暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

甘肃“7·22”极端暴雨过程多模式检验评估与偏差分析

徐丽丽 傅朝 沙宏娥 周子涵 刘维成 黄武斌 谭丹 陈晓燕

Verification and bias analysis of multi-model forecast for the “7·22” extreme torrential rain in Gansu Province

XU Lili，FU Zhao，SHA Hong'e，ZHOU Zihan，LIU Weicheng，HUANG Wubin，TAN Dan，CHEN Xiaoyan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-190

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

四种数值模式对山东半岛两类暴雨天气预报的检验分析
Verification and analysis of four numerical models for forecasting rainstorm associated with two weather patterns in Shandong Peninsula
暴雨灾害. 2025, 44(5): 632-641 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-102

应用GRIST模式对“23·7”华北极端降水的模拟试验
Simulation experiment on "23·7" extreme precipitation in North China using the GRIST model
暴雨灾害. 2024, 43(3): 276-287 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-263

尺度分析降水检验方法在一次暴雨评估中的应用
Application of the scale analysis precipitation verification method in the evaluation of a heavy rainfall event
暴雨灾害. 2025, 44(4): 554-564 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-180

一种适用于评估降水预报服务能力的评分方法
An evaluation method suitable for precipitation forecasts and services
暴雨灾害. 2022, 41(6): 712-719 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-203

大理苍山洱海地区一次极端降水过程特征分析
Analysis of the characteristics of an extreme precipitation event in the Dali Cangshan-Erhai Lake region
暴雨灾害. 2026, 45(1): 36-46 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-156

中国南方极端降水的不同变化特征分析
Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China
暴雨灾害. 2025, 44(3): 390-399 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-204

关注微信公众号，获得更多资讯信息

徐丽丽,傅朝,沙宏娥,等.2026.甘肃“7·22”极端暴雨过程多模式检验评估与偏差分析[J].暴雨灾害,45(2):182−195. XU Lili, FU Zhao, SHA Hong'e, et al. 2026. Verification and bias analysis of multi-model forecast for the “7·22” extreme torrential rain in Gansu Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):182−195 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−190

甘肃“7·22”极端暴雨过程多模式检验评估与偏差分析

徐丽丽[1], 傅朝[1], 沙宏娥[1], 周子涵[1], 刘维成[2], 黄武斌[1], 谭丹[1], 陈晓燕[2]
(1. 兰州中心气象台, 兰州 730020; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020)

摘　要: 2024 年 7 月 22—24 日甘肃省河东地区发生了 1961 年以来最强区域性极端暴雨。本文利用地面自动气象站实况资料、ERA5 再分析资料, 对全球数值模式 ECMWF、CMA-GFS 和区域数值模式 CMA-SH9、CMA-MESO 的降水预报产品进行综合检验评估, 并对大尺度环流背景、中低层风场结构、水汽和不稳定条件进行了偏差分析。结果表明: (1) ECMWF、CMA-SH9、CMA-MESO 对降水极端性有一定体现, CMA-GFS 的降水量级和范围明显偏小。各模式的强降水落区均较实况偏东、偏北, 且对 22 日夜间至 23 日凌晨的强降水预报偏弱, 对 23 日白天的降水预报偏强。其中 CMA-SH9 的降水峰值时间与实况对应较好, 但量级同样偏小; (2) CMA-SH9、CMA-MESO 对 100 mm 以上强降水评分高于 ECMWF 和 CMA-GFS, 尤其是 CMA-SH9 模式对 22 日 08 时—23 日 08 时强降水的综合评分明显高于其他模式, 但两模式空报率均达 70% 以上; (3) 22 日夜间至 23 日凌晨的强降水时段, CMA-SH9 的 500 hPa 切变位置偏差最小, 并形成更大的正相对涡度, 且地面风场与实况也最为接近, 因此在该时段 CMA-SH9 的强降水综合评分最高; (4) 各模式在 500 hPa 脊区下游有偏强的低槽发展, 并且在偏东、偏北地区有 700 hPa 低涡和地面辐合的加强和稳定维持, 因此导致各模式 23 日白天强降水明显偏强且落区偏东、偏北。

关键词: 极端降水; 数值模式; 检验评估; 偏差分析
中图法分类号: P458　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−190

Verification and bias analysis of multi-model forecast for the “7·22” extreme torrential rain in Gansu Province

XU Lili[1], FU Zhao[1], SHA Hong'e[1], ZHOU Zihan[1], LIU Weicheng[2], HUANG Wubin[1], TAN Dan[1], CHEN Xiaoyan[2]

(1. *Lanzhou Central Meteorological Observatory*, *Lanzhou* 730020; 2. *Institute of Arid Meteorology of CMA*, *Lanzhou* 730020)

Abstract: The strongest regional rainstorm process since 1961 occurred in Hedong area of Gansu on July 22-24, 2024. The precipitation forecast performance of the global numerical model ECMWF, CMA-GFS, and regional numerical models CMA-SH9, CMA-MESO were evaluated by using the automatic weather station and ERA5 reanalysis datasets. And then the deviation analysis was conducted on the large-scale circulation background, the structure of the mid-to-low-level wind field, the moisture and instability conditions. The results are as follows. (1) The precipitation extremes of ECMWF, CMA-SH9, and CMA-MESO were better, while the magnitude and range of heavy precipitation in CMA-GFS were significantly smaller. The strong precipitation areas in each mode were biased towards the northeast compared to the actual situation. And the heavy rainfall forecast from the night of the 22nd to the early morning of the 23rd was significantly weaker, while the precipitation forecasts for the daytime of the 23rd are stronger. (2) The heavy precipitation scores of CMA-SH9 and CMA-MESO were higher than ECMWF and CMA-GFS, especially the score of CMA-SH9 for heavy precipitation from 08:00 BT 22nd to 08:00 BT 23rd was significantly higher than other models. But the false alarm rate of both models were over 70%. (3) During the heavy rainfall period from the night of the 22nd to the early morning of the 23rd, CMA-SH9 model had the smallest shear position deviation at 500 hPa and formed a larger positive relative vorticity, and the ground wind field was also closest to the actual

