

陈湉茹,张祎,孙溦,等.2024.应用GRIST模式对“23·7”华北极端降水的模拟试验[J].暴雨灾害,43(3):276–287. CHEN Tianru, ZHANG Yi, SUN Wei, et al. 2024. Simulation experiment on “23·7” extreme precipitation in North China using the GRIST model [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):276–287 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–263

应用GRIST模式对“23·7”华北极端降水的模拟试验

陈湉茹^{1,2},张祎^{1,3,4},孙溦⁴,李妮娜⁵,刘鸿波²,徐幼平⁶

(1.航天宏图信息技术股份有限公司 2035未来实验室,北京 100195;2.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,北京 100029;3.南京信息工程大学北京研究院,北京 100094;4.中国气象科学研究院,北京 100081;5.国家气象中心,北京 100081;6.北京应用气象研究所,北京 100029)

摘要:全球-区域一体化预测系统(Global-Regional Integrated forecast SysTem, GRIST)的变网格公里尺度非静力模式(以下简称GRIST模式)兼具全球和区域模式的特点,可在无需侧边界条件下进行中期时间尺度预报,有望在局部区域达到与高分辨率的区域模式预报接近的效果。为了检验该模式对极端天气事件的模拟能力,以2023年7月29日—8月2日华北地区特大暴雨过程(以下简称“23·7”极端降水)为例,通过回报试验对GRIST变网格模式对“23·7”极端降水的模拟能力进行了评估;同时利用CMAP降水资料和ERA5再分析资料,采用空间相关系数、TS和BIAS评分等客观分析指标,将国内外GRIST变网格模式对极端降水的模拟效果与目前国内外5种主要业务模式即ECMWF、CMA-GFS全球模式和CMA-MESO、CMA-SH、CMA-BJ区域模式的预报效果进行了比较。结果表明:(1)GRIST及5种业务模式均能模拟或预报出“23·7”极端降水过程的发生。GRIST对该过程中降水最强时段(7月30日08:00—8月1日08:00,北京时,下同)的模拟效果最佳,与观测降水的空间相关系数最高可达0.85,各量级降水的TS评分均达区域模式的预报水平。(2)GRIST模式能准确模拟“23·7”极端降水过程的大尺度环流特征,包括西太平洋副热带高压的位置和范围、北向的水汽输送等,对于表征局地环流演变特征的风暴相对螺旋度的分布和强度也有较好的模拟效果。(3)GRIST模式对不同尺度环流形势的准确模拟,有助于其对降水落区和降水演变特征的精准刻画。

关键词:数值模拟;极端降水;变分辨率模式;全球模式

中图法分类号: P435

文献标志码:A

DOI: 10.12406/byzh.2023–263

Simulation experiment on “23·7” extreme precipitation in North China using the GRIST model

CHEN Tianru^{1,2}, ZHANG Yi^{1,3,4}, SUN Wei⁴, LI Nina⁵, LIU Hongbo², XU Youping⁶

(1. 2035 Future Laboratory, PIESAT Information Technology, Co Ltd, Beijing 100195; 2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
3. Beijing Research Institute, Nanjing University of Information Science and Technology, Beijing 100094; 4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 5. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 6. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

Abstract: GRIST (Global-Regional Integrated forecast SysTem), the kilometer-scale variable-resolution (VR) model, combines the virtues of both global and regional models. It can provide medium-term forecast products without lateral conditions while it is expected to reach a forecast level similar to that of high-precision regional models. To evaluate GRIST’s ability to simulate extreme weather events, this study uses the VR version of GRIST to conduct a hindcast experiment on the extremely heavy rainfall event that occurred in North China from July 29 to August 2, 2023. The simulation results are evaluated against satellite-gauge merged precipitation analysis (China Merged Precipitation Analysis, CMAP) and global reanalysis (the fifth generation of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts atmospheric

收稿日期: 2023-12-07;定稿日期:2024-03-29

资助项目:国家自然科学青年基金项目(42305169)

第一作者:陈湉茹,主要从事数值模式评估和改进研究。E-mail: chentianru@piesat.cn

通信作者:张祎,主要从事数值模式发展和改进研究。E-mail: zhangyi_fz@piesat.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

reanalysis of the global climate, ERA5) data, and are also compared with five other operational numerical models (including global models, ECMWF and CMA-GFS, as well as regional models, CMA-MESO, CMA-SH, and CMA-BJ). Results indicate that both GRIST and five operational models can reproduce the occurrence of this heavy rainfall event at various degrees. From 08 BT 30 July to 08 BT 1 August, the period with the strongest precipitation during the event, the simulation performance of GRIST is optimal. The spatial correlation coefficient between GRIST and CMAP can reach up to 0.85, and the TS scores of precipitation at various intensities are at the levels of regional model forecasts. GRIST accurately simulated the large-scale circulation characteristics during this process, encompassing the location and extent of the Western Pacific Subtropical High, northward water vapor transport. Furthermore, it demonstrated a commendable capability in simulating the distribution and intensity of storm-relative helicity, a key indicator of the local circulation. The precise representation of circulation conditions at various scales by GRIST contributes significantly to its ability to characterize precipitation areas and the evolution of precipitation.

Key words: numerical simulation; extremely heavy rainfall; variable-resolution model; global model

引言

全球气候变暖背景下,我国极端暴雨事件呈现多发、重发态势,严重影响经济社会的可持续发展(周波涛和钱进,2021)。2020年全国暴雨洪涝致灾面积719.6万公顷,死亡失踪450人,直接经济损失2 685.8亿元(余勇,2022)。基于数值模式开展高效、准确的极端降水预报,是降低此类事件致灾风险程度的重要手段(Sillmann et al.,2017)。然而,对极端降水的准确预报仍然是当前数值天气预报系统面临的主要困难和挑战(Davolio et al.,2009)。研究表明,非静力模式在模拟区域中小尺度极端降水等高影响天气事件时表现优于静力模式(Janjic et al.,2001; Saito et al.,2007)。随着计算机能力和模式水平分辨率的提升,数值天气预报模式和气候模式均朝着高分辨率和非静力平衡方向发展。全球高分辨率的非静力模式是当前天气和气候模式的技术发展要点(Stevens et al.,2019; Morbidelli,2022)。

全球-区域一体化预测系统(Global-Regional Integrated Forecast System, GRIST)是一个面向天气-气候一体化模拟的数值模式系统,旨在为科学的研究和业务应用提供全面支撑,并推动数值模拟这一科学范式的学术前沿。GRIST涵盖全球-区域、天气-气候的一体化模拟预测能力。模式动力框架自2017年起开始研发。基于自主设计的非结构网格和非静力-静力一体化动力框架离散方法(Zhang, 2018; Zhang et al., 2019, 2020),建立了动力模式的原型系统。在此基础上,先后耦合了适用于天气尺度和气候尺度模拟的多尺度物理过程包,使得模式可针对不同尺度的典型应用提供优化配置方案(Zhang et al.,2021; Li et al.,2022; Zhang et al.,2022; Li et al.,2023)。这种设计理念与业界倡导的一体化数值模式发展思路相符(Brown et al., 2012; Randall and Emanuel, 2024),即构建一个通用基础模式,支持高分辨率天气预测和长期气候模拟,为满足不同应用需求的定制化模型提供共性支撑。

GRIST模式1.0版本代码于2022年建成,这一版本的重要里程碑是开展了中国首个全球3~5 km非静

力域、风暴解析尺度的模拟试验(Zhang et al., 2022),并基于此参加了全球风暴解析尺度模式比较计划(Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains, DYAMOND)。国际同行对GRIST模式在DYAMOND比较计划的模拟表现给出了肯定(Stevens, 2022)。此外,该模式1.0版本已被广泛用于科学研究,涉及多时空尺度的模拟试验和性能分析,例如长期气候模拟(李晓涵等,2023; Zhou et al., 2023; Fu et al., 2024)、季节尺度模拟(陈苏阳等,2023)和天气预报试验(Chen et al., 2023; Sun et al., 2023; 王一鸣等,2023)等。GRIST模式在多个国家重点研发计划和国家自然科学基金重大项目中得到了广泛应用,收获了良好的效果。

