

台风“杜苏芮”(2305)残涡特大暴雨的多模式预报性能比较分析

刘艳婕^{1,2}, 王晓聪^{1*}, 刘屹岷¹, 王金成³, 尹青⁴, 缪昊⁵, 王凯⁶

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

4. 93166 部队, 北京, 100061

5. 南京气象科技创新研究院, 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041

6. 南京信息工程大学, 南京 210044

摘要 2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日, 受“杜苏芮”残余环流影响, 华北地区发生特大暴雨。本文就此次降水事件, 对包括欧洲中期天气预报中心业务预报系统 (EC-IFS)、美国国家环境预报中心全球数值天气预报系统 (NCEP-GFS) 和中国气象局全球同化预报系统 (CMA-GFS) 在内的三个业务模式在不同时效的预报性能进行了评估, 并分析了偏差产生的可能原因。研究表明: (1) 三个模式均能提前 48 小时准确预报此次暴雨事件, 预报能力整体随预报时效增加而降低, EC-IFS 性能相对最优, 预报时效 24~120 h 平均空间相关系数 (SCC) 大于 0.5, NCEP-GFS 24~48 h 时效 SCC 接近 EC-IFS, 72 h 后明显降低且波动较大, CMA-GFS 平均 SCC 在 72 h 后则降为负值。(2) 在落区形态方面, EC-IFS 与观测最为接近, 能较好再现暴雨的东北—西南走向; NCEP-GFS 落区偏南, 其原因在于副高偏东, 导致南风偏弱; CMA-GFS 预报的降水落区偏东, 是由于副高偏东的同时大陆高压偏西, 残涡得以北上所致。在降水强度方面, 三个模式均存在强降水极值的低估。(3) 非绝热加热垂直结构表明, 模式预报性能的差异主要源于模式物理过程参数化的不确定性。几乎所有模式都无法准确模拟出与观测一致的降水—相对湿

收稿日期 2024 年 4 月 10 日; 网络预出版日期

作者简介: 刘艳婕, 女, 1999 年出生, 博士研究生, 主要从事模式物理过程参数化研究。E-mail: liuyanjie@lasg.iap.ac.cn

通讯作者: 王晓聪, E-mail: wangxc@lasg.iap.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目 2021YFC3000802, 国家自然科学基金项目 42175165

Funded by: National Key Research and Development Program of China (Grant 2021YFC3000802), National Natural Science Foundation of China (Grant 42175165)

度倾斜增湿结构，表明模式在对流、云等次网格物理过程参数化方面的不足是引起模式预报偏差的主要原因。

关键词 暴雨，杜苏芮，数值模式，预报时效，物理过程

文章编号 2024037B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24037

Comparison of the performance of multiple operational models on prediction of heavy rain caused by residual vortex of Typhoon Doksuri (2305)

LIU Yanjie^{1,2}, WANG Xiaocong^{1*}, LIU Yimin¹, WANG Jincheng³, Yin Qing⁴, MIAO Hao⁵, WANG Kai⁶

1. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 10029
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100049
3. China Meteorological Administration Earth system modelling and prediction center, Beijing 100081
4. Troops 93166 PLA, Beijing 100061
5. China Meteorological Administration Transportation Meteorology Key Laboratory, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041
6. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Due to the residual circulation of Typhoon Doksuri (2305), heavy rainstorm events occurred in North China during July 29 to August 1, 2023. This study evaluated the performance of three operational models at varying forecast lead time, including the Integrated Forecast System of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (EC-IFS), the Global Forecast System of National Centers for Environmental

1 Prediction (NCEP-GFS) and the China Meteorological Administration Global Forecast
2 System (CMA-GFS). The possible causes of the forecast biases are also analyzed.
3 Results show that: (1) The forecast capability of the three models decreases with the
4 increasing forecast lead time. Among all, EC-IFS outperforms the other two models
5 with averaged spatial correlation coefficient (SCC) over 0.5 at lead time 24–120 h, SCC
6 of NCEP-GFS approximates EC-IFS when leads 24–48 h but significantly decreases
7 and fluctuates after 72 h, whereas that decreases to negative values in CMA-GFS. (2)
8 In terms of rainfall location, EC-IFS well reproduced the distribution pattern of the
9 heavy rain, while the forecasted rainfall in NCEP-GFS locates to the south of the heavy
10 rain due to the eastward location of the forecasted subtropical high and weakened south
11 flow; CMA-GFS predicts rainfall noticeably eastward, which is mainly caused by
12 shifted subtropical high and continental high, allowing the residual vortex to move
13 northward. As for intensity, all three models commonly underestimated the extreme
14 value of heavy precipitation. (3) Vertical structures of diabatic heating indicate that the
15 difference of model performance is mainly due to the uncertainties of parameterization
16 for model physical process. Almost all models are unable to accurately simulate the
17 precipitation-relative humidity tilting structure as in observation, implying that models
18 still have deficiencies in parameterizing sub-grid physical processes such as convection
19 and clouds, which are the main causes of model forecast bias.

20

21 Keywords: Heavy rain, Doksuri, Numerical model, Forecast lead time, Physical process

1 引言

暴雨是致灾最严重的灾害天气之一，常引起洪涝、山崩、滑坡、泥石流等，对国民经济和人民生命财产安全构成严重威胁（吴吉东等, 2014），因此做好暴雨预报、预警对国计民生至关重要。数值模式可为天气预报提供有效参考，是目前暴雨预报和防灾减灾的主要手段（Shen et al., 2020）。特别是随着观测手段和观测资料的不断丰富（卢乃锰和谷松岩, 2016; 王丹等, 2019）、资料同化水平的快速提高（王金成等, 2017; Zhang et al., 2019）、模式分辨率和物理过程参数化的持续改进（Randall et al., 2019; Yu et al., 2019），模式性能得到显著提升（Benjamin et al., 2018; 沈学顺等, 2020）。例如，在预报时效方面，欧洲中期数值预报中心（ECMWF）、美国国家环境预报中心（NCEP）等多个业务预报部门的数值模式均能提前 3~4 天成功预报出“7·21”北京特大暴雨（陶祖钰和郑永光, 2013），ECMWF 模式和中国气象局全球同化预报系统（CMA-GFS）均可提前 5 天预报出“21·7”河南特大暴雨（李泽椿等, 2022），预报时效明显延长。在预报效果方面，CMA-GFS 对雨带位置、形态的预报明显优于此前的全球谱模式 T639（宫宇等, 2018），降水预报评分也有显著提高（Luo et al., 2020; Shen et al., 2020）。

然而，由于当前模式分辨率仍不能解析湍流、对流等大气物理过程，次网格物理过程参数化方案的不确定性导致模式预报较实况依然存在偏差（陈静等, 2003; 王婧卓等, 2021; 王瑞等, 2021）。此外，暴雨天气过程的突发性、局地性和极端性（梁生俊等, 2013; 迟静等, 2021），给暴雨的定时、定点、定量预报带来更大挑战（高守亭等, 2018; 钟琦等, 2022）。例如，对“7·21”北京特大暴雨、“21·7”河南特大暴雨和 2016 年长江流域暴雨等事件，全球模式和区域模式的预报均不同程度存在时间滞后、落区偏移和强度偏低的问题（姜晓曼等, 2014; 李晓兰和符娇兰, 2021; 马杰等, 2021; 史文茹等, 2021; 郭丹妮等, 2023）。因此，有必要结合典型事件对当下业务模式暴雨预报偏差的可能原因进行分析，为改进预报技巧提供依据。

2023 年 7 月 29 日至 8 月 1 日，受台风“杜苏芮”北上残余环流影响，我国华北地区出现持续性强降水，多站过程累计降水突破历史极值，单站最强达 1003.4 mm（张芳华等, 2023），造成直接经济损失 1657.9 亿元，被应急管理部列入 2023 年全国十大自然灾害。本次降水过程持续时间长，极端性突出，致灾严

重。已有研究回顾和分析了此次事件发生的环流背景、动力热力条件、水汽输送和地形影响（符娇兰等, 2023; 张芳华等, 2023; 张江涛等, 2023），对事件特征和成因已有一定认识，但国内外主流业务预报模式可提前多久预报本次事件？预报效果如何？造成预报偏差的原因是什么？目前认识尚不充分。围绕上述问题，本文基于当前国内外主流的三个业务预报模式，从预报时效和预报偏差两方面评估了三个模式对此次强降水过程的预报性能，并从动力和热力因子两方面进一步分析产生偏差的可能原因，有助于加深对各模式暴雨预报特点的认识，同时为改进数值模式提供思路。