收稿日期: 2024−10−17; **定稿日期**: 2025−01−13
资助项目: 甘肃省青年科技基金项目 (24JRRA1180); 中国气象局气象能力提升联合研究专项 (23NLTSZ001); 甘肃省自然科学基金项目 (24JRRA1177, 24JRRA1182, 23JRRA1329, 22JR5RA749); 甘肃省气象局创新团队项目 (GSQXCXTD-2024-01); 国家自然科学基金项目 (42205083)
第一作者: 徐丽丽, 主要从事强对流天气预报及研究。E-mail: xulili_01@126.com
通信作者: 沙宏娥, 主要从事强对流天气预报及研究。E-mail: shahonge@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

situation. Therefore, CMA-SH9 had the highest comprehensive score for heavy precipitation during this period. (4) In the downstream of the 500 hPa ridge region, there was a stronger development of a trough, accompanied by stronger cold advection and relative vorticity in each model. And there was a strengthening and stable maintenance of the 700 hPa vortex and ground convergence in the northeast regions. Therefore the heavy rainfall during the day on the 23rd was significantly stronger and located towards northeast of the observation.
Key words: extreme precipitation; numerical model; verification; deviation analysis

引　言

我国西北地区是全球最主要的干旱半干旱区之一, 极端降水事件虽然频数较少, 但其强度大且局地性强, 容易引发山洪、滑坡等自然灾害。近 20 a 西北地区降水量呈增加趋势, 而且主要是由极端和短时对流性降水的增加造成 (Zhang et al., 2019; Lu et al., 2021), 极端降水的增加对区域防灾减灾提出了新挑战。2024 年 7 月 22—24 日甘肃省河东地区出现极端暴雨, 多站降水量超历史极值, 基于持续日数、影响范围和平均强度等综合评估为特强等级, 为甘肃省 1961 年以来最强区域性暴雨过程, 强降水造成流域内洪涝、中小河流洪水等地质灾害; 并且此次过程降水分布极为不均, 具有较强的极端性, 然而目前对于此类极端强降水过程的降水强度和落区预报难度较大, 主观和客观预报准确率均较低。

近年来, 数值天气预报模式发展迅速, 预报性能稳步提高, 对模式的检验评估及偏差溯源有利于增强对模式预报性能理解, 以更好地实现业务应用。目前针对多模式的降水检验评估已有许多研究成果, 有研究表明 ECMWF 模式的降水预报技巧较其他同类模式高 (Fu et al., 2013; He et al., 2019; 周胜男等, 2024), ECMWF模式对小到大雨多空报, 但雨带走向和落区预报好于区域模式 (屠妮妮等, 2022), 区域模式对暴雨、大暴雨的预报效果比 ECMWF 更好 (吕林宜等, 2019; 栗晗等, 2022; 徐同等, 2022)。陈晓燕等 (2022) 使用 MODE 空间检验方法对甘肃 2020 年汛期降水预报的检验评估中得出, 全球模式中 ECMWF 的评分高于 CMA-GFS 和 NCEP-GFS, 区域模式中 CMA-MESO和 CMA-SH9 的评分相对较高, 其中 CMA-SH9 模式预报性能更稳定。

关于模式预报偏差的成因, 有研究指出地形作用导致数值模式在地形复杂地区的降水预报偏差更为显著 (肖玉华等, 2010; 熊秋芬, 2011; 胡嘉缨等, 2023), 而中尺度区域模式对中小尺度地形描述更精确, 在局部环流和地形强迫作用上区域模式更加准确可靠, 对山区降水、暴雨的预报效果较好, 因此对极端天气预报和降水精细化方面具有一定的潜在优势 (吕林宜等, 2019; 谢漪云和王建捷, 2021; 栗晗等, 2022)。但需要注意的是, 随着模式分辨率更加精细化, 区域中尺度模式在复杂地形区降水量偏大, 在背风坡易形成更多的强降水中心 (Colle and Mass, 2000; Prein et al., 2015)。此外对于不同降水类型的模式预报能力也不同, 曹萍萍等 (2018) 对四川盆地暖区型和斜压锋生型暴雨的检验分析中得出, 在高能暖区型暴雨和大暴雨量级的 ETS 评分中, 西南区域中尺度模式较 ECMWF 高, 而斜压锋生型中雨、大雨及暴雨为 ECMWF 更优。同时, 弱天气尺度强迫背景下的暖区暴雨预报准确性通常较低 (张晓美等, 2009; 谌芸等, 2019; Sun et al., 2019; 何丽华等, 2020), 这可能是由于模式在反映深厚湿对流过程及对流触发机制上存在困难 (俞小鼎, 2012)。