业务应用方面,基于GRIST的全球业务预测模式配置于2023年在航天宏图公司得到了业务预报试运行。针对降水预报性能方面的内部评估表明,GRIST的多项标准化评分指标与欧洲中心的IFS模式和美国环境预报中心的GFS模式评分结果相近(王一鸣等,2023)。然而,受限于本地业务环境的计算资源,业务版本所采用的水平分辨率(30 km)低于IFS (9 km)和GFS (13 km)。较低的分辨率对于极端事件准确模拟是一个不利因素。GRIST模式的可变分辨率功能有效地支持了在现有计算条件下对局部区域进行公里尺度的模拟预测。这对于未来开展实时业务预报具有显著价值。

本文基于GRIST模式60~3.5 km局部加密的可变分辨率公里尺度预测配置,针对“23·7”华北极端降水事件开展模拟试验,并分析模拟效果。本次过程受台风“杜苏芮”减弱后的低涡北上影响,降水范围广、雨强雨量大、持续时间长并呈阶段性发展,单站过程累积降水量超过1 000 mm(杨舒楠等,2023),给京津冀地区造成严重人员伤亡和经济损失。气象部门虽已预报600 mm以上极端强降水的发生,但对极值中心的落区和强度的预报仍有偏差(张江涛等,2023)。鉴于我国华北地区暴雨多发生于7—8月,总次数偏少但单次降水强度大、致灾性强(丁一汇,2019),选择“23·7”事件对于评估模式极端事件预测性能具有代表性。

而此前基于GRIST模式的天气预报评估主要聚焦于其统计特征分析(Zhou et al., 2020; Chen et al., 2023)或极端事件对气候变化情景的响应分析(Sun et al., 2023)。与上述已开展研究相比,本研究更关注GRIST可变分辨率公里尺度预测配置对极端降水事件的定点、定时、定量预报能力的分析,与常规气象业务预报具有更直接的相关性。

1 资料与方法

1.1 GRIST模式、个例实况与试验设计

1.1.1 GRIST模式

GRIST是我国自研的全球-区域、天气-气候一体化数值模式系统,自2017年开始研发(Zhang et al., 2023)。动力框架基于干质量的广义垂直坐标,并在垂直方向上采用控制体积层平均离散化方式,从而可灵活选择静力和非静力动力框架(Zhang et al., 2020),本文采用其非静力动力框架。GRIST水平方向采用非结构网格,以支持准均匀网格和变分变率网格的切换(Zhou et al., 2020)。与常规大气模式中使用的经纬度网格相比,准均匀网格的网格单元大小和形状更加均匀,避免了高纬度地区格距过小的问题,对于高性能计算的负载平衡也更有利。水平方向上的离散化采用了基于交错有限体积法的六边形C网格设计方案(Zhang, 2018)。在湿大气模式中,采用了动力-示踪物-物理时间积分分离的方式,以提高计算效率。

1.1.2 个例实况

“23·7”极端降水过程在持续时间和降水强度两方面均表现出极端特性。降水过程持续时间达4 d,华北地区降水从2023年7月29日持续至8月2日。CM-PA(China Merged Precipitation Analysis)观测资料显示(图1),北京和河北大部平均日降水量达100 mm以上,沿太行山-燕山一线存在两个平均日降水量达250 mm以上的强降水中心。根据此次过程CM-PA平均日降水量的空间分布特征(图1),选取平均日降水量超过100 mm的区域(113° — 117° E, 35° — 41° N)(图1中黑色虚线框),作为后续评估模式模拟效果的降水关键区。

1.1.3 试验设计

GRIST模式的动力-物理耦合模块具有较强的通用性(Zhang et al., 2020),可以根据不同时空尺度的应用选择相匹配的物理过程包(Zhang et al., 2021; Li et al., 2022)。本文采用了天气预测物理过程包PhysW(Li et al., 2023),其中主要包括YSU(Yonsei University)边界层方案(Hong and Pan, 1996)、RRTMG(Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models)辐射传输方案(Mlawer et al., 1997; Iacono et al., 2008)、

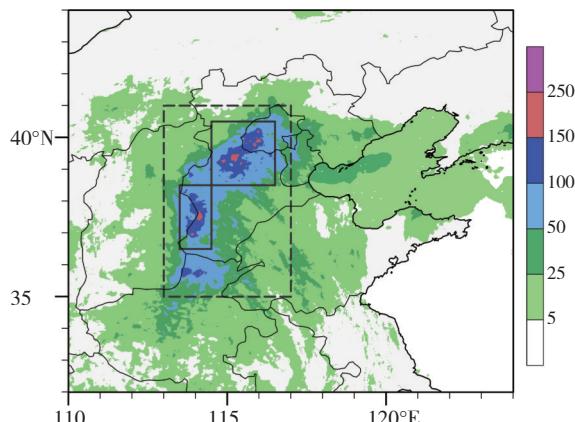


图1 2023年7月29日08:00—8月2日08:00 CMPA观测平均日降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)空间分布(黑色虚线框为降水关键区、实线框为过程中两个降水中心所在位置)

Fig. 1 The spatial distribution of CMPA observed average daily precipitation (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) from 08:00 BT 29 July to 08:00 BT 2 August. (The black dotted box in the figure indicates the key precipitation area, and the black solid line box indicates the location of the two precipitation centers during the process)

Tiedtke-Betchtold 对流方案(Bechtold et al., 2014; Zhang and Wang, 2017)、WSM6(WRF Single-Moment 6-class)云微物理方案(Hong and Lim, 2006)和Noah-MP陆面模块(Niu et al., 2011; Yang et al., 2011)。

试验采用局部加密的水平网格,加密中心位于北京(116° E, 40° N),水平分辨率约为60~3.5 km(图2),垂直30层。模式的时间步长为60 s。采用了Smagorinsky流依赖二阶水平扩散和水平四阶超扩散,扩散系数随网格尺度变化。模拟时段为2023年7月28日08:00—8月2日08:00(北京时,下同),逐小时输出模式模拟结果。选用美国国家海洋和大气管理局的全

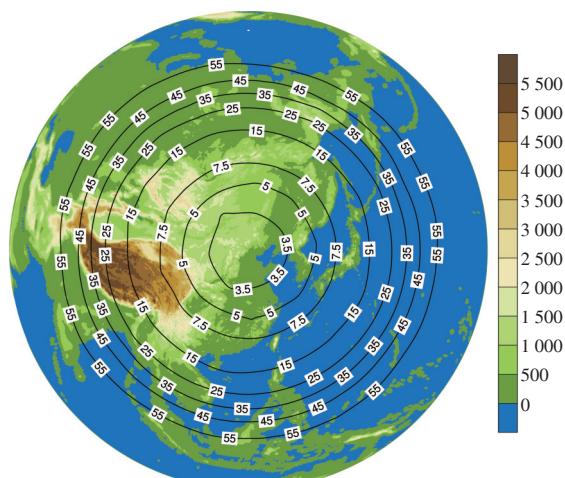


图2 GRIST模式加密网格分辨率(黑色等值线, 单位: km)和地形高度(填色, 单位: m)

Fig. 2 The horizontal resolution (the black contour, unit: km) and the surface elevation (color-filled, units: m) of the variable-resolution (VR) mesh of GRIST

球再分析资料(FNL)作为GRIST模式的初值条件,海冰浓度资料取自欧洲中期数值预报中心的第五代全球再分析资料(ERA5),海温由活跃的混合层海洋模式计算得到。

1.2 资料说明

1.2.1 观测与再分析资料

以中国气象局信息中心发布的降水融合CMAPA(China Merged Precipitation Analysis)资料为观测值(潘旸等,2012)。CMAPA数据经过多年发展,目前水平

分辨率已达 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。再分析数据取自ERA5,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$;CMAPA与ERA5数据的时间分辨率均为1 h。

1.2.2 业务预报产品

为了更好地对比GRIST的预报效果,本文选取了2种全球业务模式(ECMWF和CMA-GFS),3种区域模式(CMA-MESO,CMA-SH和CMA-BJ)作为参考模式衡量GRIST模式与当前国内外最先进的业务模式的差距,表1为5种业务模式及GRIST的信息。

表1 不同模式分辨率及对“23·7”华北极端降水的起报和检验时间

Table 1 The resolution of various models as well as the starting time and validation time of the “23·7” extreme precipitation event in North China.