2 数据与方法

2.1 数据

本文采用的观测降水资料为国家气象信息中心发布的中国区域多源融合降水产品（CMA Multi-source Precipitation Analysis System, CMPAS），该产品是基于“概率密度函数+贝叶斯模型平均+最优插值”方法，融合地面、雷达、卫星三源降水形成的近实时降水产品，时间分辨率为 1 h，水平分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ，由中国气象数据网（<https://data.cma.cn> [2023-10-26]）下载。模式预报产品有：（1）欧洲中期天气预报中心业务预报系统（EC-IFS），水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ，输出垂直层数为 19 层；（2）美国国家环境预报中心全球数值天气预报系统（NCEP-GFS），水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，输出垂直层数为 41 层；（3）中国气象局全球同化预报系统（CMA-GFS），水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ，输出垂直层数为 40 层。各模式起报时间为 7 月 19~31 日每日 00:00（世界时，下同）。此外，本文采用 ECMWF 提供的第五代再分析资料（ERA5）（Hersbach et al., 2020）进行观测环流背景分析，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直层数为 37 层。为评估模式在不同起报时间的结果，利用双线性插值将模式降水数据与观测降水数据统一插值到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率。

2.2 方法

2.2.1 SCC 和 RMSE

本文采用空间相关系数（Spatial Correlation Coefficient, SCC）和均方根误差

1 (Root Mean Squared Error, RMSE) 对模式预报结果进行评估。SCC 可反映预报
2 与观测的空间分布相关程度, RMSE 则反映预报相对观测的误差大小, 综合两者
3 可评估模式整体的预报技巧, 计算公式如下:

$$4 \quad SCC = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \times \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$5 \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

6 式中, $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 代表评估区域格点数, F_i 和 O_i 分别代表第 i 个格点的预
7 测值和观测值, “ $\bar{}$ ” 代表区域平均值。

8 2.2.2 降水强度-频率分布

9 降水强度-频率分布可反映特定时段内不同强度降水事件的发生频率, 本研
10 究以 5 mm d^{-1} 为间隔计算每个强度区间内的发生频率, 定义 I_j 为降水强度在第 j
11 个区间的总格点数, 则其对应频率可表达为:

$$12 \quad freq_j = \frac{I_j}{N} \quad (3)$$

13 2.2.3 视热源和视水汽汇

14 采用视热源 (Q_1) 和视水汽汇 (Q_2) 来分析对流、云等物理过程引起的非绝
15 热加热垂直结构 (Yanai et al., 1973), 其计算公式如下:

$$16 \quad Q_1 \equiv \frac{1}{c_p} \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot s \bar{\mathbf{V}} + \frac{\partial \bar{s} \bar{\omega}}{\partial p} \right) \quad (4)$$

$$17 \quad Q_2 \equiv -\frac{L}{c_p} \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot q \bar{\mathbf{V}} + \frac{\partial \bar{q} \bar{\omega}}{\partial p} \right) \quad (5)$$

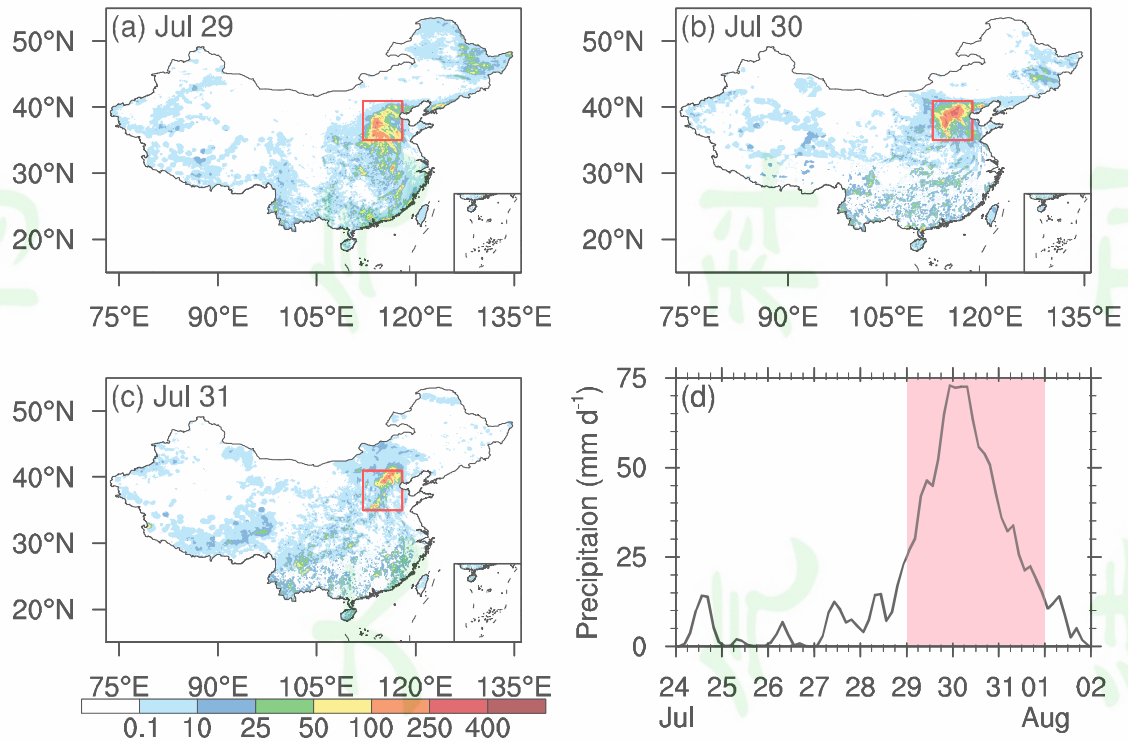
18 式中, $s \equiv c_p T + gz$ 为干静力能, c_p 为定压比热, q 为比湿, $\mathbf{V}$ 为水平风矢量,
19 ω 为垂直速度。 L 为潜热系数, “ $\bar{}$ ” 代表区域平均。 Q_1 为总的非绝热加热, 包含
20 辐射加热、凝结加热和垂直涡动输送, Q_2 表示视水汽汇, 包含水汽的净凝结和垂
21 直涡动输送。对于强降水事件, 辐射引起的非绝热在对流层中下部相对较小,
22 $Q_1 - Q_2$ 可近似代表对流引起的垂直涡动输送 (Tang and Zhang, 2015)。

23

24 3 模式预报性能评估

25 7 月 29 日 00:00, 台风 “杜苏芮” 减弱为热带低压, 03:00 中央气象台对其

1 停止编号，此后台风残余环流自安徽南部，在偏南气流引导下持续北上，在华北
2 地区停滞并引起强降水（张江涛等, 2023）。图 1 给出了 7 月 29~31 日 CMPAS 的
3 日降水量分布。可以看到，7 月 29 日，太行山及以东地区大范围出现暴雨（50~100
4 mm d^{-1} ）到大暴雨（100~250 mm d^{-1} ），河北西南局部地区出现特大暴雨（ ≥ 250
5 mm d^{-1} ）。30 日，降水系统整体北移，强降水带呈明显东北—西南走向，特大暴
6 雨中心分布在太行山东麓，降水强度最大可达 400 mm d^{-1} 。31 日，降水系统移至
7 北京西部，强降水范围明显减小，系统逐渐消亡。根据降水的强度和范围，选取
8 降水量最大的区域作为关键区（图 1a-c 红框所示），该区域对应的平均降水时间
9 序列如图 1d 所示。可以看到，自 29 日至 30 日，区域平均降水强度从 27 mm d^{-1}
10 ¹ 陡增至 73 mm d^{-1} ，其后开始减弱，31 日后降至 15 mm d^{-1} 以下，最强降水集中
11 在 7 月 29~31 日，后续将围绕该时段进行模式预报性能的评估。



12
13 图 1 (a-c) 7 月 29~31 日 (UTC, 下同) CMPAS 日降水量 (单位: mm) 分布, 红框表示
14 期间降水最强的关键区 (35°~41°N, 112°~118°E); (d) 关键区逐 3 小时降水序列, 粉色阴
15 影对应 7 月 29~31 日

16 Fig. 1 (a-c) Daily precipitation (unit: mm) during July 29–31 from CMPAS, red box represents the
17 strongest rainfall region (35~41°N, 112~118°E); (b) 3 hourly precipitation time series of the boxed
18 region, pink shadow marks July 29–31

1

2 3.1 降水预报时效

3 图 2 给出了各模式预报的关键区逐日降水 SCC 和 RMSE 随预报时效的演
4 变。检验各时效的降水分布（图略）发现， $SCC \geq 0.5$ 时预报与观测一致性较好，
5 $0 \leq SCC \leq 0.5$ 时预报偏差较大但仍可体现一定强降水特征， $SCC \leq 0$ 时则预报失
6 败，故逐日 SCC 均为正时视为可提前预报此次降水过程。整体上，三个模式的
7 SCC 均随预报时效延长而降低。其中 EC-IFS 的 SCC 最高，预报时效 24~120 h
8 平均维持在 0.5 以上，168 h 后出现负值，表明 EC-IFS 可提前 7 天较为准确地预
9 报出关键区 29~31 日的降水分布特征。NCEP-GFS 在 24~48 h 时效的 SCC 接近
10 EC-IFS，72 h 后随时效延长迅速降低，在 29 日的 96 h 时效后出现负值，表明
11 NCEP-GFS 可提前 4 天大致预报出此次强降水，但随时效延长波动较大，其原因
12 可能与初值的不确定性有关（陶祖钰和郑永光, 2013）。CMA-GFS 自 24 h 时效
13 起，SCC 由 0.5 附近迅速降为负值，72 h 时效后几乎无法预报出关键区强降水，
14 这也导致 SCC 随预报时效延长而降低的现象不及 EC-IFS 和 NCEP-GFS 明显。
15 事实上，SCC 依赖于区域范围，范围越小，降水落区偏差越容易被放大，SCC 随
16 预报时效延长而降低的现象越不明显，反之亦然。与 SCC 相反，RMSE 随预报
17 时效延长而增加。相较而言，EC-IFS 与观测相比误差最小，NCEP-GFS 次之，
18 CMA-GFS 最大，但在预报时效延至 120 h 后，NCEP-GFS 与 CMA-GFS 的 RMSE
19 趋于稳定且近似。综上可见，三个模式对此次暴雨事件的预报能力整体上随预报
20 时效增加而减弱，误差随之增长，表明数值模式积分过程中导致的误差累积是造
21 成预报时效偏低的主要原因。对比不同预报时效下各模式的差异发现，三个模式
22 在 72 h 预报时效 SCC 差异最大，因此后续分析将基于提前 72 h 起报的结果进
23 一步探究三个模式的预报偏差及可能原因。

