

万子为,孙思远,赵滨,等,2024. CMA-MESO 模式对“21·7”河南特大暴雨的预报评估与误差分析[J]. 气象,50(1):33-47.
Wan Z W, Sun S Y, Zhao B, et al, 2024. Evaluation and error analysis of the July 2021 extremely severe rainstorm in Henan Province simulated by CMA-MESO model[J]. Meteor Mon, 50(1):33-47(in Chinese).

CMA-MESO 模式对“21·7”河南特大暴雨 的预报评估与误差分析*

万子为^{1,2} 孙思远^{1,2} 赵 滨^{1,2} 陈起英^{1,2}

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

2 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 为分析 CMA-MESO 模式对 2021 年 7 月 19—21 日河南特大暴雨的预报性能,除了常规观测资料,还利用雷达和卫星非常规观测资料,对模拟回波和云产品开展传统和新型空间检验,以揭示对流风暴和中尺度对流系统(MCS,基于卫星红外通道)的模式预报偏差细节,并从降水形成的水汽、动力、触发和维持机制等角度分析模式误差产生的原因。结果表明:模式能较好预报雨带形态、弱回波持续时间以及主要降水发生前期和后期 MCS 的面积和强度演变趋势;模式偏差主要体现在低估了降水强度且未报出郑州站极端小时降水,错报主雨带小时降水演变,严重低估了对流风暴和强对流风暴的持续时间,未能报出午后 MCS 面积陡增的变化趋势且 MCS 位置预报偏西、偏北;模式降水偏差的原因主要在于水汽的模拟,模式水汽垂直分布不合理,对台风烟花和查帕卡的水汽输送均偏弱,而水汽输送不足的根源是低空急流偏弱和超低空急流脉动不足。另外,模式未能在郑州站附近预报出稳定少动的地面中尺度辐合线,加之大气层结不稳定性不足和对流不稳定能量偏低,使得对流发展不够旺盛,最终导致降水预报不足。

关键词: CMA-MESO, 极端暴雨, 模式评估, 误差分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.062101

Evaluation and Error Analysis of the July 2021 Extremely Severe Rainstorm in Henan Province Simulated by CMA-MESO Model

WAN Ziwei^{1,2} SUN Siyuan^{1,2} ZHAO Bin^{1,2} CHEN Qiying^{1,2}

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

Abstract: In order to reveal the deviation characteristics of severe convective storm and mesoscale convective system (MCS, in satellite infrared channel), we employ the conventional observation and the unconventional observation (radar and satellite data) to analyze the simulation performance of CMA-MESO model in simulating the extremely severe rainstorm that occurred in Henan Province from 19 to 21 July 2021 by using traditional and new spatial verified methods. Besides, we also investigate the causes for the model deviations from the perspectives of water vapor, momentum, trigger and maintenance mechanism of precipitation. The results show that, firstly, the model can well capture the shape of rain band and duration of weak echoes as well as the evolution trend of intensity and area of MCS in the early and late stages of the primary precipitation process. Secondly, the model deviations mainly lie in that the model underestimated the intensity of precipitation, failing to predict the extreme hourly precipitation at Zhengzhou Station and

* 国家重点研发计划(2021YFC3000904)资助

2022 年 10 月 21 日收稿; 2023 年 9 月 5 日收修定稿

第一作者: 万子为, 主要从事数值模式的评估和诊断. E-mail: vivien19901223@163.com

the evolution trend of hourly precipitation of main rain band. Besides, it seriously underestimated the durations of convective storms and severe convective storms. Furthermore, the model missed the sharply increasing of MCS area in the afternoon and the simulated MCS was displaced westward and northward relative to the observation. Thirdly, the model deviation was mainly owing to the incorrect simulation of water vapor. The vertical distribution of simulated water vapor was not reasonable, and the simulated water vapor transports from Typhoon In-Fa and Typhoon Cempaka were both weak. In fact, the weak low-level jet and insufficient ultra low-level easterly jet pulsation directly led to the insufficient transport of simulated water vapor. Moreover, the model's failure in forecasting the stably maintaining mesoscale convergence line on the surface near Zhengzhou Station, in conjunction with the deficiency of atmospheric instability and underestimation of unstable convective available potential energy, made the development of the simulated convection not strong enough and finally caused the inadequate simulated precipitation.

Key words: CMA-MESO, extremely severe precipitation, model evaluation, error analysis

引 言

暴雨天气容易带来洪水、泥石流、山体滑坡和城市内涝等次生灾害,造成严重的经济损失甚至威胁生命安全(丁一汇,1994;Sun and Zhang,2017)。统计发现,国内近 50 年极端降水的平均强度和极端降水值都有增强的趋势(翟盘茂等,2007)。暴雨天气具有突发性、局地性和极端性,极大地增加了准确预报的难度(李泽椿等,2015),是预报员和学者们共同关注的热点和难点。2021 年 7 月 17 日 08 时至 21 日 08 时,河南省遭受了特大暴雨天气(以下简称为“21·7”河南暴雨),全省共有 20 个国家站日累计降水破历史极值,部分地区累计降雨量已超当地年平均降雨量。尤其是郑州站 20 日 16—17 时的小时降雨量达 201.9 mm,突破建站以来的历史纪录,且超过了“75·8”特大暴雨中河南林庄小时降雨量的 198.5 mm。“21·7”河南暴雨持续时间长、极端性强、引发特大洪水和城市内涝,造成巨大的经济损失并危害生命安全,引发社会和学者们广泛关注。针对河南暴雨的形成机理和特征,学者们从大尺度天气条件、水汽输送、极端小时降水的动力机制、强降水演变特征等角度开展了研究。张霞等(2021)从环流形势场和偏离气候态异常方面分析了造成强降水的大尺度天气条件成因。汪小康等(2022)发现强降水的水汽大量来自西太平洋的水汽沿边界层和对流层低层输送,以及来自南海的水汽沿对流层中低层输送。Yin et al(2022)提出极端小时降水的动力机制为准静止的 γ 中尺度对流系统和周围弧形辐合区利于强上升气流,使得对流系统内部云微物理过程

产生的降水与上升气流区水平输送的降水叠加,从而加强降水效率。苏爱芳等(2022)详细分析了不同阶段极端短时强降水对流系统的形态结构和演变特征。杨浩等(2022)从累计降水量、降水强度和时间演变等角度分析了暴雨的极端特征。这些研究可以加深对河南暴雨形成机理的理解,但河南暴雨成因复杂,仍有许多值得深入探索和挖掘的问题,且模式对暴雨极端性的预报难度较大,而目前针对模式预报偏差的研究相对较少,史文茹等(2021)对比分析了多模式对河南暴雨的降水预报偏差,揭示出 PWAFS 高分辨率区域模式预报的降水强度优于全球模式,且降水具有沿地形分布的特征。

千米尺度高分辨率模式已成为强降水精细化预报的重要手段。尽管极端降水是小概率事件,模式预报存在明显不足,但 Hally et al(2015)指出数值预报的不确定性对于极端降水很重要且是提高降水预报的关键。评估和溯源模式暴雨预报偏差,一方面有助于加深对暴雨机制和模式关键偏差特征的理解,另一方面也可改进模式提供参考。Caumont et al(2021)通过评估法国确定性和集合预报模式,揭示了位于法国西南部的强降水与地中海低压、暖湿气流以及近地面较长时间维持稳定的中尺度系统有关。薛一迪和崔晓鹏(2020)对台风威马逊登陆期间 WRF 模式强降水的物理机制展开诊断,揭示了主体环流圈内降水强度变化与水汽通量辐合以及云中水凝物的联系。这些研究有助于理解模式偏差特征的成因,但仅仅利用常规观测资料还不足以刻画模式更多角度的偏差细节特征。WMO 于 2015 年启动的为期十年的高影响天气项目强调,利用非常规观测资料进行评估是近年来的重要研究方向

(Marsigli et al, 2020)。国外利用闪电、雷达、卫星、城市数据集和来自保险公司的灾害报告等非常规观测资料开展了高影响天气评估(Wapler et al, 2012; 2015; Keller et al, 2015), 而国内利用非常规资料做模式评估的相对较少, 唐文苑等(2018)和张小雯等(2020)利用雷达资料分别采用传统和新型空间检验方法评估高分辨率模式对中小尺度对流天气的预报能力。

CMA-MESO(原 GRAPES-MESO)模式是中国自主研发的数值预报模式, 经过十多年的针对性开发和研究工作(薛纪善和陈德辉, 2008; Zhang et al, 2019), 于2016年建立了覆盖中国东部地区3 km水平分辨率的准业务系统, 并在2019年将范围进一步扩展到全中国(沈学顺等, 2020)。众所周知, 模式对极端降水预报会存在一定的不足, 但探究极端降水天气的形成机理, 并基于此分析模式在哪些方面存在预报偏差, 这些偏差之间如何相互作用导致最终极端降水预报的不足, 可有助于模式的改进和释用。因此本文利用雷达和卫星非常规资料以及常规资料, 针对CMA-MESO模式对“21·7”河南暴雨的预报开展偏差评估与溯源分析, 旨在从降水、模拟雷达回波以及云产品等多角度揭示模式暴雨预报的偏差细节特征, 并尝试从强降水形成的水汽、动力、触发和维持机制等角度开展模式偏差成因的诊断分析。