在模式检验评估中, 一方面可以随机选取大规模样本得到模式偏差普遍适用的一般性规律, 另一方面也可以选取个例进行研究, 针对特殊案例的复杂现象进行深入分析, 研究结果更具针对性, 可为同类天气过程的模式产品释用提供依据。例如, 栗晗等 (2022) 对“21·7”河南极端暴雨的模式检验评估中得出, 各模式对于低空急流及水汽辐合强度和位置的预报是影响此次降水预报的关键因素。张芳等 (2022) 对四川盆地一次极端大暴雨的预报偏差分析中得出, ECMWF 模式对盆地内对流层低层风场结构以及盆地周边复杂地形刻画的偏差, 可能是导致对流性强降水预报明显偏弱的重要原因。2024 年 7 月 22—24 日发生在甘肃省河东地区的区域性暴雨天气过程, 12 个国家和区域站过程累计降水量超过 300 mm, 最大累计降水量达到 367.7 mm, 极端性强、影响大, 有必要采用客观检验方法, 对数值模式的预报结果进行定量化评估, 探讨模式对极端降水的预报偏差及原因, 以此提高极端暴雨的预报准确率, 深化对降水极端性的理解和认识, 为模式产品释用提供参考。本文选取目前常用的数值模式进行检验评估, 并从暴雨形成机制上分析模式偏差, 以期为西北地区极端暴雨天气预报提供科学参考。

1　资料与方法

1.1　资料来源

本文所使用的资料包括: (1) 预报资料: 全球模式 ECMWF、CMA-GFS 和区域模式 CMA-SH9、CMA-MESO 产品, 空间分辨率分别为 0.125°×0.125°、25 km、9 km、3 km, 基于天气预报业务中可利用的最临近时

次预报结果, 对 2024 年 7 月 21 日 20 时 (北京时, 下同) 起报的模式预报结果进行检验评估; (2) 观测资料: 甘肃省气象信息与技术装备保障中心质控后的 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 08 时国家和区域气象观测站 (以下简称为国家和区域站) 逐小时数据, 使用的要素为降水、风向和风速; (3) ERA5 再分析资料: 来源于欧洲中期预报中心, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 h, 使用的物理量主要包括对流有效位能 (CAPE)、500 hPa 和 700 hPa 位势高度、风场、比湿。

其中, 地面实况观测数据和 ERA5 再分析资料用于模式降水检验及偏差分析。为验证 ERA5 再分析数据的适用性, 选取甘肃省气象信息与技术装备保障中心质控后的 2024 年 7 月 22—24 日西北地区东部 27 个探空站观测数据与 ERA5 进行对比, 两类数据 500 hPa 和 700 hPa 各物理量的相关系数为 0.61~0.97 (通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验), 风向和风速的平均绝对误差分别为 46°和 1.4 $m\cdot s^{-1}$, 位势高度为 0.5 dagpm, 比湿为 0.7 $g\cdot kg^{-1}$, 温度为 0.56 ℃, 因此 ERA5 再分析数据在对流层中低层总体上是可信的。

1.2 研究方法

模式检验选取常规评估指标, 包括 TS (记为 T_S) 评分、空报率 (FAR, 记为 R_{FA})、漏报率 (MAR, 记为 R_{MA})、命中率 (POD, 记为 P_{OD}) 和 Bias (记为 B_{ias}) 评分, 计算公式如下

$$T_S=\frac{N_A}{N_A+N_B+N_C}\times 100\% \tag{1}$$

$$R_{FA}=\frac{N_B}{N_A+N_B}\times 100\% \tag{2}$$

$$R_{MA}=\frac{N_C}{N_A+N_C}\times 100\% \tag{3}$$

$$P_{OD}=\frac{N_A}{N_A+N_C}\times 100\% \tag{4}$$

$$B_{ias}=\frac{N_A+N_B}{N_A+N_C}\times 100\% \tag{5}$$

其中, N_A 表示预报准确的, 即预报命中数; N_B 表示预报出现降水而实况未出现的空报数; N_C 表示未预报而实况出现降水的漏报数。

此外, 为评估预报的空间偏差特征, 计算预报场和观测场面积比值、几何中心偏差距离。

2 模式降水综合检验评估

2.1 空间及强度偏差特征

7 月 22 日 08 时—24 日 08 时, 甘肃省共计 301 个测站 (包含国家站和区域站) 48 h 降水量达 100 mm 以上 (图 1a), 强降水区呈东北—西南向带状分布 (图 2a), 最大累积降水量出现在平凉市崇信县新窑林场站, 为 351.4 mm。CMA-MESO、ECMWF、CMA-SH9 模式在西北地区东部的 48 h 降水量极值均达 300 mm 以上, 分别为 374.8 mm、314.3 mm、300.1 mm, CMA-GFS 的极值明显偏低为 110.7 mm (图 3c), 同时由于降水分布极为不均, 西北地区东部 48 h 降水量观测值的箱线图 (图 3c) 显示数据离散度较大, 其中 CMA-SH9、CMA-MESO 数据离散程度与实况相近, ECMWF 略小, 而 CMA-GFS 的数据分布较为集中。分析 100 mm 以上强降水落区形态及位置可知 (图 2a、3a), CMA-SH9 呈现出东北—西南向的分布特征, 其落区几何中心位于实况的东北象限, 偏差距离为 115 km (图 3a), 其他模式呈东—西向分布特征, 较实况更加偏东、偏北, 以 CMA-GFS 的强降水落区偏离最大为 245 km (图 3a); 此外计算模式和实况的强降水面积比值可得出, CMA-SH9、CMA-MESO 的比值分别为 1.3 和 1.4, 即强降水面积大于实况, 而 ECMWF 和 CMA-GFS 比值分别为 0.7 和 0.1, 以 CMA-GFS 的强降水面积偏差最大 (图 3a)。250 mm 以上强降水落区表现出相同的偏差特征 (图 2d、3b), 即 CMA-SH9、ECMWF、CMA-MESO 的几何中心位于实况的东北象限, CMA-SH9 偏差距离最小为 120 km, ECMWF、CMA-MESO 两者均为 200 km 左右 (图 2d、3b)。此外, CMA-GFS 降水极值虽然偏小, 但是其 50 mm 以上落区呈东北—西南向分布 (图 1c), 与实况强降水落区的分布特征较为一致。