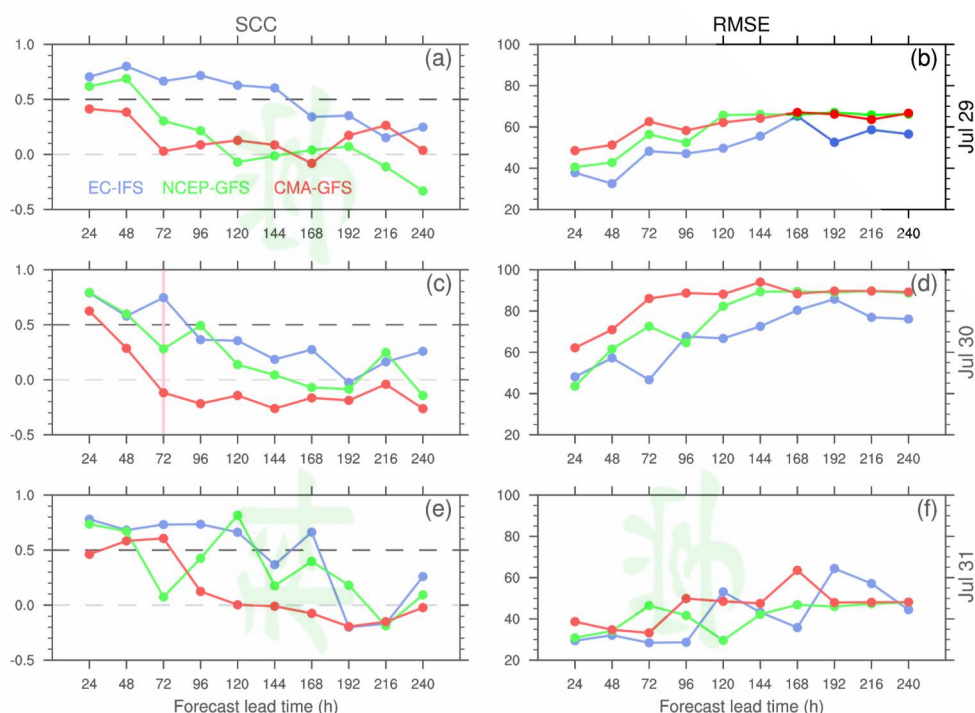


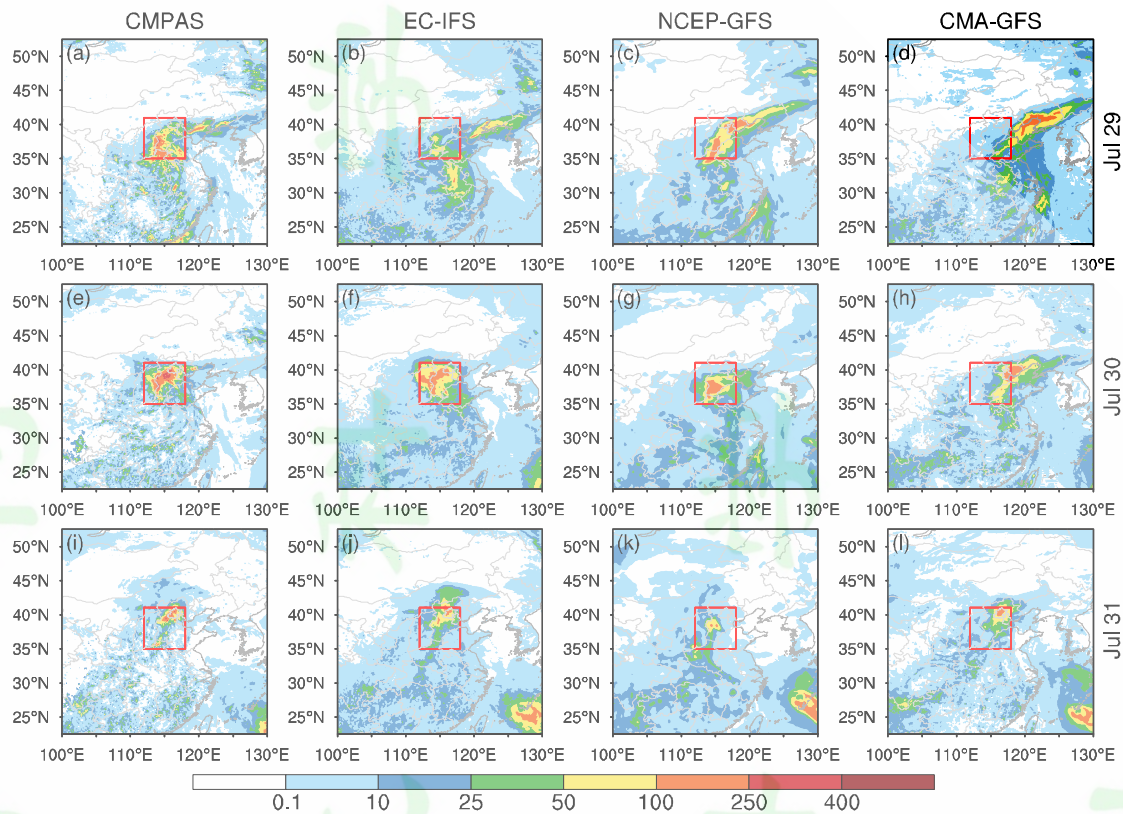
图 2 各模式关键区 7 月 (a) 29 日, (c) 30 日和 (e) 31 日降水预报的 SCC 随预报时效的演变。右列同左列, 但为 RMSE (单位: mm)。粉线处为各模式差异最大的预报时效

Fig. 2 SCC of daily precipitation on July (a) 29, (c) 30 and (e) 31 over the boxed region from EC-IFS (blue), NCEP-GFS (green) and CMA-GFS (red) at different forecast lead time. Right column as in left column, but for RMSE (unit: mm). Pink line marks the forecast lead time with largest SCC difference

3.2 降水预报偏差

图 3 给出了各模式提前 72 h 预报的 7 月 29~31 日降水空间分布。对比观测, EC-IFS 可大致再现 7 月 29~31 日的华北暴雨过程, 包括 29 日集中在太行山附近的降水和极值中心, 30 日沿太行山东麓分布的东北—西南向大暴雨带以及 31 日的北京暴雨, 整体落区、形态与观测较为一致, 但降水强度有明显低估, 尤其是对 29 日的降水预报。NCEP-GFS 整体强度与观测更接近, 但形态、落区略逊 EC-IFS, 如 29 日关键区东北部有虚假强降水, 后两日则降水落区偏南、偏西, 未能再现观测中雨带的东北—西南走向。CMA-GFS 预报的 29、30 日强降水位于关键区以东, 未能预报出关键区内的大暴雨, 但 31 日的预报又很好再现了京津冀的强降水, 落区形态和强度均与观测接近。总体而言, EC-IFS 可较好地预报出华北暴雨的落区和形态, NCEP-GFS 和 CMA-GFS 则在降水落区预报上存在明显

1 偏差。此外，三个模式均低估了关键区降水极值，未能预报出观测中的特大暴雨。

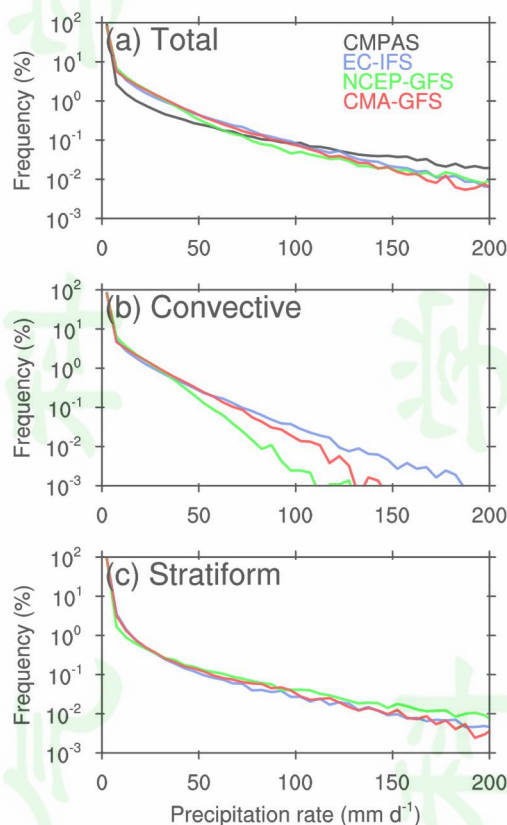


2
3 图 3 观测与模式提前 72 h 预报的 7 月 (a-d) 29 日, (e-h) 30 日和 (i-l) 31 日降水量 (单
4 位: mm) 分布: (a、e、i) CMPAS, (b、f、j) EC-IFS, (c、g、k) NCEP-GFS, (f、h、l)
5 CMA-GFS