1 资料和方法

1.1 观测资料

选用的资料时段为2021年7月20日08时至21日08时(北京时, 下同)。使用的观测资料如下: (1)来自于中国气象局预报业务平台MICAPS的全国地面逐小时填图数据和来自于国家气象信息中心的地面自动气象观测站小时降水数据。(2)全国组合雷达反射率数据, 水平分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 时间分辨率为6 min, 区域范围选取河南省及周边地区($30^\circ \sim 37^\circ \text{N}$, $108^\circ \sim 117^\circ \text{E}$)。(3)葵花8号静止卫星高级成像仪水汽通道和红外通道数据, 空间分辨率为 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$, 时间分辨率为10 min, 区域范围为中国区域($15^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 140^\circ \text{E}$); 中国气象局气象探测中心提供的逐小时地基全球定位系统GPS反演的PW(整层大气可降水量)数据。(4)欧

洲中期天气预报中心的第五代再分析资料(ERA5), 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为1 h, 垂直层为37层, 区域范围为全球。其中对于ERA5再分析数据对“21·7”河南暴雨过程分析的可靠性已开展了部分研究(汪小康等, 2022), 本文也采用此资料来辅助分析本次过程。

1.2 模式

模式为CMA-MESO 5.1业务版本, 该模式为非静力平衡经纬度格点中尺度模式, 采用半隐式半拉格朗日时间积分/平流方案, 水平分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$, 时间步长为120 s, 垂直层为50层。模式包括除对流参数化方案以外的全物理过程的描述。CMA-MESO模式起报时间为02、05、08、11、14、17、20、23时。本文选取19日20时起报, 预报时长取36 h内的逐小时预报结果。另选取CMA-GFS 3.3业务版本来对比CMA-MESO模式预报的优劣, CMA-GFS模式的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 垂直层为89层, 同样选取19日20时起报, 预报时长取36 h内的逐3 h预报结果。

1.3 方法

1.3.1 模拟雷达回波评估方法

CMA-MESO模式回波产品是由云微物理方案中输出的暖云和冷云粒子, 通过后处理诊断计算方案(Thompson et al, 2004)得到各垂直层的雷达反射率, 再对每个水平网格点垂直范围内取最大值从而得到雷达组合反射率产品。回波产品可以提供更多中尺度和风暴尺度的细节特征。评估模式组合反射率产品时, 由于模式和雷达资料的时空分辨率不同, 统一水平分辨率时对雷达资料作稀疏化处理, 即将雷达资料抽稀到模式对应的格点上, 时间分辨率统一取为1 h。将回波产品根据反射率因子的不同阈值划分为三个等级(Dixon and Wiener, 1993): 对流风暴外围层状云($20 \text{ dBz} \leq \text{反射率因子} < 35 \text{ dBz}$)、对流风暴($35 \text{ dBz} \leq \text{反射率因子} < 50 \text{ dBz}$)、强对流风暴(反射率因子 $\geq 50 \text{ dBz}$)。针对不同阈值的对流风暴计算平均强度和发生总时次:

(1)当格点的组合反射率因子满足相应阈值条件时, 记为发生1次。不同阈值的对流风暴发生总时次为评估时段内格点的总计发生时次;

(2)不同阈值对流风暴的平均强度=评估时段内满足相应阈值条件的格点组合反射率因子强度之

和/满足相应阈值对流风暴的发生总次数。

1.3.2 云图评估方法

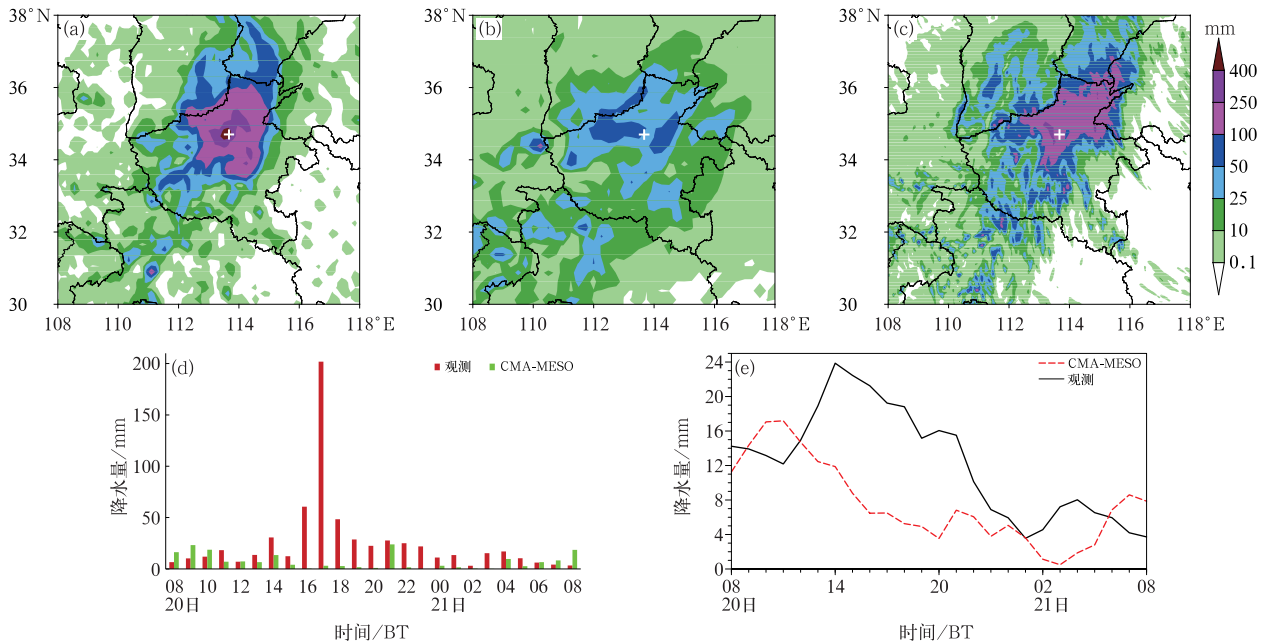
模式云图产品预报的 MCS 对于分析产生暴雨的中小尺度系统演变具有十分重要的意义。CMA-MESO 模式红外通道模拟卫星云图是通过后处理云图模拟技术建立云粒子物理特性与红外波段云光学特性之间的关系模型得到。对云图评估采用新型空间检验方法——基于对象诊断的空间检验方法 (method for object-based diagnostic evaluation, MODE) (Davis et al, 2006; 刘凑华和牛若芸, 2013)。MODE 方法通过识别和匹配观测和模式预报的目标, 计算目标相似度从而获得多种属性的评估信息。国家气象中心业务标准将 MCS 监测产品根据红外通道的云顶亮温 (black body temperature, TBB) 划分了三个阈值: -32 、 -52 和 -72°C (郑永光等, 2013)。针对云图的 MODE 方法选取目标为 TBB 低于 -32°C 的 MCS, 评估 MCS 面积、强度的时序变

化以及位置预报偏差。评估的区域范围选取河南省及周边地区 ($30^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)。

2 模式结果分析

2.1 模式评估结果

实况显示大暴雨以上量级的强降水落区主要位于河南省北部和中部, 其中伏牛山脉附近出现超过 250 mm 的特大暴雨, 郑州站附近出现超过 400 mm 的极端降水 (图 1a)。CMA-GFS 模式提前 12 h (20 时起报) 能大致模拟出降水形态, 但对于 100 mm 以上的降水强度预报明显偏弱, 对极端暴雨更是缺乏预报能力 (图 1b)。相较而言, 区域中尺度模式对暴雨的预报较全球模式优势明显, CMA-MESO 模式对 100 mm 以上的大暴雨预报较好, 但仍然低估了 250 mm 以上降水, 仅在郑州站偏西位置预报出一个



注: 十字星标示郑州站所在位置, 下同。

图 1 2021 年 7 月 20 日 08 时至 21 日 08 时地面降水观测和模式预报对比

(a) 观测累计降水, (b) CMA-GFS 模式累计降水, (c) CMA-MESO 模式累计降水, (d) 观测和模式预报郑州站逐小时降水时序图, (e) 区域平均 ($34.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$) 的观测和模式逐小时降水时序图

Fig. 1 Observed and simulated accumulated precipitation from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2021

(a) observed 24 h accumulated precipitation, (b) 24 h accumulated precipitation simulated by CMA-GFS, (c) 24 h accumulated precipitation simulated by CMA-MESO, (d) time series of the observed and simulated 1 h precipitation at Zhengzhou Station, (e) time series of the observed and simulated 1 h areal mean ($34.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$) precipitation