22 日 08 时—23 日 08 时 24 h 降水量的大暴雨落区主要位于定西市东部至平凉市东部, 呈东—西向带状分布 (图 1f), 其中定西市通渭县有 3 站达特大暴雨, 最大降水量出现在定西市通渭县陇阳车岔站, 为 297.7 mm。仅区域模式 CMA-SH9、CMA-MESO 在西北地区东部的降水量极值达到了大暴雨, 分别为 171.3 mm 和 190.9 mm, 而 ECMWF 和 CMA-GFS 的极值均小于 100 mm。从模式结果的分布特征及离散度 (图 3d) 来看, CMA-MESO 的极值最大且中位数最小, 可见 CMA-MESO 降水量分布最为不均、离散度较大, 而 CMA-SH9 的平均值以及各分位数与实况偏差最小。分析 100 mm 以上强降水的落区位置及形态 (图 2b、3a), CMA-SH9 为东—西两个强降水中心, 质心较实况偏西约 130 km, 面积比为 0.94, 而 CMA-MESO 强降水落区偏差较大, 较实况偏东偏北, 偏离约 140 km, 面积比为 0.67, 相较而言 CMA-SH9 的大暴雨落区位置和形态与实况最为接近。

23 日 08 时—24 日 08 时强降水向东南方向发

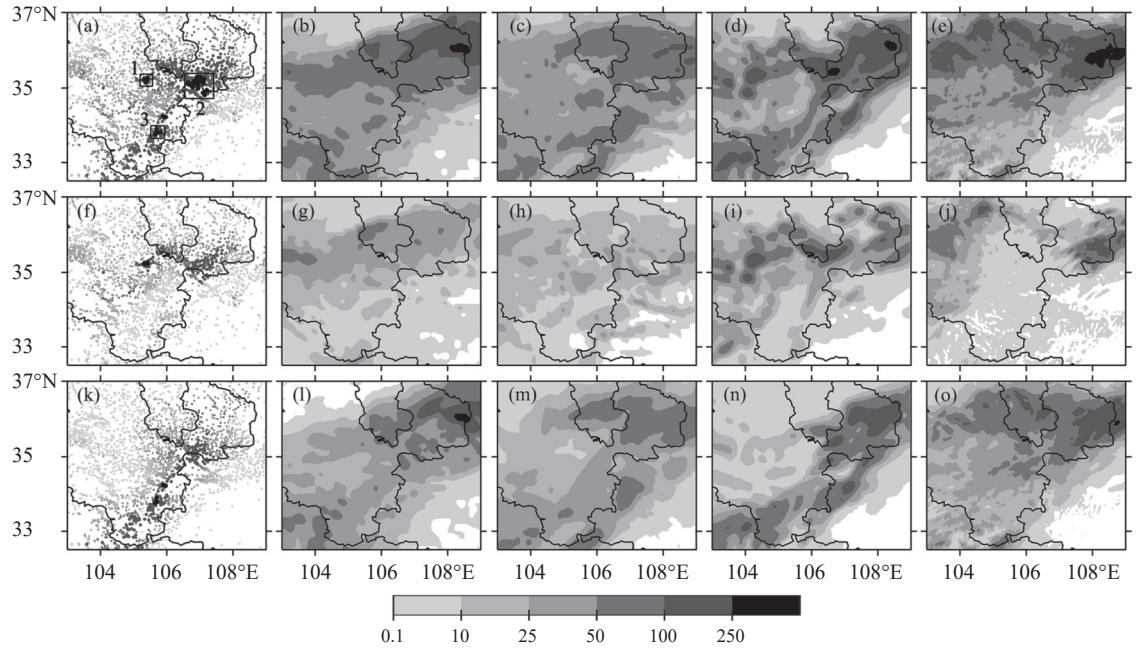


图 1 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 08 时 (a—e), 22 日 08 时—23 日 08 时 (f—j)、23 日 08 时—24 日 08 时 (k—o) 的实况降水量 (a、f、k) 和 ECMWF (b、g、l), CMA-GFS (c、h、m), CMA-SH9 (d、i、n), CMA-MESO (e、j、o) 模式预报降水量 (单位: mm) 的空间分布 (图 a 中方框 1、2、3 分别代表位于定西市东部、平凉市东部、陇南市北部的强降水中心)

Fig. 1 Spatial distribution of (a, f, k) observed and forecast precipitation (unit: mm) of (b, g, l) ECMWF, (c, h, m) CMA-GFS, (d, i, n) CMA-SH9 and (e, j, o) CMA-MESO models for the periods (a-e) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 24, (f-j) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 and (k-o) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2024 (The rectangles 1, 2 and 3 represent the heavy precipitation centers located in the eastern part of Dingxi City, the eastern part of Pingliang City, and the northern part of Longnan City in the Fig. 1a)