模式类型	编号	模式名称	水平分辨率/km	时间分辨率/h	起报时间/(月-日-时)	检验时段/(月-日-时)
全球模式	G1	全球-区域一体化预测系统(GRIST)	60~3.5	1		
	G2	欧洲中期数值预报中心集成预报系统(ECMWF)	12.5	3	07-28-08:00	07-29-08:00—08-02-08:00
	G3	中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)	12.5	3		
区域模式	R1	中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)	3	1		07-29-08:00—08-01-08:00
	R2	中国气象局上海数值预报模式系统(CMA-SH)	9	1	07-29-08:00	07-29-08:00—08-01-08:00
	R3	中国气象局北京快速更新循环数值预报系统(CMA-BJ)	9	1		07-29-08:00—07-31-08:00

1.3 检验方法

GRIST模式采用7月28日08:00起报进行试验。ECMWF和CMA-GFS两个业务模式也采用其7月28日08:00起报的预报产品。考虑到全球和区域模式的预报产品时效性差异(全球模式提供至少10 d以上的预报产品,区域模式主要提供最长预报时效为48~72 h的产品),以及模式的spin-up时间,区域模式统一采用7月29日08:00起报的预报产品。本文主要针对各模式逐24 h的累积降水量进行检验评估,各模式产品的预报检验时段如表1所示。以7月29日08:00作为过程开始时间,后文将7月29日08:00—30日08:00的累积降水量记为0~24 h累积降水量,7月30日08:00—31日08:00记为24~48 h累积降水量,依此类推。

将各模式结果通过临近点插值方法插值到CMAPA资料 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 网格上,对降水预报进行检验。针对不同降水量级计算TS(T_s)评分,空报率FAR(R_{FA}),命中率POD(P_{OD}),频率偏差BIAS(B_{IAS})和空间相关系数CORR(C_{orr})。各指标的计算公式如下

$$T_s = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (1)$$

$$R_{FA} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \quad (2)$$

$$P_{OD} = \frac{N_A}{N_A + N_C} \quad (3)$$

$$B_{IAS} = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \quad (4)$$

$$C_{orr} = \frac{\sum_{i,j} (F_{i,j} - \bar{F})(O_{i,j} - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i,j} (F_{i,j} - \bar{F})^2 \sum_{i,j} (O_{i,j} - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

其中, N_A 为有效命中, N_B 为空报, N_C 为漏报。 i 和 j 为格点位置,F和O分别表示对应格点上的模式和观测值,上划线“—”为对应变量的平均值。TS和POD的值越接近1,FAR的值越接近0,代表模式对对应量级降水的模拟越接近观测。BIAS评分大于(小于)1,说明模式高估(低估)了该量级降水的发生频率。

风暴相对螺旋度SRH(S_{RH})可用于表征风暴在发展成熟过程中从环境大气中可获得的螺旋度,常被用于分析和预报强对流天气(肖雯等,2018)。SRH正的数值越大,说明低层环境大气越有利于强对流系统和气旋性涡旋的发展(殷菲等,2022),计算公式如下

$$S_{RH} = \int_0^h (V_h - C) \omega_h dz \quad (6)$$

其中, V_h 为水平环境风场, C 为风暴移动速度, ω 为水平涡度矢量。 h 为距地表高度,通常为1~3 km,本文选取 $h=3$ km。

2 模拟效果评估

2.1 对累积降水量分布和强度的模拟

2.1.1 0~24 h 累积降水量

图3为7月29日08:00—7月30日08:00观测资料CMAP及6种模式预报产品24 h累积降水量的空间分布。由图3a可见,该时段降水分布较为分散,以太行山东麓降水最强,最大累积降水量约400 mm。GRIST与CMAP降水的空间相关系数为0.62(图3b),达到了3种

区域模式平均预报水平。除CMA-GFS外,各模式与CMAP降水的空间相关系数均超过0.56,其中CMA-BJ与CMAP降水空间相关系数达到0.67,最大累积降水量(359.6 mm)(图3g)也与观测值最为接近。对比全球模式与区域模式的0~24 h最大累积降水量的空间分布可发现,全球模式均低估了该时段内太行山东麓强中心的降水大小。这可能是由于全球模式的水平分辨率相对较粗,无法准确解析中小尺度系统所致,因此模式水平分辨率对于中小尺度极端降水强度预测极为重要。

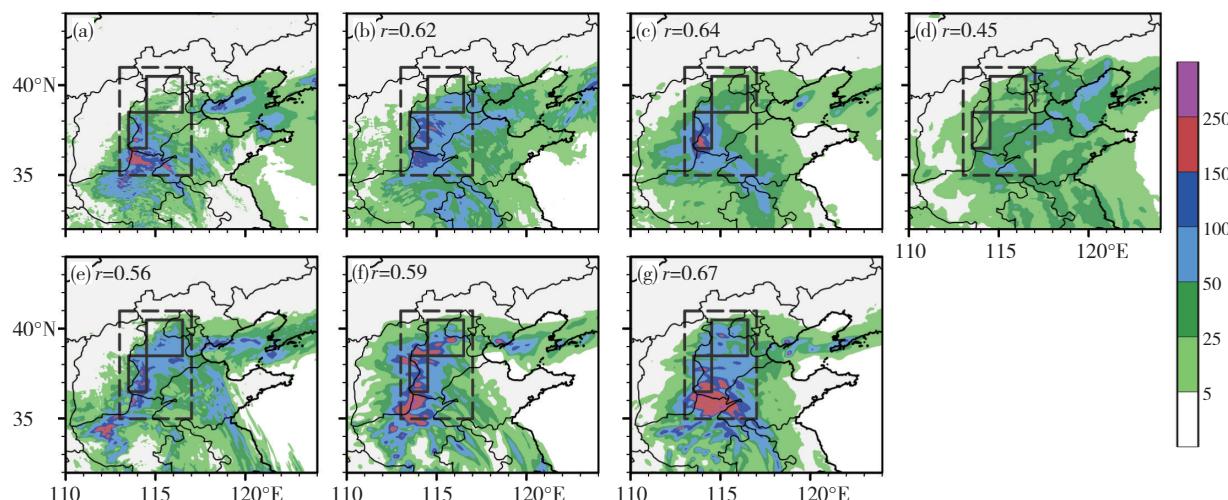


图3 2023年7月29日08:00—7月30日08:00 CMAP (a)、GRIST (b)、ECMWF (c)、CMA-GFS (d)、CMA-MESO (e)、CMA-SH (f) 和CMA-BJ (g)模式的24 h 累积降水量(单位: mm)。图b—g中数字为各模式与CMAP降水的空间相关系数(r)

Fig. 3 The 24 h accumulated precipitation (units: mm) of (a) CMAP, (b) GRIST, (c) ECMWF, (d) CMA-GFS, (e) CMA-MESO, (f) CMA-SH, and (g) CMA-BJ from 08:00 BT on 29 July to 08:00 BT on 30 July. The numbers in Fig.3 b—g are the spatial correlation coefficients (r) between each model and CMAP precipitation

为了比较各模式对不同量级降水的预报技巧,根据24 h降水等级进行划分,针对[0.1, 25) mm, [25, 50) mm、[50, 100) mm 和[100, 250) mm(即小到中雨、大雨、暴雨和大暴雨)四个量级的降水计算各模式评分,评估模式对关键区降水的预报效果(图4)。从图4a可以看出,GRIST与ECMWF、CMA-SH和CMA-MESO的TS评分基本相当。对于100 mm以下降水,全球模式评分几乎全优于区域模式。对于100 mm以上的降水,GRIST及区域模式CMA-BJ具有更高TS评分。此外,CMA-GFS对于50 mm及以上的暴雨预报水平欠佳,几乎没有产生100 mm以上的降水。

POD和FAR指标(图4b,c)共同反映出,GRIST全球变网格模式对暴雨及以上量级的降水POD较高,且FAR相对较低。CMA-BJ区域模式对大暴雨量级的降水POD达82.7%,但区域模式各量级降水POD偏低,FAR均超过60%,预报准确率POD较全球模式偏低。BIAS评分反映了模式对不同量级降水发生频率的模拟情况,可见GRIST对除暴雨以外的各量级降水频率的预报均较为准确,BIAS评分接近1(图4d)。