范围较小的特大暴雨中心(图1c)。另外,陈起英等(2022)发现针对河南暴雨,CMA-MESO、CMA-GD、CMA-BJ、CMA-SH等模式对暴雨以上量级的评分都高于ECMWF模式,且CMA-MESO和CMA-BJ在降水量级上表现更优。鉴于CMA-MESO模式对“21·7”河南暴雨的降水预报占优,接下来主要分析CMA-MESO模式(以下模式均指CMA-MESO模式)暴雨预报特征和偏差。

分析郑州站小时降水演变趋势。实况显示郑州站主要降水时段为14—20时,其中峰值出现在16—17时,小时降水量达201.9 mm。模式未能较好地模拟出郑州站小时降水演变趋势,将主要降水时段错报在上午,且小时降水峰值未超过50 mm(图1d)。考虑模式与实况强降水中心存在东西向的位置偏差,在最强降水中心附近做区域平均($34.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$)的降水日变化图(图1e),发现模式预报的最强降水峰值在上午,而实况峰值则出现在下午,且模式预报的雨带降水强度远远不及实况,这与郑州站小时降水演变的预报偏差特征一致。

对流风暴的维持和发展可以加强降水效率。从观测统计的20日08时至21日08时不同阈值对流

风暴出现总时次分布,并结合逐小时雷达组合反射率图(图略)来看,河南省主雨带外围的区域持续了较长时间(6~15 h)的层状云回波(图略),主雨带区则以维持了12~21 h的长时间对流风暴为主(图2a),其中郑州站及附近维持了2~10 h的强对流风暴(图2c)。评估模式回波产品不同阈值对流风暴的平均强度和出现总时次,发现模式对于层状云回波的强度预报略偏强,对于对流风暴(图2b, 2e)和强对流风暴回波(图略)的平均强度预报与观测接近;模式预报的层状云回波持续时间也与观测接近(图略),但主雨带落区的对流风暴和强对流风暴回波的持续时间明显偏低(图2d, 2f)。

此次暴雨过程在河南省上空持续监测到一个范围较大的MCS。尽管传统的点对点检验方法(如TS、Bias、POD评分等)可以对模式预报的MCS的优劣给出综合评价,但无法对更为关注的MCS的位置、强度以及面积等属性给出定量检验结果,因此采用MODE方法对模拟的红外云图产品展开评估。首先给出MCS目标匹配示例图(图3)。在极端降水发生前的2 h(20日14时),从葵花8号卫星红外云图上可以看到覆盖河南省中北部上空的范围较

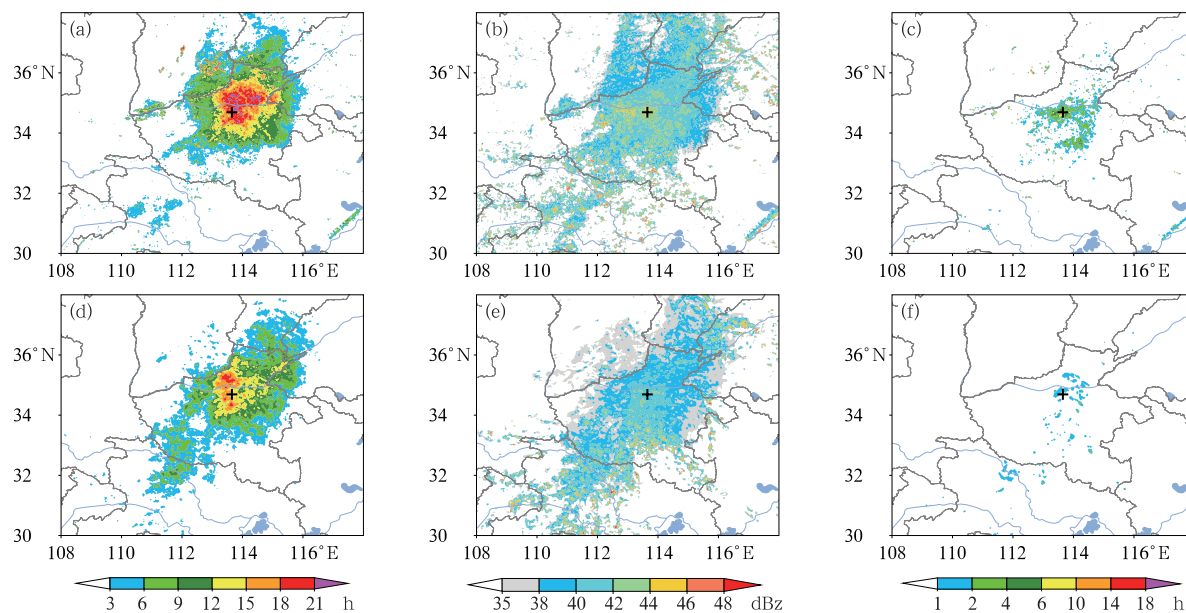


图2 2021年7月20日08时至21日08时(a,b,c)观测,(d,e,f)模式预报的(a,b,d,e)对流风暴和(c,f)强对流风暴的(a,c,d,f)发生总时次分布与(b,e)平均回波强度

Fig. 2 Distribution of (a, c, d, f) total occurrence times and (b, e) average echo intensity of radar reflectivity by (a, b, c) observation and (d, e, f) model simulation from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2021 (a, b, d, e) convective storm, (c, f) severe convective storm

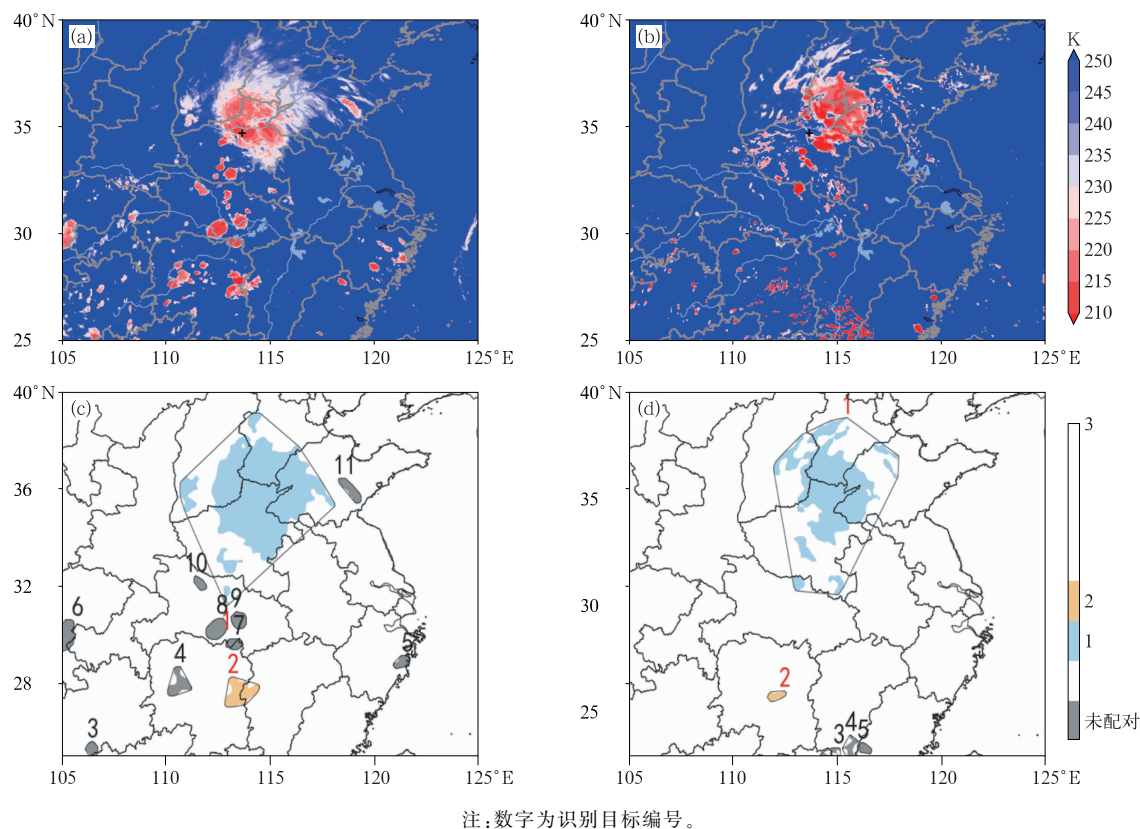


图 3 MODE 方法对 2021 年 7 月 20 日 14 时葵花 8 号卫星红外通道云图和模拟云图的目标匹配示例图

(a) 葵花 8 号红外云图, (b) 模拟红外云图, (c) 观测目标识别, (d) 模式目标识别

Fig. 3 Target matching between infrared channel cloud image of Himawari-8 and model simulation at 14:00 BT 20 July 2021 by MODE method

(a) infrared channel cloud image of Himawari-8, (b) infrared channel cloud image of model, (c) target recognition for observation, (d) target recognition for simulation