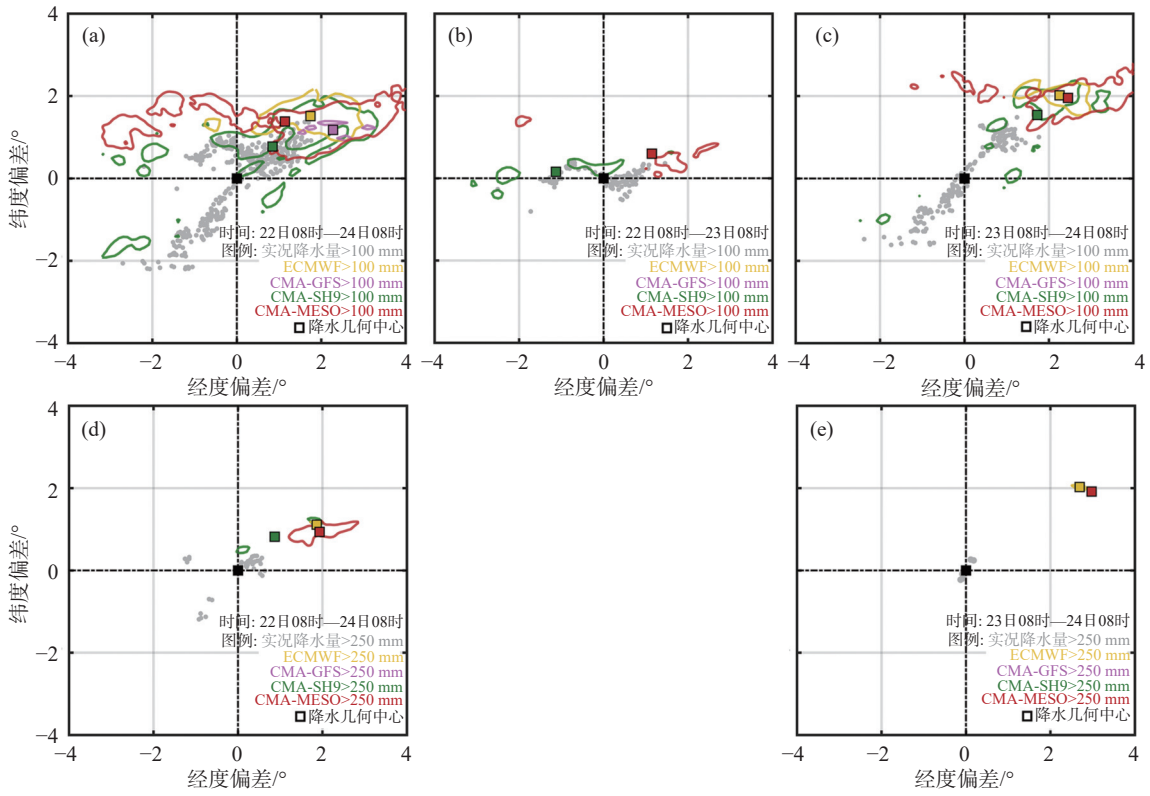


图 2 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 08 时 (a、d), 22 日 08 时—23 日 08 时 (b)、23 日 08 时—24 日 08 时 (c、e) 各模式与实况≥100 mm (a—c)、≥250 mm (d、e) 降水区域的相对位置偏差

Fig. 2 Relative positional deviations of (a-c)≥100 mm and (d, e) ≥250 mm precipitation areas between models and observations for the periods (a, d) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 24, (b) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 and (c, e) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2024

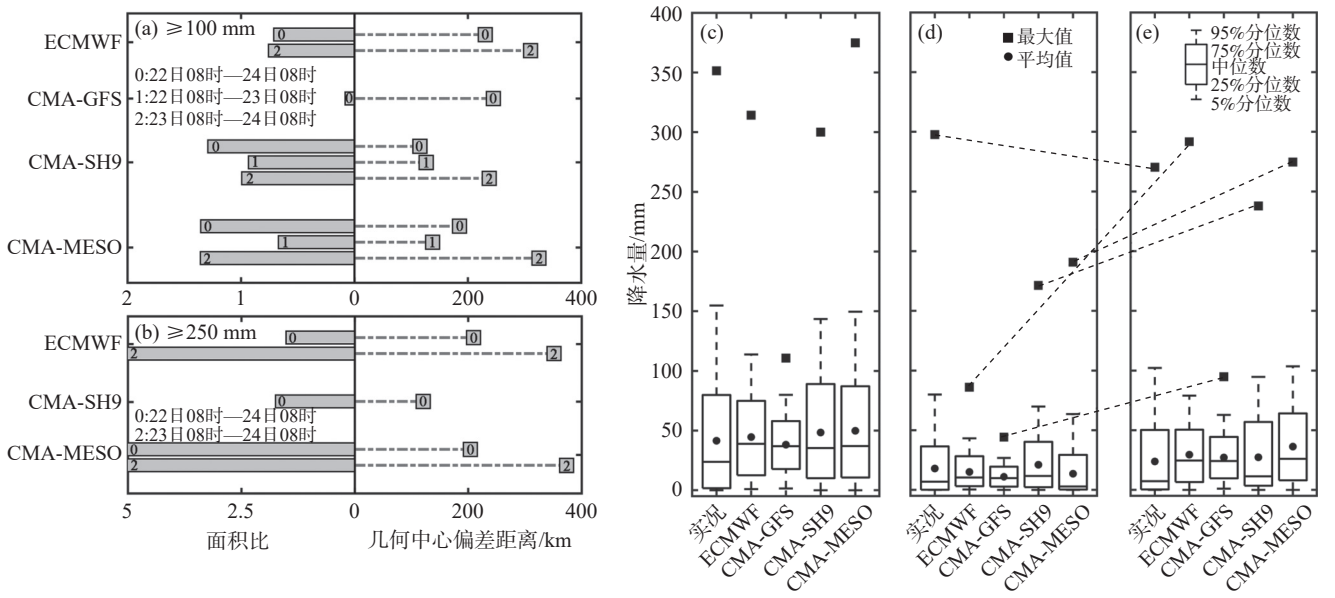


图 3 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 08 时 (a—c), 22 日 08 时—23 日 08 时 (a、b、d)、23 日 08 时—24 日 08 时 (a、b、e) 各模式与实况≥100 mm (a)、≥250 mm (b) 降水区域面积比和几何中心偏差距离 (a、b); 模式与实况降水量箱线图 (c—e)