CMA-GFS大雨量级及CMA-BJ大暴雨量级降水的BIAS评分远大于其他模式,对降水发生频率的高估最为严重。

对于本次暴雨过程0~24 h 累积降水的预报,GRIST和ECMWF及各区域模式均能模拟出与观测较一致的降水落区,区域模式对强降水中心的模拟更为准确。同时,GRIST对各量级降水的预报性能均达到ECMWF和区域模式水平,且模拟的降水频率偏差较小、更接近观测。

2.1.2 24~48 h 累积降水量

图5为7月30日08:00—7月31日08:00观测值和6种模式预报产品的累积降水量,该时段为此次过程降水峰值时段,观测降水最大达到659.5 mm,并在太行山东麓和北京西部形成两个强降水中心(图中黑色实线框)。GRIST全球模式对该时段累积降水量的模拟效果较好,准确地模拟出了雨带的形态和强中心的位置,与CMAP观测降水的空间相关系数达到0.85。GRIST对于最大累积降水量的模拟效果为全球模式中较优水平,最大累积降水量

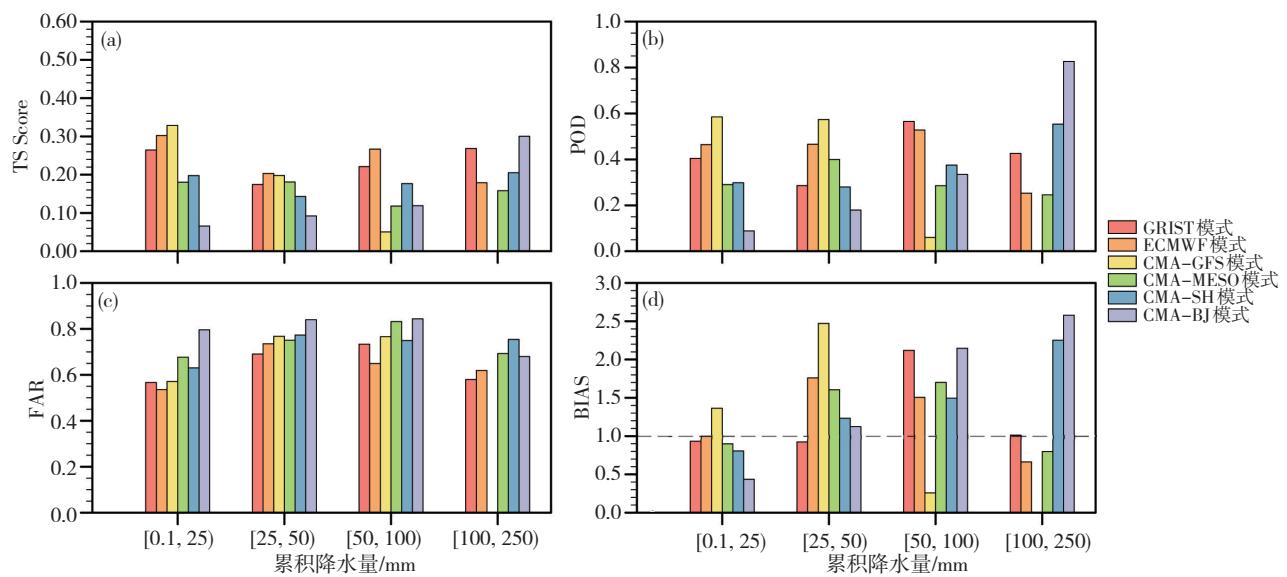


图4 各模式模拟的2023年7月29日08:00—30日08:00 24 h 累积降水量为[0.1, 25] mm、[25, 50] mm、[50, 100] mm、[100, 250] mm下的TS (a)、POD (b)、FAR (c)和BIAS (d)评估结果

Fig. 4 The evaluation results of (a) TS, (b) POD, (c) FAR, and (d) BIAS for the 24 h accumulated precipitation from 08:00 BT on July 29 2023 to 08:00 BT on July 30 2023, in each model simulation are categorized into precipitation intervals of [0.1, 25] mm, [25, 50] mm, [50, 100] mm and [100, 250] mm

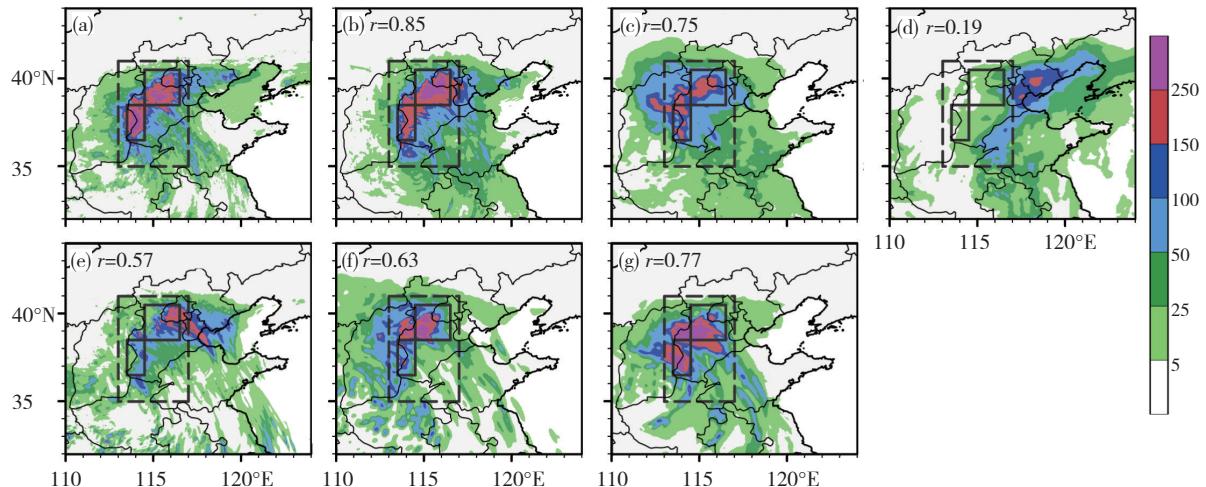


图5 同图3,但为2023年7月30日08:00—7月31日08:00的24 h 累积降水量(单位: mm)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the 24 h accumulated precipitation (unit: mm) from 08:00 BT on 30 July 2023 to 08:00 BT on 31 July 2023

水量达429.2 mm。但区域模式对最大累积降水量具有更优的预报性能,CMA-BJ模拟的最大降水量为603.3 mm。

同样对各模式在该时段内的累积降水量的预报效果进行定量评估。如图6a所示,全球模式GRIST各量级降水的TS评分均较高,BIAS评分均控制在0.7~1.2区间内,尤其在暴雨和大暴雨量级具有较高的POD和较低的FAR(图6b-d)。该时段内预报效果较好的全球模式与区域模式之间的性能表现相近,GRIST和ECMWF全球模式的预报性能保持较好,区域模式的模拟性能有所下滑。突出体现在GRIST模式在降水空间相关系数和多个量级降水的TS、FAR和BIAS评分等方面保持在较高水平。

2.1.3 48~72 h 累积降水量

图7为7月31日08:00—8月1日08:00的观测和5种模式预报产品累积降水量的空间分布。此时段强降水分布较为集中,主要位于华北中部—北京西部,最大累积降水量405.6 mm(图7a)。GRIST全球模式较好地模拟了该时段降水的空间分布,与观测降水的空间相关系数达0.67(图7b)。ECMWF全球模式和CMA-MESO、CMA-SH区域模式(图7c—f)较准确地模拟出了强降水的落区,CMA-GFS模拟强降水落区存在较大偏差,空间相关系数仅为0.13(图7d)。GRIST降水模拟的最大累积降水量(414.9 mm)与观测值最为接近。其余模式过低估计了该时段的最大降水,CMA-GFS和ECMWF模式的最大降水仅为200 mm左右。