大的 MCS, 其云顶亮温低于 -52°C , 云团发展旺盛, CMA-MESO 模式能较好地模拟出这个 MCS, 范围与实况大致接近, 但强度偏强且云团明显未覆盖到郑州上空。经过平滑处理后进行 MCS 目标匹配, 识别出其编号为 1, 由此给出模式预报目标编号为 1 的 MCS 的面积、强度日变化偏差特征 (图 4a, 4b)。观测到 MCS 的演变分为三个阶段: 一是 08—14 时, MCS 的面积和强度变化趋于稳定, 模式能预报出一致的变化趋势, 但面积偏小且强度偏强, 需要说明的是, 由于模式云图是诊断产品, 而根据以往的评估发现模式模拟的红外云图的云顶亮温较卫星产品存在偏低的问题, 因此这里主要分析强度的演变趋势; 二是 14—20 时, MCS 的面积突然陡增约 90%, 同时强度也明显增强, 亮温陡降约 10 K, 此时模式仅能预报出 MCS 强度略微增强的变化趋势, 亮温减少约 3 K, 但未能预报出在强降水发生阶段的 MCS 面积陡增的变化趋势; 之后, MCS 的强度和

面积变化再次维持稳定。从模式预报的 MCS 位置偏差来看 (图 4c), 20 日 08 时至 21 日 08 时, MCS 的位置偏差主要表现为偏西和偏北的特征。

综上评估, 发现 CMA-MESO 模式对整体雨带的形态和大暴雨落区、弱回波的持续时间、主要降水发生前期和后期 MCS 的面积和强度演变趋势预报较好, 说明模式对强降水发生前期有较好的指导意义。但在强降水发生时段存在较明显的偏差: (1) 降水强度明显偏弱, 尤其低估了 250 mm 以上降水, 并严重低估了郑州站极端小时降水; (2) 将发生在下午的主雨带错报在上午; (3) 严重低估了对流风暴和强对流风暴的持续时间, 主要降水时段内未报出 MCS 面积陡增的变化, 且 MCS 位置预报偏西、偏北, 而这些也是造成降水强度不足的重要原因。因此下一节将重点针对模式呈现出的这些与强降水相关的偏差, 选取 20 日 08—20 时展开误差分析。

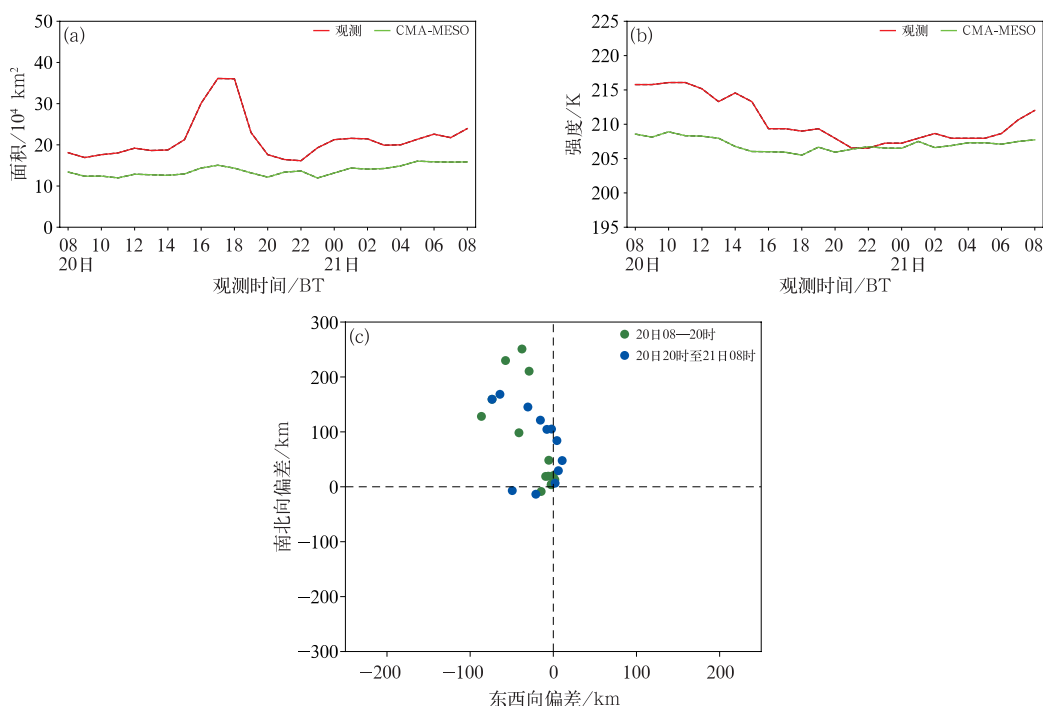


图 4 2021 年 7 月 20 日 08 时至 21 日 08 时观测和模式匹配的 MCS(a) 面积、
(b) 5% 分数位强度时序变化图和 (c) 位置偏差

Fig. 4 Time series of matched MCS (a) area, (b) 5% intensity quantiles,
(c) positional deviation of observation and simulation
from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2021

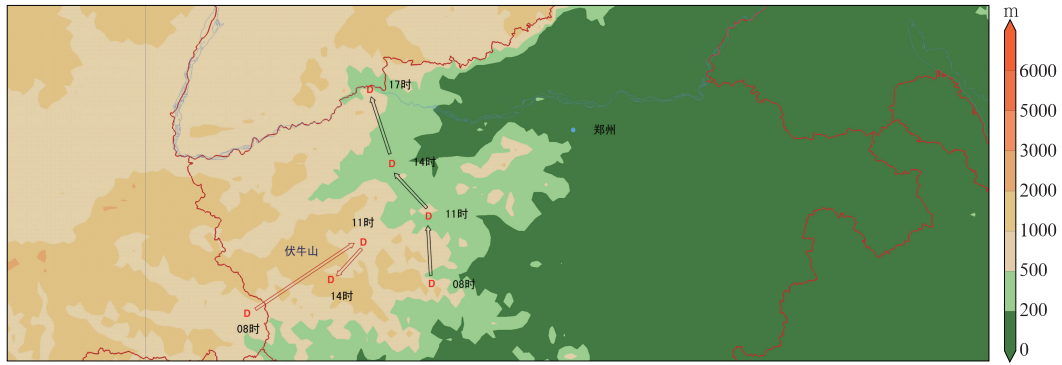
2.2 模式误差分析

此次暴雨过程受多个天气尺度系统共同影响——200 hPa 维持稳定的高压脊、500 hPa 位于内蒙古的大陆高压、西太平洋副热带高压、台风烟花和查帕卡, 以及低层的低涡系统(张霞等, 2021; 苏爱芳等, 2021)。将 CMA-MESO 模式预报的 20 日 08 时和 20 时的各层环流形势场与实况逐一对比(图略), 整体而言, 模式能较好地还原出天气尺度系统环流背景场, 但对于高层高压脊强度预报偏弱 2 dagpm, 说明高层辐散略偏弱, 另外低层的低涡系统位置预报偏西。ERA5 分析场 20 日 08—20 时逐 3 h 低涡路径演变显示, 低涡系统围绕着伏牛山脉缓慢往北移动, 利于暴雨的维持和加强, 而模式预报的低涡系统一直较分析场偏西, 这也是造成 MCS 位置和特大暴雨中心位置偏西的主要原因(图 5)。接下来, 将着重从强降水的水汽、动力、触发和维持机制等方面展开模式误差诊断。

2.2.1 水汽

大气可降水量(PW)反映大气整层湿度状况,

可作为诊断模式水汽偏差的物理量之一。以 16 时观测的 PW 为参考, 河南省大部分地区 PW 能达到 65 mm 以上, 大气水汽条件充沛, 尤其是郑州站附近观测到超过 70 mm 的 PW 强中心(图 6a), 在此产生了超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水中心(图略), 同时这个区域也位于低层东风急流区, 东风急流最强能达到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6c)。CMA-MESO 模式能较好地预报出河南省大部分地区超过 65 mm 的 PW, 但明显低估了郑州站附近超过 70 mm 的 PW 强中心(图 6b), 且预报的东风急流较分析场偏弱约 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时位于低空切变南侧的东南风也较分析场和观测略偏弱(图 6d)。进一步从水汽垂直分布来看(图 7), 以郑州站为例, 20 日 08—20 时郑州站 500 hPa 以下达到完全饱和, 而在极端降水发生前期, 模式预报的低层未达到完全饱和, 高层水汽却偏湿, 这说明尽管模式预报的整层水汽含量充沛, 但由于水汽垂直分配不合理导致层结不稳定性预报不足, 表 1 给出的郑州站探空与模式预报的最有利抬升指数(BLI)值对比可以验证大气层结不稳定性预报不足。



注:填色为实际地形高度。

图 5 2021 年 7 月 20 日 08—20 时 ERA5 分析场(黑色箭头)和模式(红色箭头)预报低涡路径演变示意图

Fig. 5 Evolution of movement path of low vortex from 08:00 BT to 20:00 BT 20 July 2021 based on ERA5 analysis (black arrow) and model simulation (red arrow)