Fig. 3 (a, b) Area ratio and geometric center deviation distance of (a) ≥100 mm and (b)≥250 mm precipitation areas between models and observations for the periods (a-c) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 24, (a, b, d) 08:00 BT 22 to 08:00 BT 23 and (a, b, e) 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 July 2024. (c-e) Box plots of precipitation from models and observations

展, 暴雨区呈东北—西南向带状分布, 其中天水南部至陇南北部出现 5 站特大暴雨, 最大降水量出现在天水市秦州区长河站为 270.3 mm, 强降水极值较前一日降低, 但暴雨范围明显扩大 (图 1k, 图 3d、e)。ECMWF、CMA-MESO 在西北地区东部的降水量级达到了特大暴雨, 极值分别为 291.7 mm 和 274.7 mm, CMA-SH9 的极值略低为 237.9 mm, CMA-GFS 为 94.9 mm (图 3e)。各模式均表现出强降水范围明显扩大, 且降水极值较前一日增大, 尤其以 ECMWF 最明显, 极值由 86.0 mm 增长为 291.7 mm (图 3d、e)。对于 100 mm 以上强降水的落区位置及形态 (图 2c、图 3a), 各模式强降水中心都表现为向东北方向发展, 偏离距离进一步增大 (图 3a), CMA-SH9、ECMWF、CMA-MESO 强降水的落区均较实况偏东偏北, 其中 CMA-SH9 偏离距离最小为 238 km, 而 ECMWF 和 CMA-MESO 偏离距离更大, 分别为 310 km 和 325 km。对于特大暴雨 (图 3b), ECMWF 和 CMA-MESO 的特大暴雨区的中心位置均偏离实况达 350 km 以上, 面积比大于 5, 较实况偏差较大。

综上, ECMWF、CMA-SH9、CMA-MESO 的 48 h 降水量极值达 300 mm 以上, 对此次过程的极端性有一定体现, CMA-GFS 的强降水量级和范围明显偏小, 但其暴雨落区与实况强降水落区的形态特征较为一致。各模式的强降水落区均较实况偏东、偏北, 尤其是 23 日强降水较 22 日偏差更大, 落区位置更加偏东、偏北。各模式中 CMA-SH9 偏差距离最小, ECMWF 和 CMA-MESO 偏差距离较大。

2.2 时间偏差特征

选取强降水中心定西市东部、平凉市东部、陇南市北部 (图 1a 中的 1、2、3 区域), 比较模式与实况降水的时间变化差异。定西市东部 (图 4a、b) 主要降水时段为 22 日 20 时—23 日 08 时, 该区域呈现强降水范围集中、局地性强、夜雨等特征。ECMWF、CMA-GFS 对 22 日夜间降水的预报量级明显偏小, 同时 ECMWF 在 23 日白天降水量明显增强且较实况偏大, CMA-GFS 的降水量随时间变化不大, 量级整体偏小 (图 4a)。CMA-SH9 能够预报出夜间降水增强的演变趋势, 降水峰值时间与实况对应相对较好, 但预报降水量级同样偏小。CMA-MESO 对 22 日夜间的降水预报显著偏弱, 其降水峰值时间为 23 日 20 时, 与实况的偏差较大。

平凉市东部 (图 4c、d) 是累积降水量最大的区域, 主要降水时段是 22 日 23 时—23 日 20 时, 同样为 22 日夜间降水大于 23 日白天, 强降水持续时间较长。各模式同样对 22 日夜间降水预报偏弱, 23 日白天降水偏强, 且 ECMWF、CMA-GFS 的 22 日夜间降水开始及峰值时间均较实况偏早 (图 4c)。

陇南市北部 (图 4e、f) 的累积降水量低于上述两个区域, 降水开始时间较晚, 主要降水时段是 23 日 08 时—24 日 08 时, CMA-SH9 预报的 23 日降水峰值时

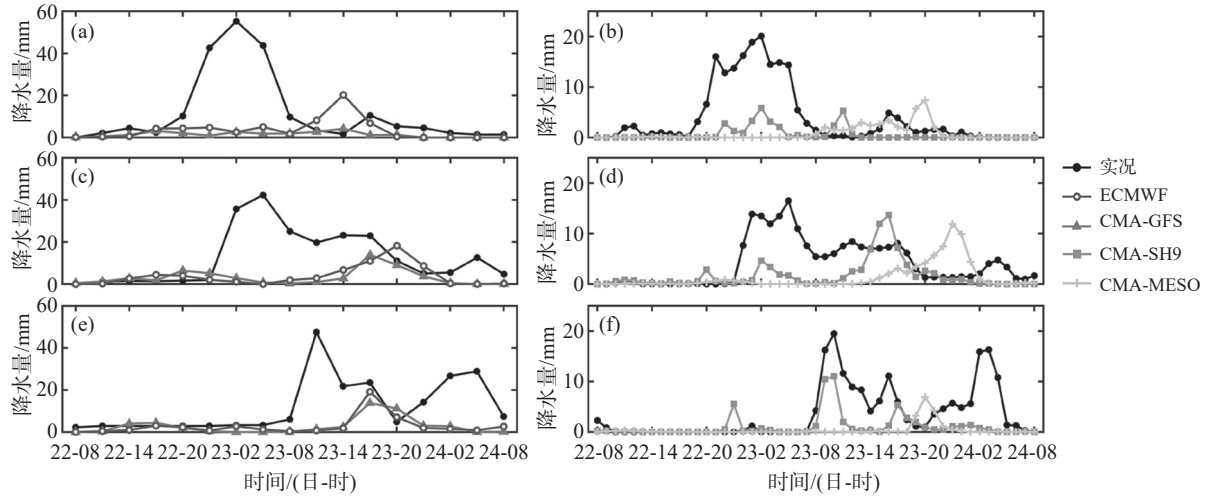


图 4 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 08 时图 1a 方框对应的定西市东部 (a、b)、平凉市东部 (c、d)、陇南市北部 (e、f) 各模式与实况区域平均降水量的时间变化