6 Fig. 3 Daily precipitation (unit: mm) during July (a-d) 29, (e-h) 30 and (i-l) 31 from (a, e, i)
7 CMPAS and 72 h lead forecast of (b, f, j) EC-IFS, (c, g, k) NCEP-GFS and (f, h, l) CMA-GFS

8
9 降水强度-频率分布可反映不同强度降水事件的发生频率，将模式与观测进
10 行比较可反映模式的降水分配以及对不同强度降水的预报能力。图 4 给出了观测
11 与模式预报的降水强度-频率分布，整体上，三个模式的层云降水强度-频率分布
12 与对应的总降水分布近似，对流降水在 $100\sim200\text{ mm d}^{-1}$ 的发生频率则远小于层
13 云降水，表明模式预报的强降水主要由层云降水贡献。其中，EC-IFS 的对流降
14 水占比最大，CMA-GFS 次之，NCEP-GFS 最小但层云降水占比最大，说明 NCEP-
15 GFS 中对流过于抑制，降水过程主要由层云降水参数化实现，类似现象也见于美
16 国宇航局提供的再分析产品 MERRA-2 (the second Modern-Era Retrospective
17 Analysis for Research and Applications) 中 (Gelaro et al., 2017)。对比模式与观测

1 的总降水发现，三个模式均存在高估弱降水而低估强降水的情况，这与高分辨率
2 模式比较计划（HighResMIP）下模式所表现的偏差类似（黄子立等, 2021）。相较
3 而言，NCEP-GFS 对强降水的低估较小。



4
5 图 4 CMPAS 与各模式提前 72 h 预报的 7 月 29~31 日中国区域 (a) 总降水，及各模式对应
6 的 (b) 对流降水和 (c) 层云降水强度-频率分布

7 Fig. 4 Intensity-frequency distribution of (a) total precipitation over the China during July 29–31 in
8 CMPAS and 72 h lead forecast of EC-IFS, NCEP-GFS and CMA-GFS, and corresponding (b)
9 convective and (c) stratiform precipitation in three models

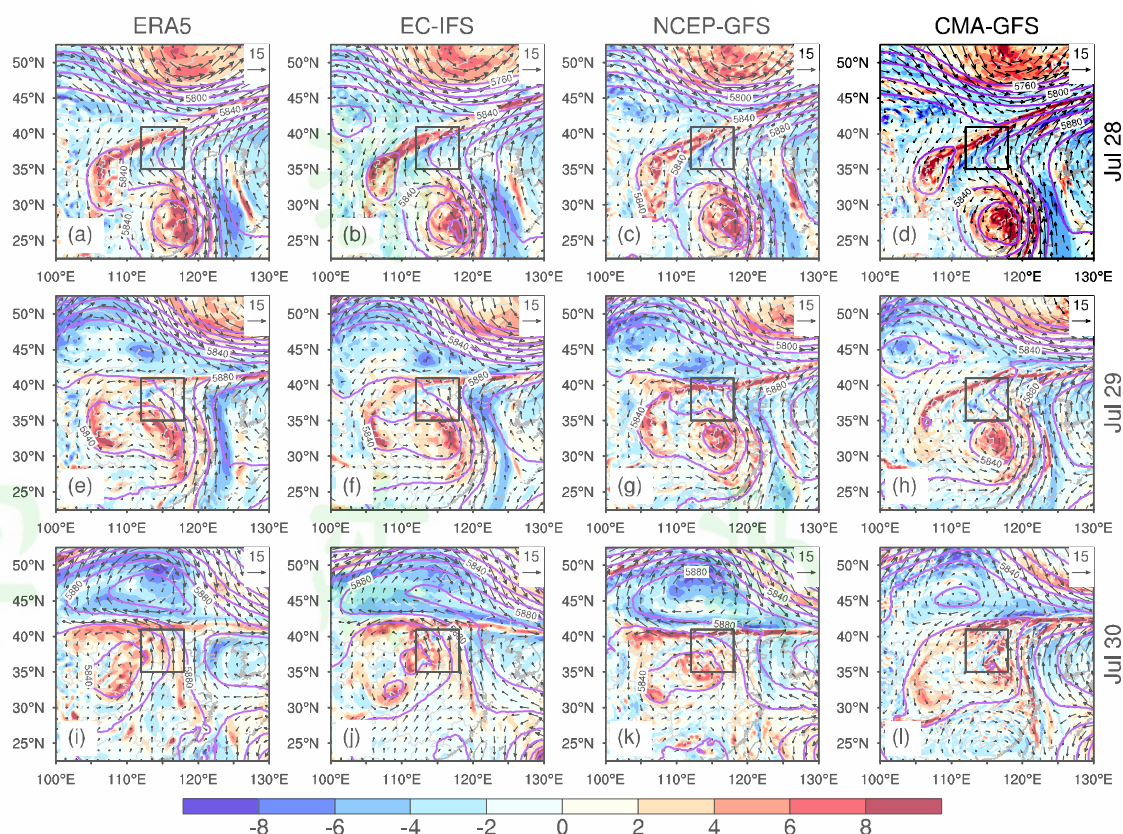
11 4 预报偏差的原因分析

12 为理解造成预报偏差及模式间表现差异的原因，本文分别从动力因子和热力
13 因子角度进行分析。由于 7 月 30 日降水最强，同时三个模式在预报时效 72 h 的
14 SCC 差异最大，因此后续将对 7 月 28 日 00:00 起报的结果进行分析。