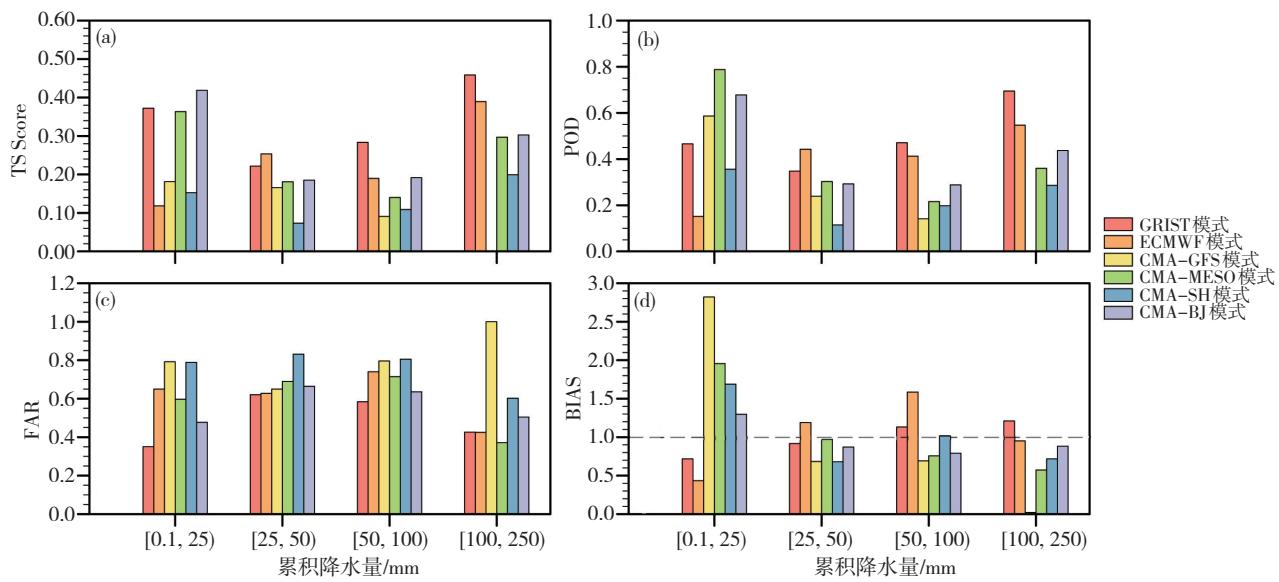


图6 同图4,但为2023年7月30日08:00—7月31日08:00的24 h累积降水量评估结果

Fig. 6 Same as Fig. 4, for the 24 h accumulative precipitation scores from 08:00 BT on 30 July 2023 to 08:00 BT on 31 July 2023

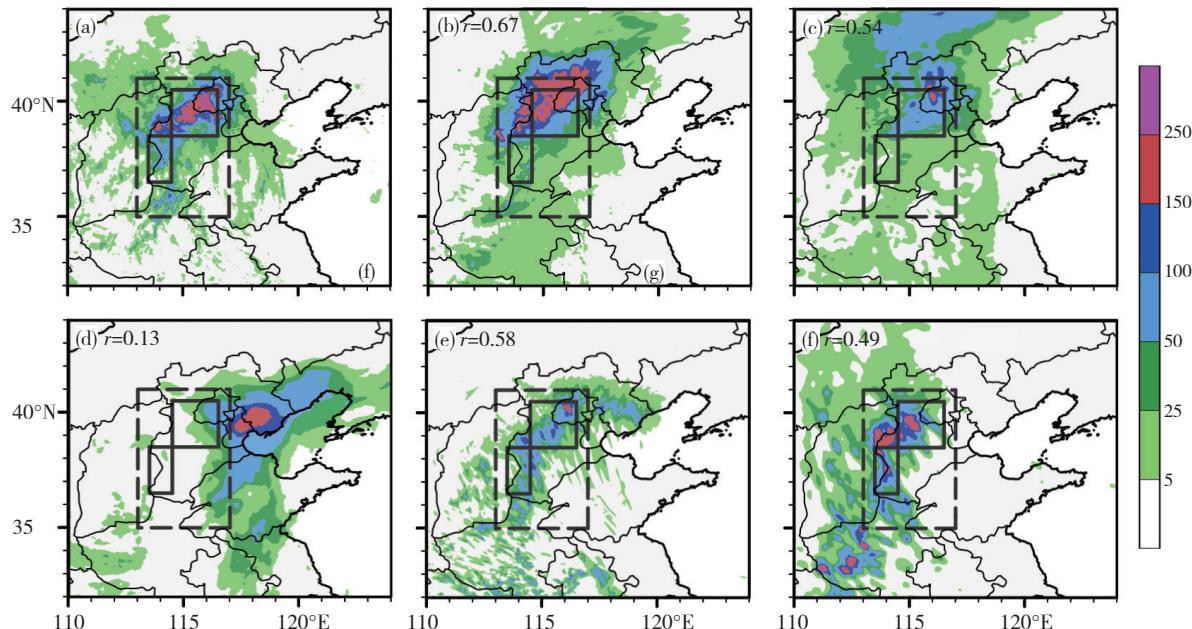


图7 同图3,但为2023年7月31日08:00—8月1日08:00的24 h累积降水量(单位: mm)

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for the 24 h accumulated precipitation (units: mm) from 08:00 BT on 31 July 2023 to 08:00 BT on 1 August 2023

图8为各模式对不同量级48~72 h累积降水量的预报技巧评分。GRIST与ECMWF的TS评分相当,且与24~48 h累积降水量TS评分结果类似,GRIST模式对大部分量级降水的TS评分略高于区域模式(图8a)。该时段GRIST对大暴雨量级降水的预报效果明显较优,POD远高于ECMWF和区域模式CMA-SH(图8b),但GRIST对大暴雨量级降水的发生频率高估较严重BIAS评分达1.57(图8d)。此外,GRIST对50 mm以下量级降水发生频率的预报性能较好,较CMA-SH更接近观测。

GRIST对于48~72 h累积降水的预报效果较好,

模拟的降水落区与观测高度一致,但过高估计了该时段的总降水量和强降水覆盖范围。反映降水预报技巧的各项评分也表明,GRIST对于小到中雨和大暴雨的模拟效果较好,但存在大暴雨降水频率较观测偏高的问题。

2.1.4 72~96 h 累积降水量

本次降水过程的极端性也体现在其持续时间方面,这种长持续性降水过程对模式的中期预报效果提出了更高的要求。图9给出8月1日08:00—8月2日08:00 CMPA观测资料及3种全球模式累积降水量的分布情况。该时段总降水量较少,雨带呈东北—西

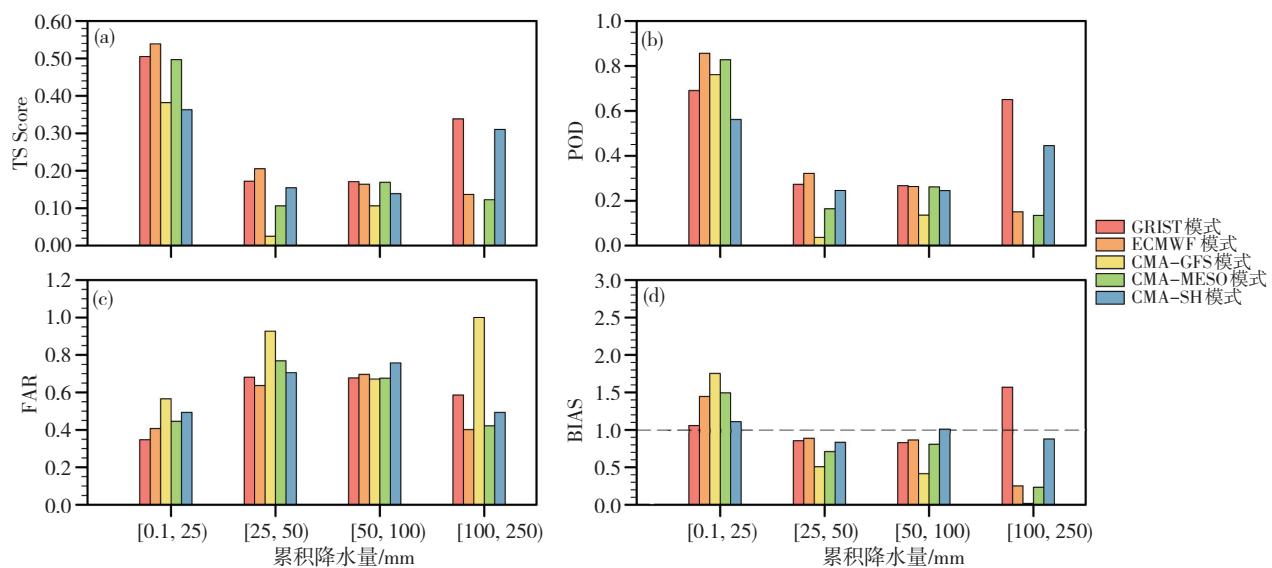


图8 同图4,但为2023年7月31日08:00—8月1日08:00的24 h累积降水量评估结果

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for the 24 h accumulative precipitation scores from 08:00 BT on 31 July 2023 to 08:00 BT on 1 August 2023