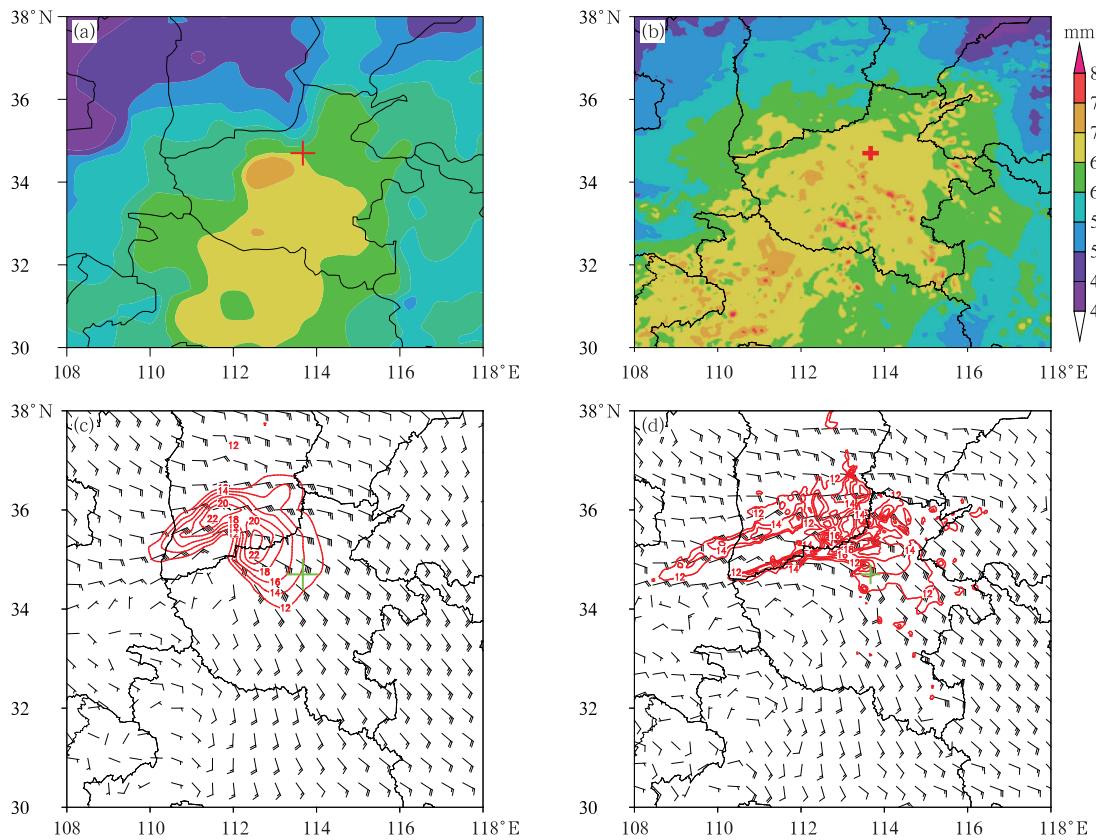


图 6 2021 年 7 月 20 日 16 时(a,b)PW 和(c,d)850 hPa 风场(风羽,等值线:风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 观测, (b, d) 模式预报, (c) ERA5 分析场

Fig. 6 (a, b) The PW and (c, d) 850 hPa wind field (barb, contour $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 16:00 BT 20 July 2021

(a) observation, (b, d) simulation, (c) ERA5 reanalysis

暴雨的形成条件除了自身充沛的水汽以外,还需要周边源源不断的水汽输送。低层水汽通量显示水汽主要是从台风烟花沿着超低空急流往西北方向

输送至河南省,并于 08 时在郑州站形成一个小范围的水汽通量强中心(图略)。水汽通量输送随着时间变化而增大,到极端降水发生前(16 时),来自台风

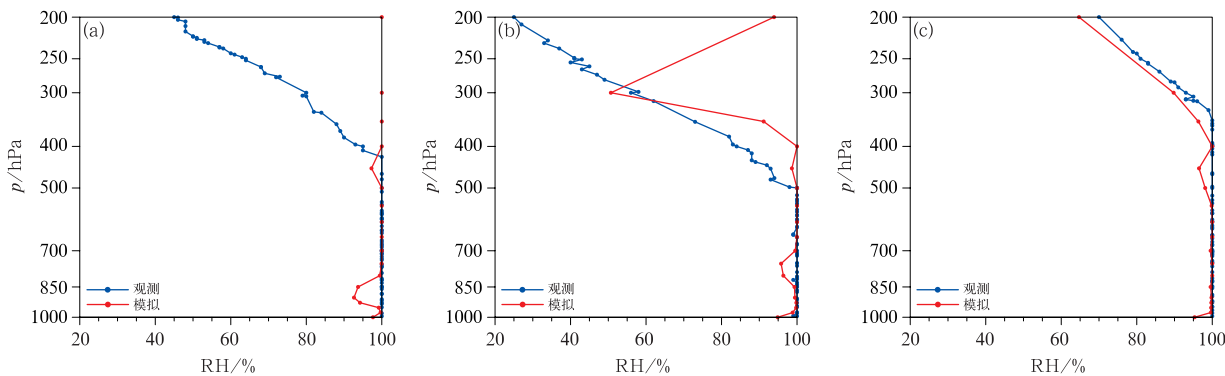


图 7 2021 年 7 月 20 日(a)08 时,(b)14 时,(c)20 时郑州站探空与模式预报 RH 廓线
Fig. 7 RH profiles of sounding and simulation at Zhengzhou Station at
(a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT and (c) 20:00 BT 20 July 2021

表 1 2021 年 7 月 20 日 08—20 时郑州站探空观测和模式预报的物理量对比
Table 1 Comparison of physical variables between sounding and simulation
at Zhengzhou Station from 08:00 BT to 20:00 BT 20 July 2021

物理量	来源	08 时	14 时	20 时
CAPE/(J · kg ⁻¹)	探空观测	685.3	91.5	9.3
	CMA-MESO	152.6	502.3	39.1
BLI/K	探空观测	-2.2	-0.8	-0.1
	CMA-MESO	-0.8	-0.7	-0.1

烟花的水汽输送明显增强,且郑州站附近水汽通量中心的强度明显增强,同时郑州站西侧低层强烈的水汽辐合导致极端降水发生。诊断模式低层水汽通量输送,发现模式能预报来自台风烟花的水汽输送,但未报出极端降水发生前水汽输送明显增大的变化趋势,郑州站周边水汽通量中心强度预报明显偏弱,且模式预报的低层水汽辐合区不如分析场显著,范围也较分析场偏小(图 8)。除了台风烟花输送水汽外,孙跃等(2021)研究表明极端降水发生前 2 h 有南起台风查帕卡的自西南向东北的水汽输送带,葵花卫星水汽云图上可以直观地看到这条水汽输送带——南起台风查帕卡的一系列尺度较小的对流云团(图 9a)。模式模拟的水汽通道上的云顶亮温与卫星观测的差值表明模式明显低估了水汽输送带的水汽,且对于台风查帕卡外围螺旋云带的水汽预报偏弱(图 9b)。以上分析表明模式对台风烟花和查帕卡的水汽输送均偏弱也是造成降水强度和极端降水预报不足的重要原因。

2.2.2 低空急流

850 hPa 和 925 hPa 的高空填图(图略)表明自 19 日夜间起,低空东风急流和超低空东风急流开始增强并长时间持续。以往的研究表明,低空急流的加强利于出现气旋式切变或环流,并导致低层垂直

上升运动的发展,从而加强对流和降水(雷蕾等, 2020)。分析超低空东风急流的脉动与降水的对应关系,发现模式在 09—12 时东风急流脉动明显增大,中心风速达到 16~18 m · s⁻¹,伴随低层出现较强的上升运动,垂直速度最强能达到 1.2 m · s⁻¹,对应模式预报出的上午时段的降水峰值。随后东风急流减弱,尽管在 14—15 时和 18 时也出现东风脉动增大以及低层上升运动,但由于东风脉动增大的强度不如第一次,导致后两个时段的降水强度不如上午时段,且远远低于观测的降水峰值。而 16—17 时东风急流脉动减弱且无明显低层上升运动,导致未能报出 17 时的极端降水(图 10)。由此表明模式小时降水演变的误差与东风急流脉动预报不足密切相关。此外,李建辉(1982)提出偏强的低空急流通过夹卷作用在暴雨区进行动量、水汽和能量输送,有助于加剧降水强度。结合 2.2.1 节分析出在极端降水发生前,模式预报的低空东风急流和切变线东南侧的东南风也偏弱,考虑正是由于低空急流偏弱和超低空急流脉动不足,导致输送到强降水区的水汽不足,从而造成降水不足。