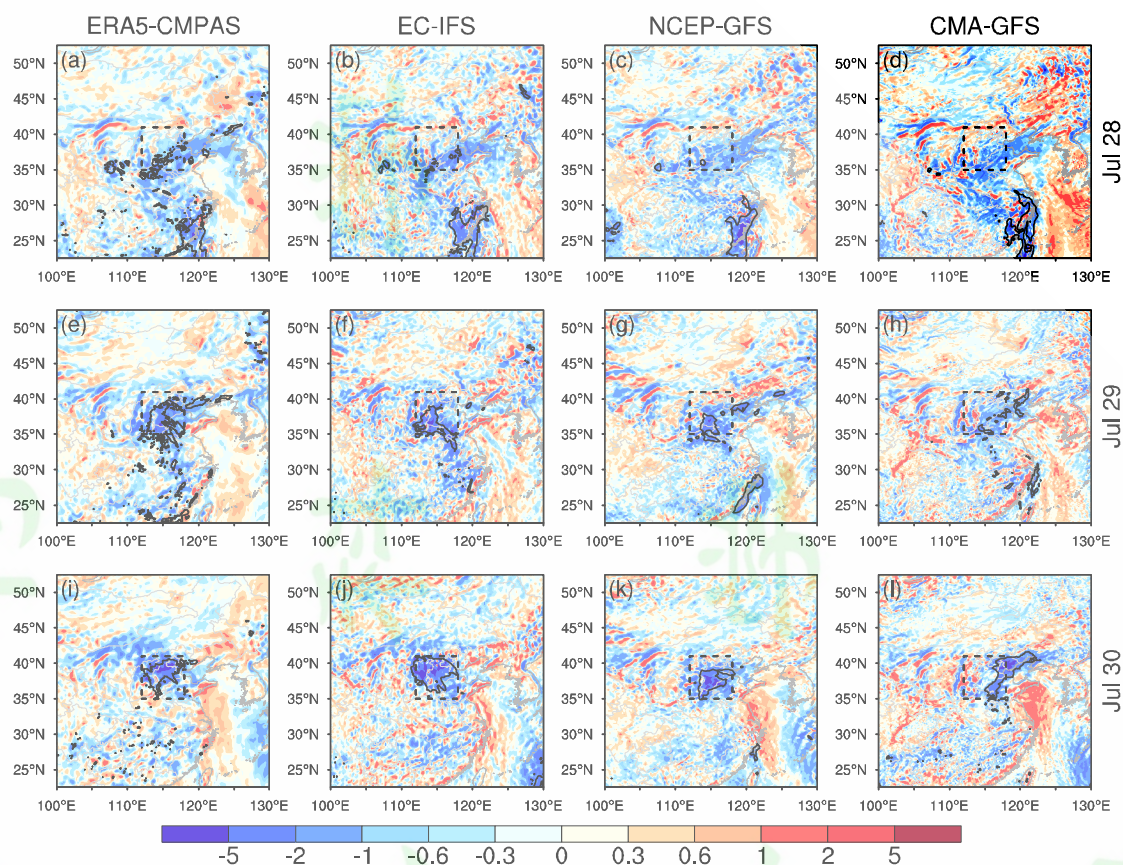
16 4.1 动力因子影响

17 图 5 和图 6 分别给出了 ERA5 与各模式 7 月 28~30 日的 500 hPa 平均环流场

1 和水汽通量散度积分。此次降水过程主要受北上台风“杜苏芮”残余环流、大陆
2 高压、西北太平洋副热带高压（简称副高）和偏南风低空急流的共同影响。由
3 ERA5 再分析资料可知，7 月 28 日，台风低涡系统与副高之间形成强盛偏南风，
4 将暖湿气流向北输送至关键区附近，在低层遇地形抬升，太行山东麓有较强水汽
5 辐合并形成降水（图 6a）。29 日，在偏南气流引导下，残涡向北偏西移动至关键
6 区南侧，水汽持续向北输送，副高略向西北延伸，同时大陆高压和低压槽分别东
7 移至关键区和副高北侧，关键区内水汽辐合进一步增强，降水落区整体北移（图
8 6e），暴雨带位于太行山东麓。30 日，副高进一步西伸和北跳，与东移的大陆高
9 压连通形成高压坝，台风残涡北进受阻，在偏南风和大陆高压南侧东风共同作用
10 下，移至关键区西侧，引导水汽向北、向西输送，水汽辐合中心和降水系统略向
11 北移并增强，整体呈东北-西南走向（图 6i）。三个模式预报的环流场整体与 ERA5
12 相似，但残涡、副高和大陆高压的移动发展略有不同，导致水汽的输送和降水存在
13 偏差。EC-IFS 预报的台风低涡系统强度更强，东侧引导气流更盛，残涡移动
14 和水汽输送更快，于 29 日入侵关键区，30 日移至关键区西侧，因此 EC-IFS 预
15 报的关键区水汽辐合与降水最强。NCEP-GFS 预报的低涡也较强，但是副高偏东，
16 导致偏南风弱于 EC-IFS，因而 29 日残涡仍位于关键区南侧，30 日抵达西南部，
17 水汽辐合及降水整体略弱且偏南。CMA-GFS 则由于预报的台风低涡系统较弱，
18 导致偏南风较弱，29 日残涡位置较 NCEP-GFS 偏南，同时大陆高压中心偏西、
19 副高偏东，两者未能在 30 日连通形成高压坝，残涡得以北上，最终抵达关键区
20 东部，偏南气流继续将水汽输送至关键区东部并强烈辐合，暴雨因而位于残涡东
21 北。综上所述，模式预报的台风低涡系统强度、副高位置以及高压坝的形成是本
22 次降水过程预报的关键，NCEP-GFS 和 CMA-GFS 预报的降水偏弱和落区偏移与
23 其模拟的残涡强度偏弱和副高偏东有关。



1
2 图 5 7 月 (a-d) 28 日, (e-h) 29 日和 (i-l) 30 日 500 hPa 的高度场 (等值线, 单位: gpm)、
3 相对涡度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 及风矢量 (箭头, 单位: m s^{-1}): (a、e、i) ERA5 和 (b、
4 f、j) EC-IFS、(c、g、k) NCEP-GFS、(f、h、l) CMA-GFS 于 28 日 00:00 起报的结果
5 Fig. 5 Daily averaged geopotential height (contour, unit: gpm), relative vorticity (shadow, unit:
6 10^{-5} s^{-1}) and wind vector (arrow, unit: m s^{-1}) at 500 hPa during July (a-d) 28, (e-h) 29 and (i-l) 30
7 from (a, e, i) ERA5 and forecast of (b, f, j) EC-IFS, (c, g, k) NCEP-GFS and (f, h, l) CMA-GFS
8 from July 28 UTC 00:00



1
2 图6 同图5，但为整层（1000~100 hPa）水汽通量散度（填色，单位： $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ），黑色实
3 线为 50 mm 等日降水量线，第一列中降水来自 CMPAS
4 Fig. 6 As in Fig.5, but for daily averaged total column (1000–100 hPa) of water vapor flux
5 divergence (shadow, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), black contour refers to daily precipitation at 50 mm, which
6 is from CMPAS in the first column

为探究在上述过程中环流偏差如何随时间演变，图 7 给出了 ERA5 及各模式在初始时刻、66~72 h 平均的散度廓线对比，以及散度随时间的演变。可以看到，ERA5 的散度廓线在初始时刻表现为 700 hPa 以下辐合为主、400 hPa 以上辐散为主的多峰结构，强度在 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右，有利于降水形成和发展。三个模式在初始时刻的散度廓线与 ERA5 基本一致，初始差异较小，仅高层略有差异。其中，CMA-GFS 在对流层高层与 ERA5 的一致性优于 EC-IFS 和 NCEP-GFS。积分 72 h 后，三个模式与 ERA5 均表现为低层强辐合、高层强辐散，但峰值强度、高度及中低层散度有明显不同，此时三个模式的预报已出现不同程度的偏差。进一步分析散度的逐时刻演变和降水序列发现，ERA5 自 28 日 00:00 起，中低层辐合和高层辐散逐渐增强，降水逐渐增加；29 日 00:00，中层辐合范围增大，高层辐散明显增强，中心维持在 200 hPa 附近，强度超过 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，垂直运动加剧，降水增加明显；12:00，低层辐合和高层辐散同时增强，至 30 日 00:00~06:00 达到峰值，随后低层辐合明显减弱，期间降水强度与之协同变化。三个模式的散度演变均可再现类似变化，但在强度和位相上存在明显差异。EC-IFS 在 29 日 00:00~06:00 低层辐合强度偏弱，导致此时降水偏少；但 30 日 12:00 后 EC-IFS 预报仍维持较强的中低层辐合，导致 30 日整层水汽辐合偏大和降水偏多。NCEP-GFS 中低层辐合在 29 日 00:00 左右明显增强，对应降水偏早；30 日 06:00 峰值强度偏低，约 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，位相略有滞后，随后低层辐合不减反增，强度达 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上，造成夜间峰值降水，补偿了 06:00 低估的降水而使日平均降水强度接近观测。CMA-GFS 的位相与观测较为一致但其强度明显偏弱，约 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