南走向,降水中心位于华北中部—北京西部,最大降水量为215 mm(图9a)。3种全球模式均成功模拟出了雨带的形态,其中GRIST与ECMWF模拟的最大累积降水量分别为143.4和110.5 mm,均低估了最大累积降水量和关键区内的降水(图9b—c),CMA-GFS模拟

的最大降水量为191.2 mm与观测较为接近,但强降水落区偏东、范围过大(图9d)。该时段距离3种模式的起报时间已超过96 h,模式与CMAP降水的空间相关系数均未超过0.18,对于强降水落区的模拟与观测存在较大偏差(图9b—d)。

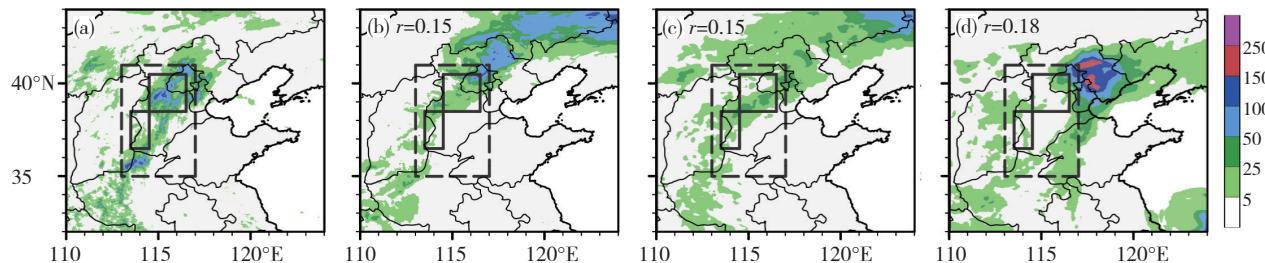


图9 同图3,但为2023年8月1日08:00—8月2日08:00的24 h累积降水量(单位: mm)

Fig. 9 Same as Fig. 3, but for the 24 h accumulated precipitation (unit: mm) from 08:00 BT on 1 August 2023 to 08:00 BT on 2 August 2023

虽然全球模式预报降水落区的误差较前三个时段更明显,但全球模式的长预报时效有力地填补了区域模式在中长期天气预报方面的空白,在实际业务应用中具备一定的指导和参考价值。图10中四项客观分析指标表明,GRIST维持了与ECMWF相当的预报技巧,且对小到中雨的预报效果优于ECMWF。GRIST对关键区内小到中雨降水的TS评分(图10a)和FAR指标(图10c)优于ECMWF和CMA-GFS,但包括GRIST在内的3种全球模式均存在高估弱降水发生频率的问题,BIAS评分超过1.65(图10d)。GRIST和CMA-GFS虽可模拟出该时段暴雨和大暴雨的发生,但模拟的落区偏移,区域内模拟降水全为空报(FAR=1)、且频率远低于观测,ECMWF则未能模拟出50 mm以上降水的发生(图10b—d)。这体现出在降水过程末期,GRIST对覆盖范围较大的弱降水和可能仍存在较大影响的强降水仍具备一定的预报能力。

2.2 对不同尺度天气系统的模拟

有利的环流形势是此次特大暴雨过程发展和维持的关键。本次过程发生在台风残涡北上停滞的稳定环流背景下,台风“杜苏芮”和“卡努”提供了持续而充沛的水汽和能量(杨舒楠等,2023)。图11为7月29日20时—31日08:00 ERA5再分析资料与GRIST逐12 h的环流形势。可见台风“杜苏芮”残涡在河南、山西一带长时间的停滞,在降水过程中后期减弱西移。低涡东侧与西太平洋副热带高压(简称为西太副高)西侧的偏南风,将水汽大量输送至华北地区。同时,偏南和偏东气流在太行山—燕山地区辐合抬升,北京及河北地区SRH值较大,有利于中尺度对流系统的发生和维持(图11a—d)。结合CMAP降水资料可以发现,大暴雨落区也主要出现在SRH大值区及其西侧的高梯度区,并随着SRH大值中心表现出西移—北推的演变趋势。在37°N附近山东及河北南部存在多个SRH

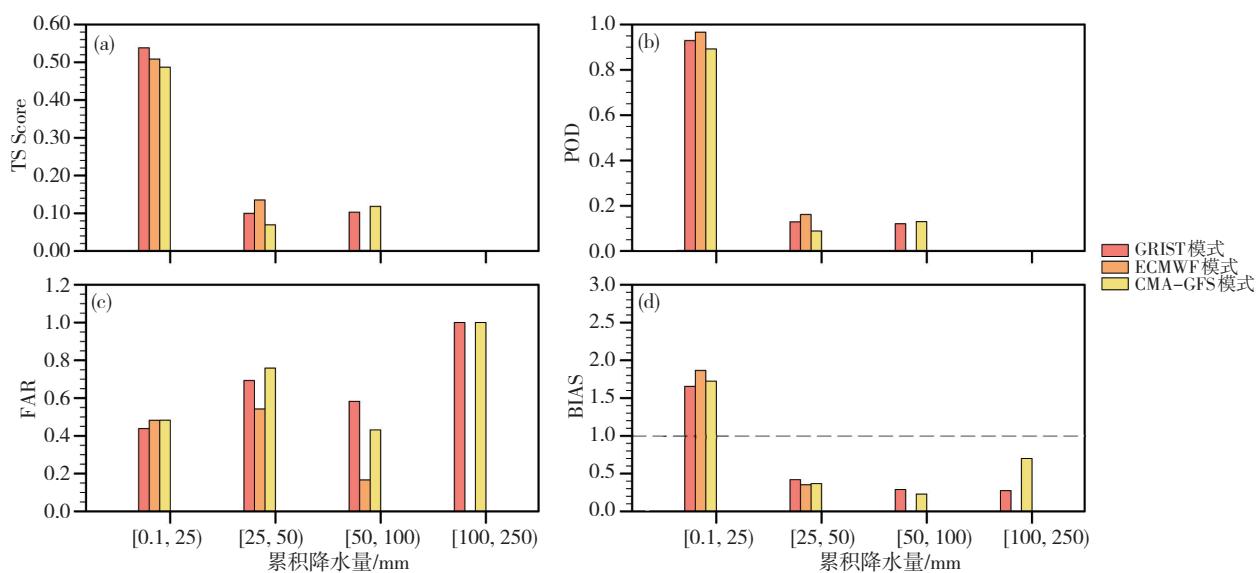


图10 同图4,但为2023年8月1日08:00—8月2日08:00的24 h累积降水量评估结果

Fig. 10 Same as Fig. 4, but for the 24 h accumulative precipitation scores from 08:00 BT on 1

August 2023 to 08:00 BT on 2 August 2023

大值中心(图11a),7月30日08:00 SRH大值中心北抬至北京南部-山东北部约39°N处(图11b),30日20时继续北移至40°N华北中部-天津一线,最大强度达到 $793.7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (图11c),随后强度减弱并维持在40°N附近(图11d)。在30日20时及以前,太行山附近也存在一SRH

大值中心发展维持,影响太行山东麓地区产生降水。

GRIST较准确地再现了此次强降水过程的大尺度环流特征,包括西太副高的位置和范围、北向的水汽输送。并准确刻画了过程中SRH中心的发展和移动情况,包括初期主要分散于山东的多个SRH大值中心