2.2.3 触发和维持

深厚湿对流的发生需要满足水汽、垂直层结不稳定和抬升触发三个条件(俞小鼎等,2012)。图 11a 表

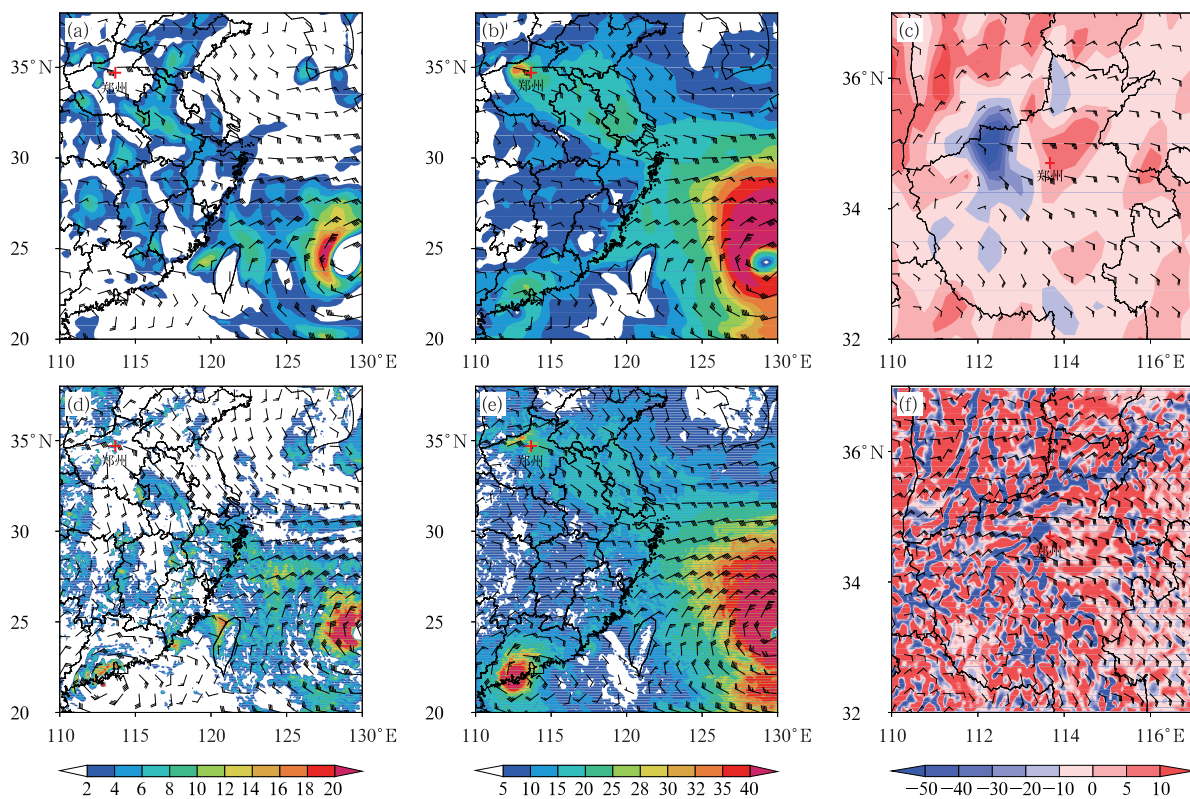


图 8 2021 年 7 月 20 日 (a,b,c)ERA5 分析场和(d,e,f)模式预报的 925 hPa 水汽输送(填色)及风场(风羽)
(a,d)16 时和 08 时水汽通量差值(单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$), (b,e)16 时水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$),
(c,f)16 时水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The 925 hPa water vapor flux/divergence (colored) and wind (barb) from (a, b, c) ERA5 reanalysis and (d, e, f) model simulation on 20 July 2021

(a, d) difference value of water vapor flux between 16:00 BT and 08:00 BT (unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$),
(b, e) water vapor flux at 16:00 BT (unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$),
(c, f) water vapor flux divergence at 16:00 BT (unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

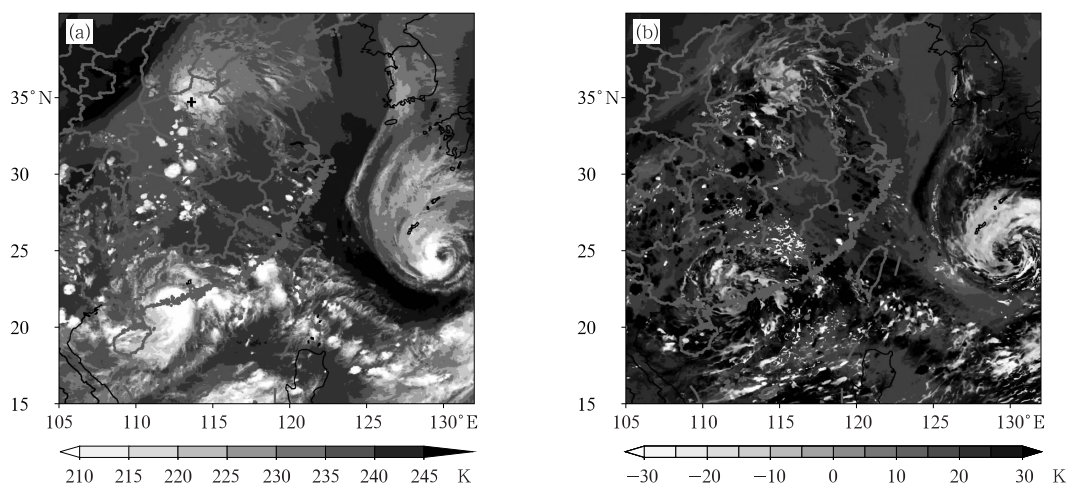


图 9 2021 年 7 月 20 日 14 时(a)葵花 8 号卫星水汽通道云图,(b)模式模拟与卫星观测偏差

Fig. 9 (a) Water vapor cloud images from Himawari-8 satellite and
(b) the deviation from model simulation at 14:00 BT 20 July 2021

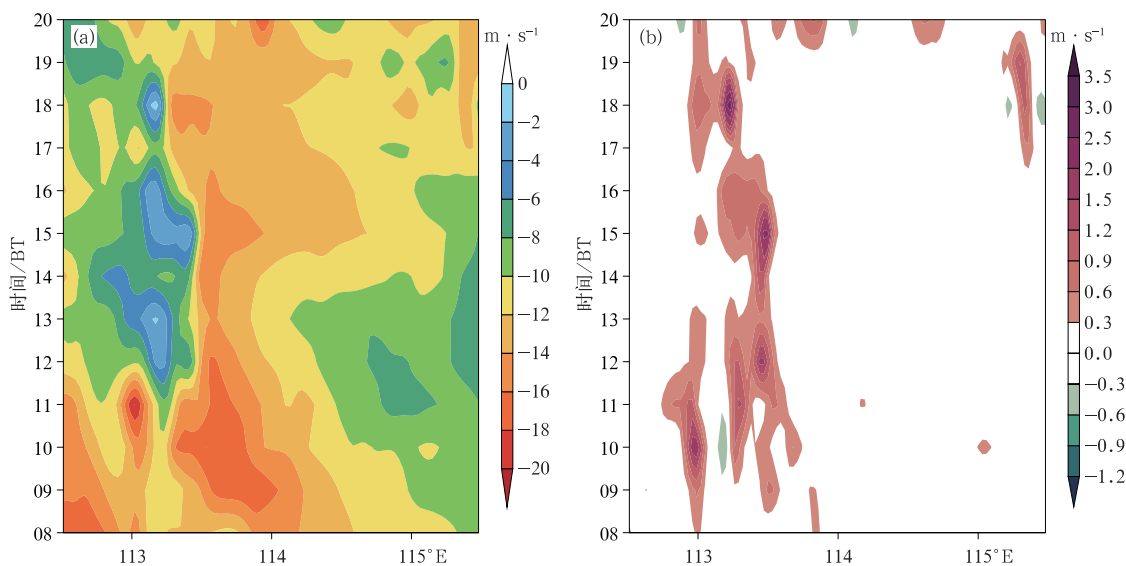


图 10 2021 年 7 月 20 日 08—20 时模式预报 (a) 925 hPa U 分量风,
(b) 850 hPa 垂直速度沿 34.7°N 的纬向剖面

Fig. 10 Zonal cross-section along 34.7°N of (a) U wind at 925 hPa and (b) vertical speed at 850 hPa by model simulation from 08:00 BT to 20:00 BT 20 July 2021

明在对流风暴和强对流风暴出现区域($113^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$, 图 2), 模式预报的 BLI 大多为 $-1\sim 0\text{ K}$, 预报的大气层结不稳定程度较低, 一般并不利于出现对流风暴或是强对流风暴这类发展深厚的湿对流, 同时 2.2.1 节针对郑州站上空层结不稳定度预报不足的分析也可辅证这一结论。另外, 表 1 给出的模式预报的郑州站在 20 日 08 时的 CAPE 明显较探空偏低, 并且结合模式在 $113^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 区域内的 CAPE 演变以及和分析场的对比(图 11b, 11c), 发现模式预报的

10—18 时的 CAPE 偏低, 大多仅有 $500\sim 1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较分析场明显偏低约 $600\sim 1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

以往的研究表明, 在高温高湿且对流不稳定的环境条件下, 地面中尺度辐合线有利于对流的触发和发展(徐灵芝等, 2014; 徐珺等, 2014)。逐小时分析地面自动观测站的风场, 发现 08—20 时在郑州站附近均能清晰地分析出地面中尺度辐合线(图 12a), 长时间稳定少动的地面辐合线上不断触发新生对流, 由南向北移动与原对流(指在 08 时之前已经在