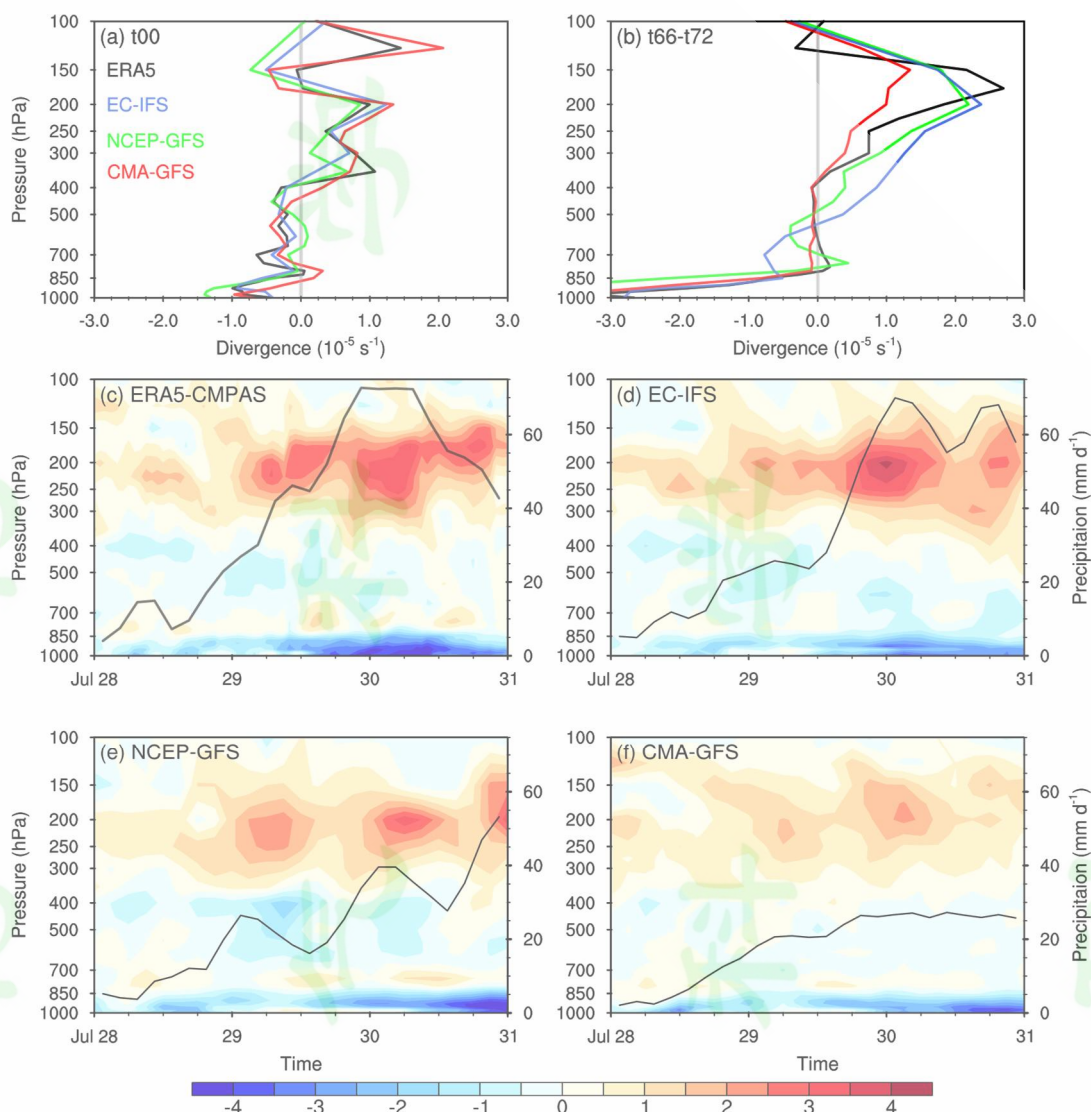


图 7 ERA5 与各模式 7 月 28 日 00:00 起报的关键区散度廓线：(a) 初始时刻，(b) 预报第 66~72 小时平均，(c-f) 时间演变（单位： 10^{-5} s^{-1} ），实线为 CMPAS 及各模式对应的降水序列

Fig. 7 Divergence profiles over the key region in ERA5 and EC-IFS, NCEP-GFS and CMA-GFS forecast from July 28 UTC 00:00: (a) initial time; (b) 66–72 h averaged; (c–f) temporal evolution (unit: 10^{-5} s^{-1}), solid lines are precipitation in CMPAS and three models

4.2 热力因子影响

为比较分析降水引起的非绝热加热变化，图 8 给出了 ERA5 与不同模式下 Q_1 、 Q_2 及 Q_1-Q_2 随时间的演变。自 29 日开始， Q_1 、 Q_2 明显增强，与这一时期的降水增强相吻合，加热中心位于 400~500 hPa， Q_1-Q_2 则在低层出现较大的负

值，高层出现较大的正值，对应次网格湿静力能低层辐散，高层辐合。 Q_1-Q_2 在 500 hPa 高度处符号发生转变，对应上升气流向上传输湿静力能所能达到的最大高度。注意 ERA5 中 Q_1-Q_2 在 08:00、20:00 时有不连续现象，主要因为水汽同化影响所致。三个模式中，EC-IFS 模拟的 Q_1-Q_2 强度与 ERA5 最接近，主要得益于预报模式和同化模式所使用的物理参数化方案相近。NCEP-GFS 和 CMA-GFS 能大致模拟出对流涡的垂直输送，但强度明显偏弱，与这一时期的降水偏弱相吻合。29 日 12:00 后，非绝热加热再度增强，于 30 日 00:00 左右达峰，强度在 1.5 K h^{-1} 左右，随后减弱。对比 ERA5，EC-IFS 在 30 日 00:00 和 18:00 两次达峰，18:00 峰值对应降水偏多；NCEP-GFS 与 EC-IFS 类似，但后期滞后约 3 h 且强度更小，约为 0.75 K h^{-1} ；CMA-GFS 整体加热明显偏弱，约为 0.5 K h^{-1} 。模式表现出的这种非绝热加热结构差异主要由模式物理过程参数化差异造成。但由于模式积分过程中，动力框架和各个物理过程之间存在相互作用，这种误差很难归因到某个具体参数化方案上 (Wang and Zhang, 2013; Wang, 2015)。为进一步揭示模式降水过程的异同，图 9 给出了观测和模式的相对湿度垂直结构随降水强度的变化，一定程度上可反映对流、云等次网格物理过程参数化水平 (Bretherton et al., 2004; Wang et al., 2022)。由观测可知，随着降水强度的增加，150 hPa 以下各层的相对湿度也逐渐增加，中低层增湿尤为明显，整体呈倾斜的增湿结构，对应云层的向上发展和增厚过程。降水强度增至 50 mm d^{-1} 以上时表现为整层湿润， 100 mm d^{-1} 以上的低层和 500 hPa 附近湿度维持在 95% 以上。三个模式中，EC-IFS 和 CMA-GFS 能较好再现与观测一致的倾斜增湿结构，但 CMA-GFS 高层偏干，中层的相对湿度更大，NCEP-GFS 则没有呈现出明显的倾斜增湿结构，且在 400 hPa 以上的相对湿度随降水增加反而减小，与观测相悖。此外，三个模式产生强降水的相对湿度阈值均更高，弱降水时则更低，NCEP-GFS 和 CMA-GFS 尤为明显，这与各模式高估弱降水而低估强降水的偏差一致 (林朝晖, 2017; Tang et al., 2022)。上述分析表明，当前模式在对流、云等次网格物理过程参数化方面依然存在缺陷，是引起模式预报偏差的主要原因。

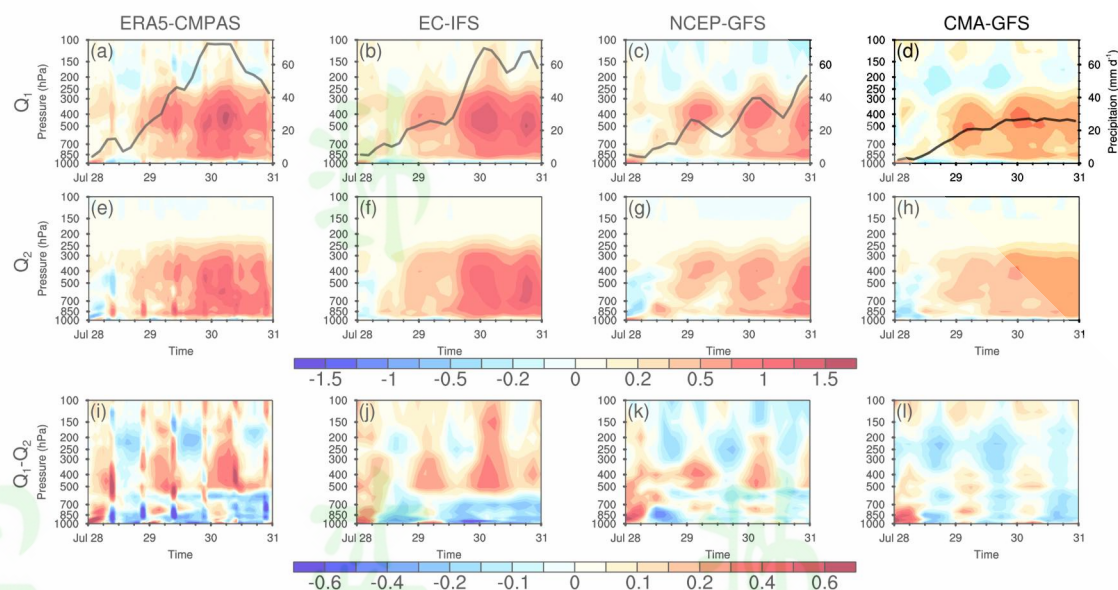


图 8 (a、e) ERA5 与 (b、f) EC-IFS、(c、g) NCEP-GFS、(d、h) CMA-GFS 7 月 28 日 00:00 起报的关键区 (a-d) 视热源 (Q_1)、(e-h) 视水汽汇 (Q_2) 和 (i-l) 两者之差 (Q_1-Q_2) 的时间演变 (单位: K h^{-1}), (a-d) 中实线为 CMPAS 及各模式对应的总降水序列

Fig. 9 Temporal evolution of (a-d) apparent heat source (Q_1), (e-h) moisture sink (Q_2) and (i-l) their difference (Q_1-Q_2) (unit: K h^{-1}) over the key region in (a, e) ERA5, and (b, f) EC-IFS, (c, g) NCEP-GFS and (d, h) CMA-GFS forecasts from July 28 UTC 00:00, solid lines in (a-d) are precipitation in CMPAS and three models