Fig. 4 Temporal variations of area-mean precipitation between models and observations averaged in (a, b) the eastern part of Dingxi City, (c, d) the eastern part of Pingliang City, and (e, f) the northern part of Longnan City from 08:00 BT 22 to 08:00 BT 24 July 2024

间与实况对应较好, 但对 24 日凌晨降水预报明显偏小。其他模式的降水时间变化特征与实况偏差较大。

2.3 分级降水量评分

对各模式 22 日 08 时—24 日 08 时的 48 h、24 h 降水量进行分级评分。48 h 降水量的评分中 (图 5a), [0.1, 50) mm 和[50, 100) mm 的 TS 评分均为 ECMWF 最高, CMA-SH9 和 CMA-GFS 次之, CMA-MESO 最低。其中 CMA-GFS 的[0.1, 50) mm Bias 评分为 1.02, 而其他模式均小于 0.9, 即漏报多于空报; [50~100) mm 的 Bias 评分各模式均大于 1.5, 尤其 ECMWF 为 2.07, 即空报显著大于漏报。对于[100, 250) mm, CMA-SH9 的 TS 评分最高为 0.173, 命中率达 28.9%, CMA-MESO 的 TS 评分为 0.075, 命中率为 15.2%, Bias 评分都大于 1, 即空报显著大于漏报, 空报率达 70% 以上; ECMWF 和 CMA-GFS 的 TS 评分最低, ECMWF 命中率为 1.4%, CMA-GFS 命中率为 0。

22 日 08 时—23 日 08 时的 24 h 降水量检验中 (图 5b), 暴雨以下量级[0.1, 50) mm 的 TS 评分 CMA-GFS 最高为 0.902, ECMWF 次之, CMA-MESO 最低为 0.824; 暴雨[50, 100) mm 和大暴雨[100, 250) mm 的 TS 评分 CMA-SH9 均为最高, 其他模式均低于 0.05。23 日 08 时—24 日 08 时的 24h 降水量检验中 (图 5b), 各模式[0.1, 50) mm 的 TS 评分较前一日降低, ECMWF 最高为 0.797, CMA-GFS 次之, CMA-MESO 仍为最低, 为 0.670; 各模式[50, 100) mm 的 TS 评分较前一日提高, 尤其以 ECMWF、CMA-GFS、

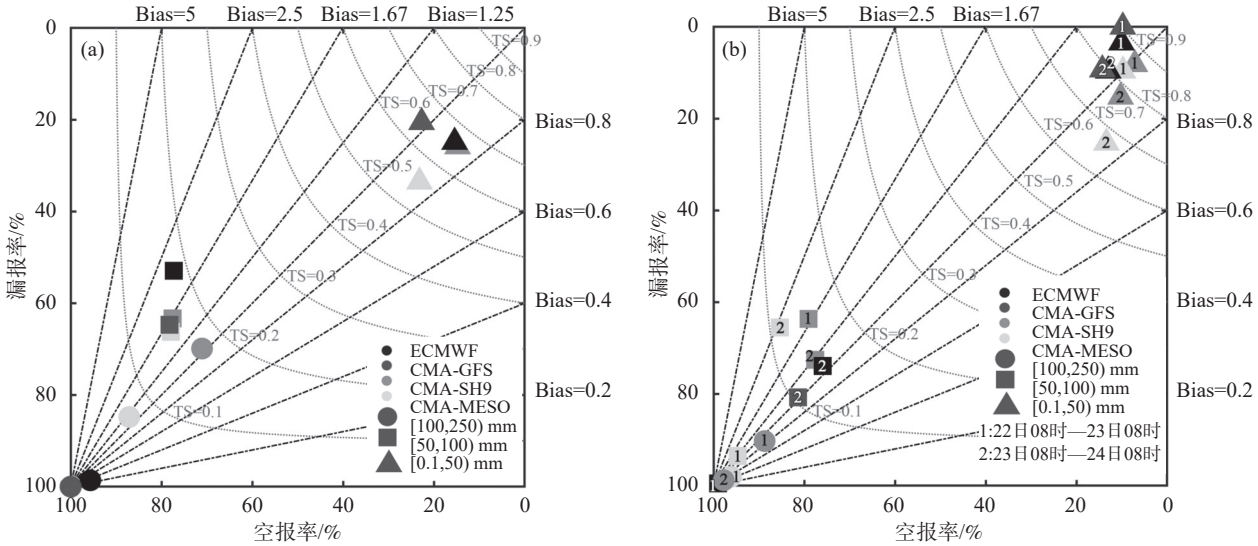


图 5 ECMWF、CMA-GFS、CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式 48 h (a)、24 h (b) 降水量综合评分图

Fig. 5 Comprehensive score chart of (a) 48 h and (b) 24 h precipitation of ECMWF, CMA-GFS, CMA-SH9 and CMA-MESO models