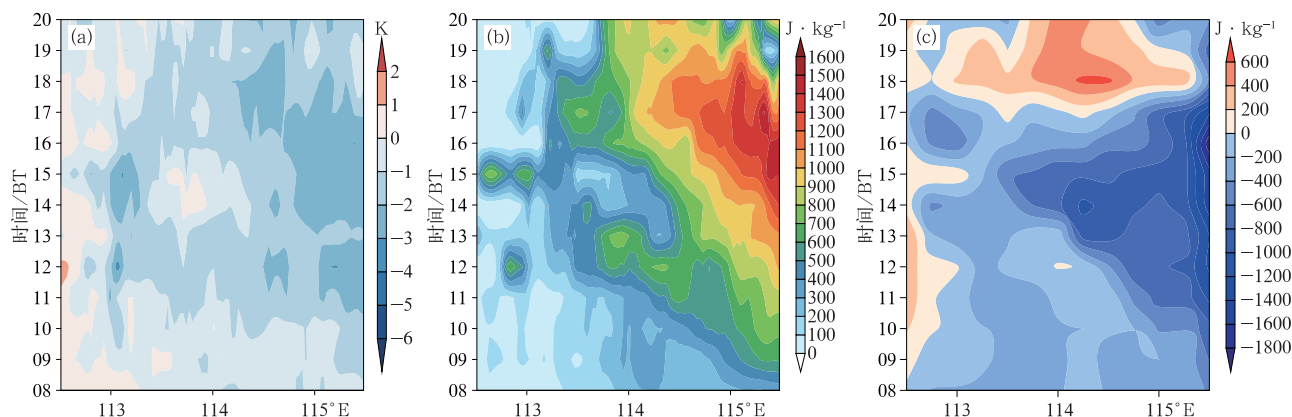


图 11 2021 年 7 月 20 日 08—20 时模式和 ERA5 分析场沿 34.7°N 的纬向剖面
(a) 模式预报的 BLI, (b) 模式预报的 CAPE, (c) 模式和 ERA5 分析场的 CAPE 差值

Fig. 11 Zonal cross-section of model simulation and ERA5 reanalysis along 34.7°N
from 08:00 BT to 20:00 BT 20 July 2021

(a) simulated BLI, (b) simulated CAPE, (c) difference value of CAPE between model simulation and ERA5 reanalysis

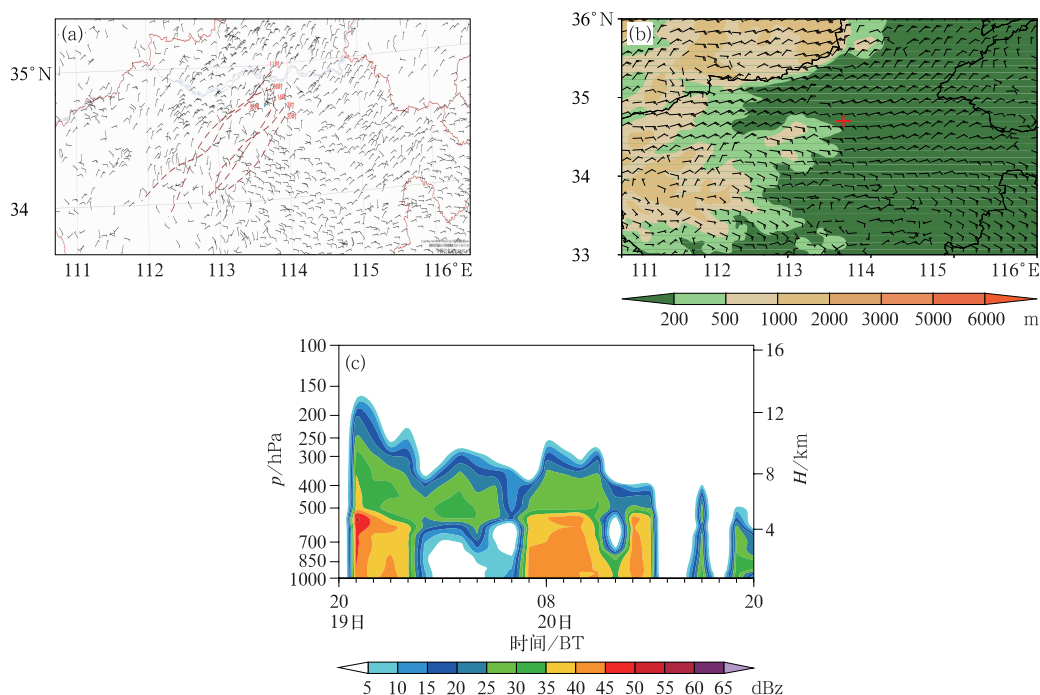


图 12 2021 年 7 月(a,b)20 日观测和模式预报的地面风场,(c)模式预报郑州站
19 日 20 时至 20 日 20 时回波垂直剖面

(a)08—20 时地面辐合线(虚线)和 17 时观测地面 2 m 风场(风羽),

(b)模式预报 17 时地面 2 m 风场(风羽)和地形高度(填色)

Fig. 12 (a, b) The observed and simulated surface wind on 20 July, (c) simulated vertical cross-section of echoes at Zhengzhou Station from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 July 2021

(a) evolution of surface convergence line (dotted line) from 08:00 BT to 20:00 BT and

observed wind (barb) at 2 m at 17:00 BT, (b) simulated wind (barb)

at 2 m at 17:00 BT and terrain height (colored)

郑州站附近形成的强对流)合并加强,形成较大范围反射率强度超过 45 dBz 的强回波区(图略),极大地加强了降水效率。而在考虑模式地形与观测无明显差异的情况下(图 12b 和图 5),发现模式预报在距离郑州站西侧和南侧约 50 km 范围外有两个风场辐合区(以图 12b 给出的 17 时模式预报地面风场为例),尽管在风场辐合区有触发新生对流,但没有与原对流合并加强。此外,苏爱芳等(2021)分析郑州站 7 月 19 日 20 时至 20 日 20 时雷达垂直剖面发现,20 日 14 时前郑州站回波中心强度约为 35~40 dBz,较强回波顶高超过 12 km,而 14—17 时回波发展旺盛,尤其是 14—16 时反射率为 55 dBz 的回波顶高超过 10 km,属于深厚湿对流型强降水。对比模式预报的郑州站回波垂直剖面演变图(图 12c),在强降水发生前期,较强回波顶高不超过 6 km,最强回波中心值不超过 45 dBz,且 14—17 时

明显漏报了郑州站的回波,这表明模式预报的对流发展一直不旺盛。

综合以上分析,不难发现模式出现降水预报偏差的原因主要在于水汽的模拟。尽管整层大气水汽条件相对充沛,但由于模式水汽垂直分布结构不合理,造成层结不稳定程度预报不足,而更为重要的是来自台风烟花和查帕卡的水汽输送不够,尤其是来自台风烟花的水汽输送不足造成。来自台风烟花的水汽输送不足的根源又与低空急流密切相关。一方面,模式预报的超低空东风急流脉动增强主要出现在上午时段,导致模式小时降水峰值也错报在上午时段。另一方面,主要降水时段内低空急流偏弱和超低空东风急流脉动不足,导致输送到强降水区的水汽量不足,从而造成降水不足,水汽释放的潜热和感热能量不够。并且模式未能在郑州站附近预报出长时间稳定少动的地面中尺度辐合线,使得辐合线

上未能不断触发新生对流,并由南向北移动与原对流不断合并加强。此外,模式预报的不稳定能量和层结不稳定程度不足,使得风暴抬升不够,对流发展不够旺盛,最终造成模式对于对流风暴和强对流风暴的持续时间预报不足。这些都是导致模式降水预报偏差的重要原因。

3 结论和讨论

“21·7”河南暴雨持续时间长、极端性强、致灾影响大。本文结合常规和非常规的多源观测资料,利用传统检验和新型空间检验方法评估了CMA-MESO模式暴雨预报误差,并从暴雨形成机理的角度诊断误差产生的原因,得到以下结论:

(1)模式能较好预报雨带的形态和大暴雨落区、弱回波的持续时间和强回波的平均强度、降水发生前期和后期MCS面积和强度的演变趋势,对强降水发生前期指导意义较好。

(2)模式在主要降水阶段存在明显预报偏差:降水强度明显偏弱且特大暴雨中心位置偏西,对郑州站极端小时降水缺乏预报能力;错报主雨带小时降水演变趋势;对流风暴和强对流风暴的持续时间预报严重不足;未能报出午后MCS面积陡增的变化趋势,且MCS位置预报偏西、偏北。

(3)模式降水强度偏差主要与水汽相关。一方面水汽垂直分布不合理使得大气层结不稳定度不足,另一方面对来自台风烟花和查帕卡的水汽输送预报不足,其中来自台风烟花的水汽输送不足与超低空急流偏弱和低空急流脉动不足密切相关。模式预报的风场辐合区距离郑州站偏西和偏南,不利于对流在郑州站附近不断合并加强,加之对流不稳定能量不足共同导致风暴发展不够旺盛,对流风暴和强对流风暴不能长时间维持,并最终导致降水预报不足。此外,MCS和特大暴雨中心位置偏西与低涡系统预报一直偏西有关。