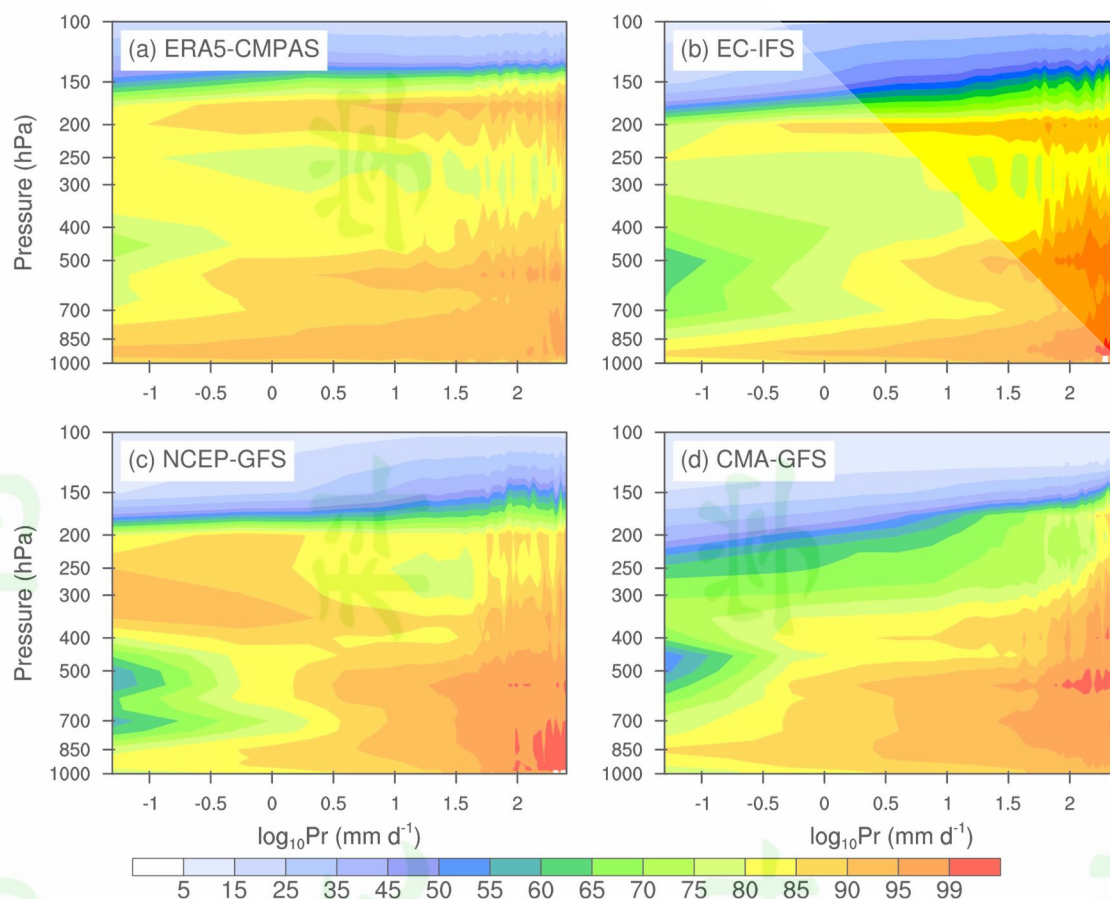


图 9 7 月 28~30 日关键区相对湿度（单位：%）随降水强度（ mm d^{-1} ）的演变：（a）ERA5 相对湿度与 CMPAS 降水，（b）EC-IFS、（c）NCEP-GFS 和（d）CMA-GFS 7 月 28 日 00:00 起报的结果

Fig. 10 Relative humidity variation with precipitation rate over the key region during July 28–30 in: (a) relative humidity of ERA5 with precipitation of CMPAS, (b) EC-IFS, (c) NCEP-GFS and (d) CMA-GFS forecasts from July 28 UTC 00:00

5 结论与讨论

本文聚焦 2023 年 7 月 29~31 日“杜苏芮”影响期间的华北特大暴雨事件，基于 CMPAS 融合降水观测，采用 SCC 和 RMSE 评估了 EC-IFS、NCEP-GFS 和 CMA-GFS 三个国内外主流业务预报模式对该事件的预报能力及相应的预报偏差，并利用 ERA5 再分析资料作为环流背景参考，从动力和热力角度分析了模式预报偏差产生的可能原因，主要结论如下：

（1）三个模式均能提前 48 小时准确预报此次暴雨事件，预报能力整体上随

预报时效增加而降低，其中 EC-IFS 的 SCC 最高，预报时效 24~120 h 平均在 0.5 以上，同时 RMSE 最小，预报性能相对最好；NCEP-GFS 次之，24~48 h 时效 SCC 接近 EC-IFS，72 h 时效后明显降低；CMA-GFS 24~48 h 时效 SCC 较 EC-IFS 低 0.2 左右，其后迅速降为负值。

（2）对于提前 72 小时的预报而言，EC-IFS 可较好再现华北强降水过程，暴雨落区、形态与观测较为一致；NCEP-GFS 的降水落区偏南，且未能再现强降水的东北—西南走向，主要是由于 NCEP-GFS 的副高位置偏东，导致南风及水汽辐合偏弱，降水系统移动滞后；CMA-GFS 降水落区则明显偏东，这与副高偏东和大陆高压偏西有关，高压坝因此缺失，残涡得以北上，导致其水汽辐合及降水显著偏东。此外，三个模式的降水强度-频率分布表明其均存在低估强降水的共性问题。就不同降水类型而言，EC-IFS 的对流降水占比最大，CMA-GFS 次之，NCEP-GFS 最小。

（3）与 ERA5 相比，EC-IFS 高估了非绝热加热强度，NCEP-GFS 与 CMA-GFS 均存在不同程度的低估，与降水预报强度相吻合。几乎所有模式都无法准确模拟出与观测一致的降水—相对湿度倾斜增湿结构，表明模式在对流、云等次网格物理过程参数化方面的不足是引起模式预报偏差的主要原因。

需要指出的是，三个模式的初始场虽然大体相近，但也存在偏差，随着模式积分的进行，初始场引起的偏差会被累积放大。此外，由于本次事件中太行山的地形增幅作用显著（张芳华等, 2023; 张江涛等, 2023），故还应考虑模式分辨率以及地形描述的影响。初始场对模式预报有多大影响？预报偏差是如何累积的？具体又与哪些物理过程有关？这些都需要后期开展数值试验进行深入分析。

致谢：衷心感谢两位审稿专家对本文提出的建设性意见。感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

参考文献

- Benjamin S G, Brown J M, Brunet G, et al. 2018. 100 years of progress in forecasting and NWP applications [J]. *Meteorological Monographs*, 59(1): 13.1–13.67. doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0020.1
- Bretherton C S, Peters M E, Back L E. 2004. Relationships between water vapor path

1 and precipitation over the tropical oceans [J]. *Journal of Climate*, 17(7), 1517–
2 1528. doi:10.1175/1520-0442(2004)017%3C1517:RBWVPA%3E2.0.CO;2

3 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
4 研究 [J]. *气象学报*, (2): 203-218. Chen Jing, Xue Jishang, Yan Hong. 2003.
5 The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall
6 simulation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), (2): 203-218. doi:
7 10.11676/qxxb2003.019

8 迟静, 周玉淑, 冉令坤, 等. 2021. 吉林一次极端降水发生发展动热力过程的数值
9 模拟分析 [J]. *大气科学*, 45(6): 1400–1414. Chi J, Zhou Y S, Ran L K, et al.
10 2021. Numerical simulation analysis on the generation and evolution of the
11 dynamic and thermodynamic processes of an extreme rainfall in Jilin Province [J].
12 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 45(6): 1400–1414. doi:
13 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20183

14 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等. 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动
15 力和热力条件初探 [J]. *气象*, 49(12): 1435–1450. Fu Jiaolan, Quan Wanqing,
16 Mai Zi, et al. 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall
17 intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe
18 torrential rain in North China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 49(12):1435–1450.
19 doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.112701

20 高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展 [J]. *大
21 气科学*, 42(4): 833–846. Gao Shouting, Zhou Yushu, Ran Lingkun. 2018. A
22 review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in
23 China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42(4): 833–846.
24 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277

25 Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. 2017. The Modern-Era Retrospective Analysis
26 for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) [J]. *Journal of Climate*,
27 30(14): 5419–5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1

28 宫宇, 代刊, 徐珺, 等. 2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征 [J]. *气
29 象*, 44(9): 1148–1159. Gong Yu, Dai Kan, Xu Jun, et al. 2018. Synoptic
30 verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event

1 forecast [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(9): 1148–1159. doi:
2 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.003

3 郭丹妮, 刘屹岷, 吴国雄, 等. 2023. 2021 年 7 月河南极端暴雨事件的位涡诊断和
4 精细化预报 [J]. 大气科学, 47(2): 534–550. Guo Danni, Liu Yimin, Wu
5 Guoxiong, et al. 2023. Potential vorticity analysis and fine forecast of extreme
6 rainstorm event in Henan province in July 2021 [J]. Chinese Journal of
7 Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(2): 534–550. doi:
8 10.3878/j.issn.1006–9895.2208.22029

9 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly
10 Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999–2049.
11 doi:10.1002/qj.3803

12 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
13 极端降水的影响评估 [J]. 高原气象, 40(6): 1470–1483. Huang Zili, Wu
14 Xiaofei, Mao Jiangyu. 2021. An evaluation for impacts of the horizontal resolution
15 of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over Southwest China
16 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(6): 1470–1483. doi:
17 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk010

18 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预
19 报分析 [J]. 气象学报, 72(2): 207–219. Jiang Xiaoman, Yuan Huiling, Xue
20 Ming, et al. 2014. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21–22 July
21 2012 based on high resolution model analyses and forecasts [J]. Acta
22 Meteorological Sinica (in Chinese), (2): 207–219. doi: 10.11676/qxxb2014.024

23 李晓兰, 符娇兰. 2021. 基于 CRA 技术的华南前汛期强降水 EC 模式预报误差分
24 析 [J]. 热带气象学报, 37(2): 194–206. Li X L, Fu J L. 2021. Forecast error
25 analysis of EC model for heavy rainfall during annually first rainy season in South
26 China based on CRA method [J]. J Trop Meteor (in Chinese), 37(2): 194–206.
27 doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.019

28 李泽椿, 谌芸, 王新敏, 等. 2022. 从“75·8”到“21·7”的思考 [J]. 气象与环境科学,
29 45(2): 1–13. Li Zechun, Chen Yun, Wang Xinmin, et al. 2022. Thinking of
30 Extreme Rainstorms from the August 1975 Event to the July 2021 Event [J].