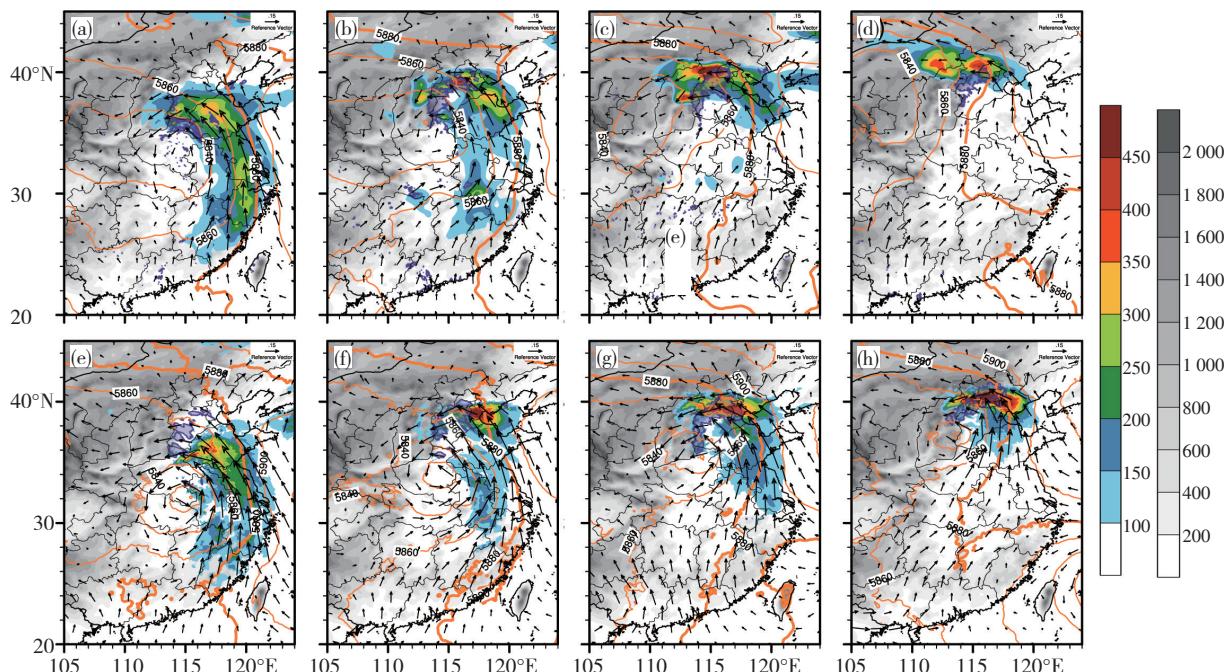


图11 2023年7月29日20:00 (a,e)、7月30日08:00 (b,f)、7月30日20:00 (c,g)、8月1日08:00 (d,h)的ERA5 (a-d)和GRIST (e-h) 0~3 km风暴相对螺旋度(彩色填色, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)、500 hPa位势高度场(橙色等值线, 单位: gpm)、850 hPa水汽通量(矢量箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)和12 h累积降水量为70 mm等降水线(紫色等值线, 单位: mm)。灰度填色为地形海拔高度(单位: m)

Fig. 11 The (a-d) ERA5 and (e-h) GRIST datasets are represented for the 0~3 km storm-relative helicity (color shading, units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), geopotential height at 500 hPa (orange line, units: m), specific humidity flux (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 850 hPa, and 70 mm isoline of 12 h accumulative precipitation (purple line, unit: mm) at (a, e) 20:00 BT on 29 July 2023, (b, f) 08:00 BT on 30 July 2023, (c, g) 20:00 BT on 30 July 2023 and (d, h) 08:00 BT on 1 August 2023. The gray shading denotes elevation (unit: m)

(图11e),以及SRH大值中心的北移及发展(图11f—h),说明局部加密至公里尺度的GRIST模式对于中小尺度强对流系统同样具备良好的模拟效果。但GRIST预报的环流场较ERA5再分析资料仍存在一定偏差,模拟的“杜苏芮”台风残涡强度偏强,且几乎一直停留于河南未发生西移(图11e—h)。低涡的维持造成其东侧的南风持续偏强,水汽被更多地输送至华北地区。此外,GRIST模拟的SRH中心于30日08:00便已达到峰值($678.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),且未能模拟出位于太行山附近的SRH中心,造成北京地区的大暴雨落区发生时间过早、影响范围过大,并低估了太行山东麓的降水。

3 结论与讨论

利用CMAP降水量资料,ERA5再分析资料和5种业务模式(ECMWF, CMA-GS, CMA-MESO, CMA-SH和CMA-BJ)预报产品数据分析了GRIST变网格公里尺度非静力模式对2023年7月29日—8月2日华北地区特大暴雨过程的模拟情况。得到主要结论如下:

(1) 评估的5种业务模式中,以CMA-BJ为代表的区域模式对于过程累积降水量的短期模拟(0~48 h时段)性能更佳,模拟的降水空间分布、暴雨及以上量级的强降水及其落区等与观测值更为接近。以ECMWF为代表的全球模式弥补了区域模式预报时效较短的缺陷,对于降水过程中后期(48~96 h时段)的小到中雨仍具备稳定的模拟性能,且0~48 h时段小到大雨的TS评分等指标接近或优于区域模式。但2种全球模式均存在对暴雨及以上量级的强降水模拟性能不足的问题。

(2) GRIST非静力模式再现了此次极端降水过程不同阶段降水的空间分布、量级大小以及演变特征。GRIST模式对此次事件的模拟优势主要体现在24~48 h和48~72 h时段,24~48 h时段GRIST累积降水量与CMAP观测降水的空间相关系数高达0.85,一定程度上改善了业务模式中落区偏移的问题。24~72 h时段内,GRIST对不同降水量级的TS和BIAS评分等降水预报技巧指标基本与ECMWF和区域模式持平,与ECMWF TS评分的差值基本保持在0.05分以内。

(3) GRIST对于不同尺度环流特征的准确模拟有助于其再现此次强降水过程的发展和移动特征,包括西太副高位置和范围、北向水汽输送、SRH中心位置等。但由于GRIST模拟的“杜苏芮”台风残涡强度偏强且停滞时间偏长,造成其与副高之间的南风偏强、水汽输送偏多。GRIST模拟的SRH中心过早达到峰值,造成北京及周边区域大暴雨量级降水出现时间偏早、影响范围偏大。且未能模拟出位于太行山附近的

SRH中心,低估了太行山东麓的强降水。

需要说明的是,本研究重点关注的是GRIST模式所具有的特征。以业务模式预报产品为参照,试图反映GRIST模式与业务产品的定性差异。GRIST模式与业务模式在预报方式和起报时间上的差异,并不影响本文主要结论。不同类型模式对于此次极端降水事件的模拟效果存在共性与差异。全球模式可提供长预报时效的预报产品,对小到大雨量级降水以及距起报时间较长的中期预报中具有较好、较稳定的预报性能,但对暴雨及以上量级的极端降水模拟性能不足。区域模式对暴雨及以上量级的降水模拟以及短期预报更具优势。GRIST变网格公里尺度模式兼具两类模式的优点,既能提供稳定的中期预报产品,亦能模拟出与区域模式中量级相当的极端降水。初值条件对模式的预报效果至关重要。五套业务模式均配备成熟的资料同化系统,而本研究中GRIST采用FNL再分析资料进行初始化。未来,发展与模式适配的同化系统,提供高质量初值条件,是进行业务预报的关键。本研究可以作为后续开展同化预报试验的基础。此外,模式对极端事件的模拟效果存在较大不确定性,不同起报时间亦影响着模式预报和评估结果,后续需要针对更多个例进行模拟诊断。

参考文献(References):

- 陈苏阳,张祎,周逸辉,等.2023. GRIST模式夏季气候回测试验中东亚降水季节内特征的评估[J].气象学报,81(2):269–285. Chen S Y, Zhang Y, Zhou Y H, et al. 2023. Assessment of intraseasonal characteristics of precipitation over East Asia in GRIST model summer climate hindcast [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(2):269–285 (in Chinese). doi: 10.11676/qxb2023.20220120
- 丁一汇.2019.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J].暴雨灾害,38(5): 395–406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):395–406 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045. 2019.05.001
- 李晓涵,张祎,林岩鉴,等.2023.一套湿物理参数化方案在GRIST全球模式中的应用及其对模拟气候态的影响[J].气象学报,81(4):630–644. Li X H, Zhang Y, Lin Y L, et al. 2023. Implementation of a moist physics parameterization package in the GRIST global model and its impact on the modeled climate [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(4):630–644 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2023.20230001
- 潘旸,沈艳,宇婧婧,等.2012.基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J].气象学报,70(6):1381–1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge–satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(6):1381–1389 (in Chinese). doi: 10.11676/qxb2012.116
- 王一鸣,李晓涵,张祎,等.2023. GRIST天气–气候一体化模式系统框架功能设计和应用[J].大气科学.Wang Y M, Li X H, Zhang Y, et al. 2023.

