究. 气象, 2014, 40(9): 1076—1087. (Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(9): 1076—1087.)
- [12] Xue M, Thomas K W, Wang Y J, et al. CAPS real-time storm scale ensemble and high resolution forecasts for the NOAA Hazardous Weather Testbed 2010 spring experiment//The 25th Conference on Severe Local Storms American Meteorological Society. Denver, CO, USA: AMS, 2010.
- [13] Zhu K F, Xue M. Evaluation of WRF-based convection-permitting multi-physics ensemble forecasts over China for an extreme rainfall event on 21 July 2012 in Beijing. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(11): 1240—1258.
- [14] 马申佳,陈超辉,何宏让,等. 基于BGM的对流尺度集合预报试验及其检验. 高原气象, 2018, 37(2): 495—504. (Ma S J, Chen C H, He H R, et al. Experiment and verification of the convective-scale ensemble forecast based on BGM. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 495—504.)
- [15] Wu Z P, Chen J, Zhang H B, et al. A combined verification method for predictability of persistent heavy rainfall events over East Asia based on ensemble forecast. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 26(1): 35—46.

- [16] 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等. 郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445—454. (Su A F, Lü X N, Cui L M, et al. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zhengzhou. *Torrential Rain and Disasters*, 2021, 40(5): 445—454.)
- [17] Nie Y B, Sun J Q. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(4): e2021GL097446.
- [18] Deng L, Feng J N, Zhao Y, et al. The remote effect of binary typhoon Infa and Cempaka on the “21.7” heavy rainfall in Henan province, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16): e2021JD036260.
- [19] Zhu K F, Zhang C Y, Xue M, et al. Predictability and skill of convection-permitting ensemble forecast systems in predicting the record-breaking “21.7” extreme rainfall event in Henan Province, China. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(10): 1879—1902.
- [20] 栗晗,王新敏,朱枫. “21.7”河南极端暴雨多模式预报性能综合评估. 大气科学学报, 2022, 45(4): 573—590. (Li H, Wang X M, Zhu F. Comprehensive evaluations of multi-model forecast performance for “21.7” Henan extreme rainstorm. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022, 45(4): 573—590.)
- [21] 孙帅,师春香,潘旻,等. 中国区域三源融合降水产品的改进效果评估. 水文, 2020, 40(6): 10—15, 23. (Sun S, Shi C X, Pan Y, et al. The improved effects evaluation of three-source merged of precipitation products in China. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(6): 10—15, 23.)
- [22] 王太微. 中尺度模式不确定性与初值扰动试验研究. 硕士学位论文. 北京: 中国气象科学研究院, 2008. (Wang T W. Impact of initial perturbation on meso-scale model uncertainty. Master Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.)
- [23] 龙柯吉,陈静,马旭林,等. 基于集合卡尔曼变换的区域集合预报初步研究. 成都信息工程学院学报, 2011, 26(1): 37—46. (Long K J, Chen J, Ma X L, et al. The preliminary study on ensemble prediction of GRAPES-Meso based on ETKF. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2011, 26(1): 37—46.)
- [24] Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system. *Atmosphere*, 2015, 6(3): 341—360.
- [25] 王婧卓,陈静,庄照荣,等. GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征. 大气科学, 2018, 42(2): 367—382. (Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(2): 367—382.)
- [26] 袁月,李晓莉,陈静,等. GRAPES区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究. 气象, 2016, 42(10): 1161—1175. (Yuan Y, Li X L, Chen J, et al. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(10): 1161—1175.)
- [27] Schaefer J T. The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and Forecasting*, 1990, 5(4): 570—575.
- [28] Wilks D S. Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction. San Diego: Academic Press, 1995.
- [29] 张入财,田金华,陈超辉,等. 郑州“7.20”特大暴雨极端性成因分析. 气象与环境科学, 2022, 45(2): 52—64. (Zhang R C, Tian J H, Chen C H, et al. Cause analysis of the 20 July, 2021 extreme rainstorm event in Zhengzhou. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2022, 45(2): 52—64.)
- [30] Zhang Q H, Li R M, Sun J Z, et al. A review of research on the record-breaking precipitation event in Henan Province, China, July 2021. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(8): 1485—1500.
- [31] Wei P, Xu X, Xue M, et al. On the key dynamical processes supporting the 21.7 Zhengzhou record-breaking hourly rainfall in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(3): 337—349.
- [32] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287—301.
- [33] Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690—699.

(责任编辑 杨贞)