本研究从强降水产生机理来溯源CMA-MESO模式降水偏差的原因,发现模式对低层风场和水汽模拟不足是降水强度不足的重要原因,模式对其他极端降水个例的预报偏差是否也主要来源于风场和水汽的模拟误差,将在以后的研究中做进一步的探讨。另外,针对此次暴雨过程,CMA-MESO模式对

低空急流和超低空急流预报偏弱的问题,考虑可能与初始场、同化过程或边界层过程相关;而模式对水汽的模拟不足,考虑与初始场或湿物理过程有关。下一步将更换初始场,并对同化过程和边界层方案开展敏感性试验,以及对云微物理方案做更深入的分析。此外,3 km的水平分辨率虽然大致可以分辨深厚湿对流,但也较难模拟出最强的上升气流,这可能也是模式预报的相应最强降水时段的小时降雨量远低于实况的重要原因。

致谢:感谢中国气象局地球数值系统预报中心的王丹和万晓敏为本文提供GPS反演的PW数据,感谢国家气象中心刘鑫华博士为本文的研究思路和结果分析提供指导和建议。

参考文献

- 陈起英,万子为,徐国强,等,2022.数值预报系统技术升级及在河南特大暴雨中的应用复盘//全国高影响天气监测预报服务技术复盘(2021年)[C].北京:气象出版社:298-310. Chen Q Y, Wan Z W, Xu G Q, et al, 2022. Technical upgrade of numerical model and its application on heavy rain in Henan Province// Monitoring and Forecast Service in National High Impact Weather (2021) [C]. Beijing: China Meteorological Press: 298-310 (in Chinese).
- 丁一汇,1994.暴雨和中尺度气象学问题[J].气象学报,52(3):274-284. Ding Y H, 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology[J]. Acta Meteor Sin, 52(3):274-284 (in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等,2020.2018年北京“7·16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J].气象学报,78(1):1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):1-17 (in Chinese).
- 李建辉,1982.华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响[J].气象学报,40(3):319-326. Li J H, 1982. Ultra low-level jets and the heavy rain in early summer over South China[J]. Acta Meteor Sin, 40(3):319-326 (in Chinese).
- 李泽椿,湛芸,张芳华,等,2015.由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J].气象与环境科学,38(3):1-12. Li Z C, Chen Y, Zhang F H, et al, 2015. Consideration by “75·8” extreme heavy rainfall event in Henan[J]. Meteor Environ Sci, 38(3):1-12 (in Chinese).
- 刘凑华,牛若芸,2013.基于目标的降水检验方法及应用[J].气象,39(6):681-690. Liu C H, Niu R Y, 2013. Object-based precipitation verification method and its application[J]. Meteor Mon, 39(6):681-690 (in Chinese).
- 沈学顺,王建捷,李泽椿,等,2020.中国数值天气预报的自主创新发展[J].气象学报,78(3):451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. China's independent and innovative development of

- numerical weather prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 451-476(in Chinese).
- 史文茹, 李昕, 曾明剑, 等, 2021. “7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J]. *大气科学学报*, 44(5): 688-702. Shi W R, Li X, Zeng M J, et al, 2021. Multi-model comparison and high-resolution regional model forecast analysis for the “7·20” Zhengzhou severe heavy rain[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5): 688-702(in Chinese).
- 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等, 2021. 郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. *暴雨灾害*, 40(5): 445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. *Torr Rain Dis*, 40(5): 445-454(in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. *气象*, 48(5): 556-570. Su A F, Xi L, Lü X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 556-570(in Chinese).
- 孙跃, 肖辉, 杨慧玲, 等, 2021. 基于遥感数据光流场的 2021 年郑州“7·20”特大暴雨动力条件和水凝物输送特征分析[J]. *大气科学*, 45(6): 1384-1399. Sun Y, Xiao H, Yang H L, et al, 2021. Analysis of dynamic conditions and hydrometeor transport of Zhengzhou superheavy rainfall event on 20 July 2021 based on optical flow field of remote sensing data[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1384-1399(in Chinese).
- 唐文苑, 郑永光, 张小雯, 2018. 基于 FSS 的高分辨率模式华北对流预报能力评估[J]. *应用气象学报*, 29(5): 513-523. Tang W Y, Zheng Y G, Zhang X W, 2018. FSS-based evaluation on convective weather forecasts in North China from high resolution models[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(5): 513-523(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. *气象*, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 533-544(in Chinese).
- 徐珺, 杨舒楠, 孙军, 等, 2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J]. *气象*, 40(12): 1455-1463. Xu J, Yang S N, Sun J, et al, 2014. Discussion on the formation of a warm sector torrential rain case in North China[J]. *Meteor Mon*, 40(12): 1455-1463(in Chinese).
- 徐灵芝, 吕江津, 许长义, 2014. 2012 年 7 月末天津暴雨过程的扰动特征[J]. *大气科学学报*, 37(5): 613-622. Xu L Z, Lv J J, Xu C Y, 2014. Fluctuation characteristics of Tianjin rainstorm in late July 2012[J]. *Trans Atmos Sci*, 37(5): 613-622(in Chinese).
- 薛纪善, 陈德辉, 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京: 科学出版社: 383. Xue J S, Chen D H, 2008. Scientific Design and Application of GRAPES Numerical Prediction System[M]. Beijing: Science Press: 383(in Chinese).
- 薛一迪, 崔晓鹏, 2020. “威马逊”(1409)强降水物理过程模拟诊断研究[J]. *大气科学*, 44(6): 1320-1336. Xue Y D, Cui X P, 2020. Diagnostic and numerical study on physical process of strong rainfall associated with Rammasun(1409)[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(6): 1320-1336(in Chinese).
- 杨浩, 周文, 汪小康, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. *气象*, 48(5): 571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 571-579(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3): 311-337(in Chinese).
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威, 2007. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 3(3): 144-148. Zhai P M, Wang C C, Li W, 2007. A review on study of change in precipitation extremes[J]. *Adv Clim Change Res*, 3(3): 144-148(in Chinese).
- 张霞, 杨慧, 王新敏, 等, 2021. “21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. *大气科学学报*, 44(5): 672-687. Zhang X, Yang H, Wang X M, et al, 2021. Analysis on characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5): 672-687(in Chinese).
- 张小雯, 唐文苑, 郑永光, 等, 2020. GRAPES_3 km 数值模式对流风暴雨预报能力的多方法综合评估[J]. *气象*, 46(3): 367-380. Zhang X W, Tang W Y, Zheng Y G, et al, 2020. Comprehensive evaluations of GRAPES_3 km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods[J]. *Meteor Mon*, 46(3): 367-380(in Chinese).
- 郑永光, 林静韵, 朱文剑, 等, 2013. 强对流天气综合监测业务系统建设[J]. *气象*, 39(2): 234-240. Zheng Y G, Lin Y J, Zhu W J, et al, 2013. Operational system of severe convective weather comprehensive monitoring[J]. *Meteor Mon*, 39(2): 234-240(in Chinese).
- Caumont O, Mandement M, Bouttier F, et al, 2021. The heavy precipitation event of 14–15 October 2018 in the Aude catchment: a meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 21(3): 1135-1157.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas[J]. *Mon Wea Rev*, 134(7): 1772-1784.
- Dixon M, Wiener G, 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 10(6): 785-797.
- Hally A, Caumont O, Garrote L, et al, 2015. Hydrometeorological multi-model ensemble simulations of the 4 November 2011 flash flood event in Genoa, Italy, in the framework of the DRIHM

- project[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 15(3):537-555.
- Keller M, Fuhrer O, Schmidli J, et al, 2015. Evaluation of convection-resolving models using satellite data: the diurnal cycle of summer convection over the Alps[J]. *Meteorol Z*, 25(2):165-179.
- Marsigli C, Ebert E, Ashrit R, et al, 2020. Review article: observations for high-impact weather and their use in verification[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 21(4):1297-1312.
- Sun J, Zhang F Q, 2017. Daily extreme precipitation and trends over China[J]. *Sci China Earth Sci*, 60(12):2190-2203.
- Thompson G, Rasmussen R M, Manning K, 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: description and sensitivity analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 132(2):519-542.
- Wapler K, Goeber M, Trepte S, 2012. Comparative verification of different nowcasting systems to support optimisation of thunderstorm warnings[J]. *Adv Sci Res*, 8(1):121-127.
- Wapler K, Harnisch F, Pardowitz T, et al, 2015. Characterisation and predictability of a strong and a weak forcing severe convective event-A multi-data approach[J]. *Meteorol Z*, 24(4):393-410.
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al, 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021[J]. *J Meteor Res*, 36(1):6-25.
- Zhang L, Liu Y Z, Liu Y, et al, 2019. The operational global four-dimensional variational data assimilation system at the China Meteorological Administration[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(722):1882-1896.

(本文责编:戴洋)