- Design and application of a unified weather-climate model system framework—GRIST [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.22223
- 肖雯, 刘春, 陆岳. 2018. 赣鄂皖交界地区一次飑线过程特征分析与数值模拟研究[J]. 暴雨灾害, 37(4):311–318. Xiao W, Liu C, Lu Y. 2018. Analysis on the characteristics and numerical simulation of a squall line on the boundary of three provinces [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 37(4): 311–318 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.003
- 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等. 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害, 42(5):508–520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(5):508–520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-187
- 殷菲, 王磊, 王有恒. 2022. 四川盆地一次暴雨过程的数值模拟及螺旋度分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 16(5):78–86. Yin F, Wang L, Wang Y H. 2022. Numerical simulation and helicity analysis of a heavy rain process in Sichuan Basin [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 16(5):78–86 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.011
- 余勇. 2022. 中国气象灾害年鉴(2021) [M]. 北京: 中国气象出版社. Yu Y. 2022. *Yearbook of Meterological Disasters in China (2021)* [M]. Beijing: Meterological Press (in Chinese)
- 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[J]. 大气科学学报. Zhang J T, He L H, Li J B, et al. 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme rainstorm in Hebei [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese). doi:10.1007/s00382-024-07205-2
- 周波涛, 钱进. 2021. IPCC AR6报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 17(6):713. Zhou B T, Qian J. 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. *Climate Change Research*, 17(6):713 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2021.167
- Bechtold P, Semane N, Lopez P, et al. 2014. Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(2):734–53. doi:10.1175/JAS-D-13-0163.1
- Brown A, Milton S, Cullen M, et al. 2012. Unified modeling and prediction of weather and climate: A 25-year journey [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12):1865–1877. doi:10.1175/BAMS-D-12-00018.1
- Chen T R, Li J, Zhang Y, et al. 2023. Evaluation of hourly precipitation characteristics from a global reanalysis and variable-resolution global model over the Tibetan Plateau by using a satellite-gauge merged rainfall product [J]. *Remote Sensing*, 15(4):1013. doi:10.3390/rs15041013
- Davolio S, Mastrangelo D, Miglietta M, et al. 2009. High resolution simulations of a flash flood near Venice [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5):1671–1678. doi:10.5194/nhess-9-1671-2009
- Fu Z, Zhang Y, Li X, et al. 2024. Intercomparison of two model climates simulated by a unified weather-climate model system (GRIST), part I: mean state [J]. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-024-07205-2
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- Hong S-Y, Lim J-O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2):129–51
- Hong S-Y, Pan H-L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Monthly Weather Review*, 124(10): 2322–2339. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D13103. doi:10.1029/2008JD009944
- Janjic Z I, Gerrity J P, Nickovic S. 2001. An alternative approach to nonhydrostatic modeling [J]. *Monthly Weather Review*, 129(5):1164–78. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<1164:AAATNM>2.0.CO;2
- Li J, Zhang Y. 2022. Enhancing the stability of a global model by using an adaptively implicit vertical moist transport scheme [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(3):55. doi:10.1007/s00703-022-00895-5
- Li X H, Zhang Y, Lin Y L, et al. 2023. Intercomparison of the weather and climate physics suites of a unified forecast-climate model system (GRIST-A22.7.28) based on single-column modeling [J]. *Geoscientific Model Development*, 16(10):2975–2993. doi:10.5194/gmd-16-2975-2023
- Li X H, Zhang Y, Peng X D, et al. 2022. Improved climate simulation by using a double-plume convection scheme in a global model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11):e2021JD036069. doi:10.1029/2021JD036069
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. 2021. Climate change 2021: the physical science basis [C]. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change
- Miyakoda K, Strickler R, Chludzinski J. 1978. Initialization with the data assimilation method [J]. *Tellus*, 30(1):32–54. doi:10.1111/j.2153-3490.1978.tb00816.x
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14):16663–82. doi:10.1029/97JD00237
- Morbidelli R. 2022. *Rainfall: Modeling, Measurement and Applications* [M]. Amsterdam: Elsevier
- Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D12109. doi:10.1029/2010JD015139
- Randall D A, and Emanuel K. 2024. The weather-climate schism [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(1):E300–E305. doi: 10.1175/BAMS-D-23-0124.1
- Saito K, Ishida J-I, Aranami K, et al. 2007. Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(2):271–304. doi:10.2151/jmsj.85B.271
- Sillmann J, Thorarinsdottir T, Keenlyside N, et al. 2017. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities [J]. *Weather and climate extremes*, 18(2017):65–74. doi: 10.1016/j.wace.2017.10.003
- Stevens B, Satoh M, Auger L, et al. 2019. DYAMOND: the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1):1–17. doi: 10.1186/s40645-019-0304-z

- Stevens B. 2022. EarthCare and the challenge of simulating the coupled climate of the tropics using global storm-resolving models [C]. 1st Earth-CARE Modeling Workshop
- Sun W, Li J, Yu R C, et al. 2023. Exploring changes of precipitation extremes under climate change through global variable-resolution modeling [J]. *Science Bulletin*,69(2):237–247. doi:10.1016/j.scib.2023.11.013
- Wang L, Zhang Y, Li J, et al. 2019. Understanding the performance of an unstructured-mesh global shallow water model on kinetic energy spectra and nonlinear vorticity dynamics [J]. *Journal of Meteorological Research*,33(6):1075–1097. doi:10.1007/s13351-019-9004-2
- Yang Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,116,D12110. doi:10.1029/2010JD015140
- Zhang C, Wang Y. 2017. Projected future changes of tropical cyclone activity over the western North and South Pacific in a 20-km-mesh regional climate model [J]. *Journal Climate*,30(15):5923–5941. doi:10.1175/JCLI-D-16-0597.1
- Zhang Y. 2018. Extending high-order flux operators on spherical icosahedral grids and their applications in the framework of a shallow water model [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,10(1):145–164. doi:10.1002/2017MS001088
- Zhang Y, Li J, Yu R C, et al. 2019. A layer-averaged nonhydrostatic dynamical framework on an unstructured mesh for global and regional atmospheric modeling: model description, baseline evaluation, and sensitivity exploration [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,11(6):1685–1714. doi:10.1029/2018MS001539
- Zhang Y, Li J, Yu R C, et al. 2020. A multiscale dynamical model in a dry-mass coordinate for weather and climate modeling: moist dynamics and its coupling to physics [J]. *Monthly Weather Review*,148(7):2671–2699. doi:10.1175/mwr-d-19-0305.1
- Zhang Y, Yu R C, Li J, et al. 2021. AMIP simulations of a global model for unified weather-climate forecast: understanding precipitation characteristics and sensitivity over East Asia [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,13(11):e2021MS002592. doi:10.1029/2021MS002592
- Zhang Y, Li X H, Liu Z, et al. 2022. Resolution sensitivity of the GRIST nonhydrostatic model from 120 to 5 km (3.75 km) during the DYAMOND winter [J]. *Earth and Space Science*,9(9):e2022EA002401. doi:10.1029/2022EA002401
- Zhang Y, Li J, Zhang H, et al. 2023. History and status of atmospheric dynamical core model development in China[M]. Cham: Springer International Publishing: 3–36
- Zhou Y H, Zhang Y, Li J, et al. 2020. Configuration and evaluation of a global unstructured mesh atmospheric model (GRIST-A20.9) based on the variable-resolution approach [J]. *Geoscientific Model Development*,13(12):6325–6348. doi:10.5194/gmd-13-6325-2020
- Zhou Y H, Yu R C, Zhang Y, et al. 2023. Dynamic and thermodynamic processes related to precipitation diurnal cycle simulated by GRIST [J]. *Climate Dynamics*,61(7–8):3935–3953. doi:10.1007/s00382-023-06779-7

(责任编辑 唐国瑛)