1 Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 45(2): 1–13.
2 doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2022.02.001.

3 梁生俊, 王培, 高守亭. 2013. 一次陕西初夏暴雨过程的数值模拟及诊断分析 [J].
4 气候与环境研究, 18 (1): 12–22. Liang Shengjun, Wang Pei, Gao Shouting.
5 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of rainstorm over Shaanxi
6 Province during early summer [J]. Climatic and Environmental Research (in
7 Chinese), 18 (1): 12–22. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10144

8 林朝晖, 王坤, 肖子牛, 等. 2017. IAPAGCM 4.0 模式对热带大气季节内振荡的模
9 拟评估 [J]. 气候与环境研究, 22(2): 115–133. Lin Zhaohui, Wang Kun, Xiao
10 Ziniu, et al. 2017. The Madden-Julian oscillation simulated by the IAP AGCM 4.0
11 [J]. Climatic and Environmental research (in Chinese), 22(2): 115–133.
12 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16085

13 卢乃锰, 谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 20(5): 832–841.
14 Lu Naimeng, Gu Songyan. 2016. Review and prospect on the development of
15 meteorological satellites [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 20(5):
16 832–841. doi: 10.11834/jrs.20166194

17 Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China:
18 research progress since the Reform and Opening-Up of New China [J]. Journal of
19 Meteorological Research, 34(3): 427–459. doi:10.1007/s13351-020-0006-x

20 马杰, 尹姗, 金荣花, 等. 2021. 一次梅汛期极端降雨过程雨带位置模式预报性能
21 对比分析[J]. 大气科学, 45(3): 487–498. Ma Jie, Yin Shan, Jin Ronghua, et al.
22 2021. Comparative analysis of forecast evaluation for rain band position in an
23 extreme Meiyu rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
24 Chinese), 45(3): 487–498. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20116

25 Randall D A, Bitz C M, Danabasoglu G, et al. 2018. 100 years of earth system model
26 development [J]. Meteorological Monographs, 59(1): 12.1–12.66.
27 doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0018.1

28 Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. Research and operational development of
29 numerical weather prediction in China [J]. Journal of Meteorological Research,
30 34(4): 675–698. doi:10.1007/s13351-020-9847-6

- 1 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
2 象学报, 78(3): 451–476. Shen Xueshun, Wang Jianjie, Li Zechun, et al. 2020.
3 China's independent and innovative development of numerical weather prediction
4 [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 78(3): 451–476.
5 doi:10.11676/qxxb2020.030
- 6 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
7 区域模式预报分析 [J]. 大气科学学报, 44(5): 688–702. Shi Wenru, Li Xin,
8 Zeng Mingjian, et al. 2021. Multi-model comparison and high-resolution regional
9 model forecast analysis for the “7·20” Zhengzhou severe heavy rain [J].
10 Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 688–702.
11 doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210823001
- 12 Tang S Q, Xie S C, Guo Z, et al. 2022. Long-term single-column model intercomparison
13 of diurnal cycle of precipitation over midlatitude and tropical land [J]. Quarterly
14 Journal of the Royal Meteorological Society, 148(743): 641–669.
15 doi:10.1002/qj.4222
- 16 Tang S Q, Zhang M H. 2015. Three-dimensional constrained variational analysis:
17 Approach and application to analysis of atmospheric diabatic heating and
18 derivative fields during an ARM SGP intensive observational period [J]. Journal
19 of Geophysical Research: Atmospheres, 120(15): 7283–7299.
20 doi:10.1002/2015JD023621
- 21 陶祖钰, 郑永光. 2013. “7·21”北京特大暴雨的预报问题 [J]. 暴雨灾害, 32(3):
22 193–201. Tao Zuyu, Zheng Yongguang. 2013. Forecasting issues of the extreme
23 heavy rain in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters (in
24 Chinese), 32(3): 193–201. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03
- 25 王丹, 阮征, 王改利, 等. 2019. 风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的同化
26 应用研究 [J]. 大气科学, 43(3): 634–654. Wang Dan, Ruan Zheng, Wang Gaili,
27 et al. 2019. A study on assimilation of wind profiling radar data in GRAPES-Meso
28 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 634–654.
29 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125

- 1 王金成, 陆慧娟, 韩威, 等. 2017. GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能 [J].
2 应用气象学报, 28(1): 11–24. Wang Jincheng, Lu Huijuan, Han Wei, et al. 2017.
3 Improvements and performances of the operational GRAPES_GFS 3DVar system
4 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28(1): 11–24. doi:
5 10.11898/1001-7313.20170102
- 6 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
7 预报评估 [J]. 大气科学, 45(3): 664–682. WANG Jingzhuo, CHEN Fajing,
8 CHEN Jing, et al. 2021. Verification of GRAPES-REPS Model Precipitation
9 Forecasts over China during 2019 Flood Season [J]. Chinese Journal of
10 Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 664–682. doi: 10.3878/j.issn.1006-
11 9895.2008.20146
- 12 王瑞, 乔枫雪, 丁杨, 等. 2021. 不同嵌套方式下的积云对流方案对上海崇明极端
13 暴雨高分辨率模拟的影响研究 [J]. 气候与环境研究, 26(1): 58–74. Wang
14 Rui, Qiao Fengxue, Ding Yang, et al. 2021. Impact of cumulus parameterization
15 schemes with multigrid nesting on the high-resolution simulation of an extreme
16 heavy rainfall event in Chongming, Shanghai [J]. Climatic and Environmental
17 Research (in Chinese), 26(1): 58–74. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20016
- 18 Wang X C, Miao H, Liu Y M, et al. 2022. The use of satellite data-based “critical
19 relative humidity” in cloud parameterization and its role in modulating cloud
20 feedback [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 14(10):
21 e2022MS003213. doi:10.1029/2022MS003213
- 22 Wang X C, Zhang M H. 2013. An analysis of parameterization interactions and
23 sensitivity of single-column model simulations to convection schemes in CAM4
24 and CAM5 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(16):
25 8869–8880. doi:10.1002/jgrd.50690
- 26 Wang X C. 2015. Development of a toy column model and its application in testing
27 cumulus convection parameterizations [J]. Science Bulletin, 60(15): 1359–1365.
28 doi:10.1007/s11434-015-0850-8
- 29 吴吉东, 傅宇, 张洁, 等. 2014. 1949—2013 年中国气象灾害灾情变化趋势分析

1 [J]. 自然资源学报, 29(9): 1520–1530. Wu Jidong, Fu Yu, Zhang Jie, et al.
2 Meteorological disaster trend analysis in China: 1949—2013 [J]. Journal of
3 Natural Resources (in Chinese), 29(9): 1520–1530. doi:
4 10.11849/zrzyxb.2014.09.007

5 Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud
6 clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. Journal of the Atmospheric
7 Sciences, 30(4): 611–627. doi:10.1175/1520-
8 0469(1973)030<0611:DOBPOT>2.0.CO;2

9 Yu R C, Zhang Y, Wang J J, et al. 2019. Recent progress in numerical atmospheric
10 modeling in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 938–960.
11 doi:10.1007/s00376-019-8203-1

12 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等. 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征 [J]. 气象,
13 49(12): 1421–1434. Zhang Fanghua, Yang Shunan, Hu Yi, et al. 2023. Water
14 vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China [J].
15 Meteor. Mon. (in Chinese), 49(12): 1421–1434. doi: 10.7519/j.issn.1000-
16 0526.2023.103003

17 张江涛, 何丽华, 李江波, 等. 2023. 河北“23.7”极端暴雨过程特征及成因初探
18 [J]. 大气科学学报, 46(6): 884–903. Zhang Jiangtao, He Lihua, Li Jiangbo, et
19 al. 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme
20 rainstorm in Hebei [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(6):
21 884–903. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230905001.

22 Zhang L, Liu Y Z, Liu Y, et al. 2019. The operational global four-dimensional
23 variational data assimilation system at the China Meteorological Administration
24 [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145(722): 1882–1896.
25 doi:10.1002/qj.3533

26 钟琦, 孙卓, 陈昊明, 等. 2022. 京津冀强降水日变化的多模式预报偏差及成因分
27 析[J]. 中国科学:地球科学, 52(9): 1831–1848. Zhong Q, Sun Z, Chen H M, et
28 al. Multi model forecast biases of the diurnal variations of intense rainfall in the
29 Beijing- Tianjin-Hebei Region. Science China Earth Sciences (in Chinese), 2022,
30 65(8): 1490–1509. doi:10.1360/SSTe-2021-0286