CMA-MESO 提高最为明显，但仍以 CMA-SH9 评分最高。各模式[100, 250) mm 的 TS 评分均较低。

3 模式预报偏差成因分析

3.1 大尺度环流背景的偏差

极端强降水是由中尺度天气系统直接导致，但其发展消亡的物理过程受到天气尺度系统的制约，天气尺度系统不仅可以造成系统性抬升运动，其发展演变也可以改变局地热力不稳定度和水汽输送条件。西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 是影响此次极端暴雨天气过程的主要天气尺度系统，甘肃东部在其外围源源不断的暖湿气流影响下形成了高能、高湿的环境条件，为极端暴雨的产生提供了有利条件。7 月 23 日 02 时 ERA5 再分析资料显示，500 hPa 588 dagpm 线最北至 35°N 附近，西脊点位于 105°E (图 6a)，甘肃省东南部受西南气流影响，有较强的暖平流 (图 7a)，同时青海北部至甘肃西部有高压脊，对应风场有反气旋环流，脊前偏北气流与副高外围西南气流在甘肃东部至陕西北部一带形成切变 (图 7a)，在 22 日夜间切变逐渐加强且向东南方向缓慢移动 (图 7a、f)；23 日 08 时，在弱脊的上游有西风带低槽东移至甘肃西部，高压脊向东移动，并且 588 dagpm 线东退 (图 6b)；23 日 20 时低槽缓慢东移至甘肃西部至内蒙古西部，其以东地区仍受高压脊影响 (图 6d)，槽后冷平流主要影响甘肃西部，冷空气强度较弱对东部影响较小 (图 7p)。23 日夜间至 24 日白天随着低槽逐渐东移，甘肃大部转为偏北风，北方冷空气南下过程中雨带随之向甘肃东南部移动，雨强较前期减弱。

22 日夜间至 23 日白天，甘肃东部维持“两高”之间切变，甘肃东南部为 (4.0~16.0)×10^{-5} s^{-1} 的正相对涡度区域 (图 7a、f、k、p)，正相对涡度区域的气旋式环流伴随有垂直上升运动 (朱乾根等, 2007)，为降水提供了有利的动力条件，正相对涡度区域对地面强降水区有较好的指示 (图 1a)，同时平凉市东部的相对涡度最大，达 16.0×10^{-5} s^{-1} 以上 (图 7 f)，对应该地区不仅累积降水量最大，而且强降水范围以及持续时间也大于其他区域 (图 7f、图 4b)。

从模式预报来看，各模式对以上天气尺度系统的时空演变均有不同程度的偏差，尤其对高压脊的

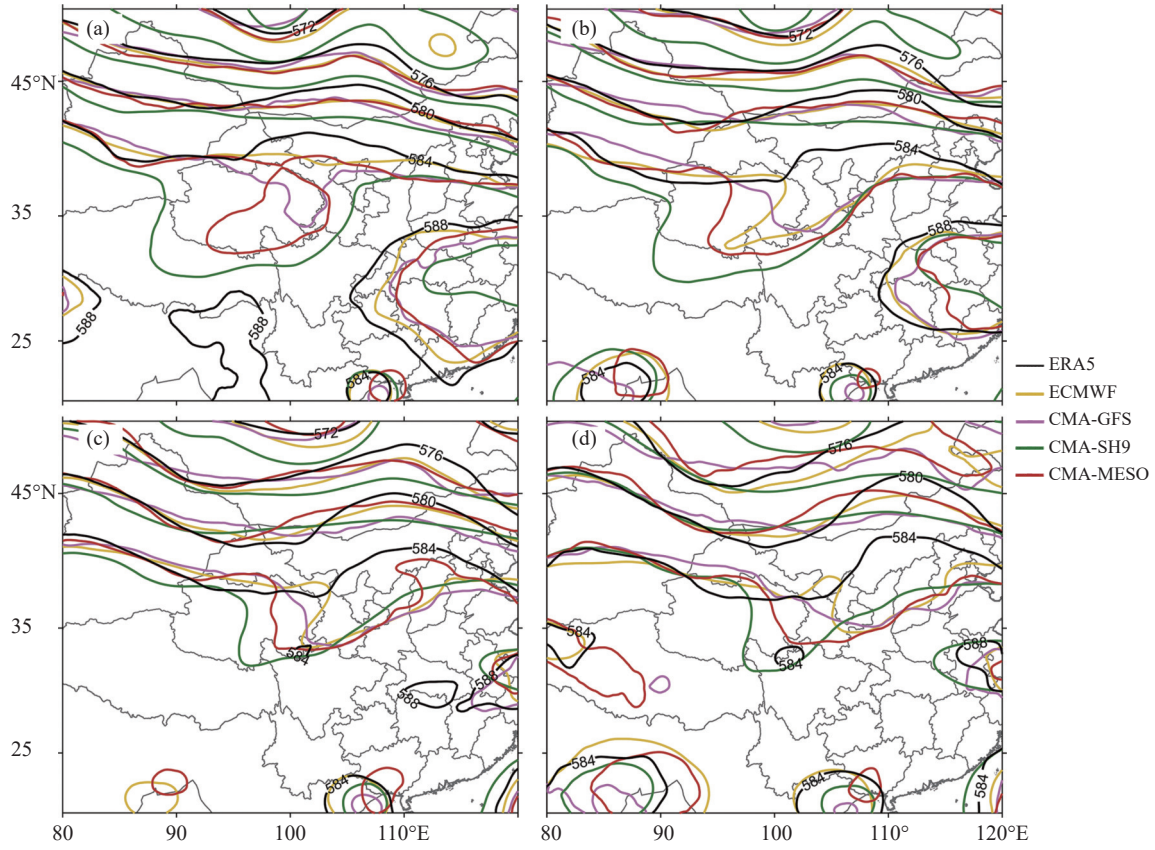


图 6 2024 年 7 月 23 日 02 时 (a)、08 时 (b)、14 时 (c)、20 时 (d) 基于 ERA5 再分析数据和 ECMWF、CMA-GFS、CMA-SH9、CMA-MESO 模式的 500 hPa 位势高度 (单位: dagpm)

Fig. 6 Geopotential height (unit: dagpm) at 500 hPa of ERA5 reanalysis, ECMWF, CMA-GFS, CMA-SH9 and CMA-MESO models at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT, (c) 14:00 BT, (d) 20:00 BT on 23 July 2024

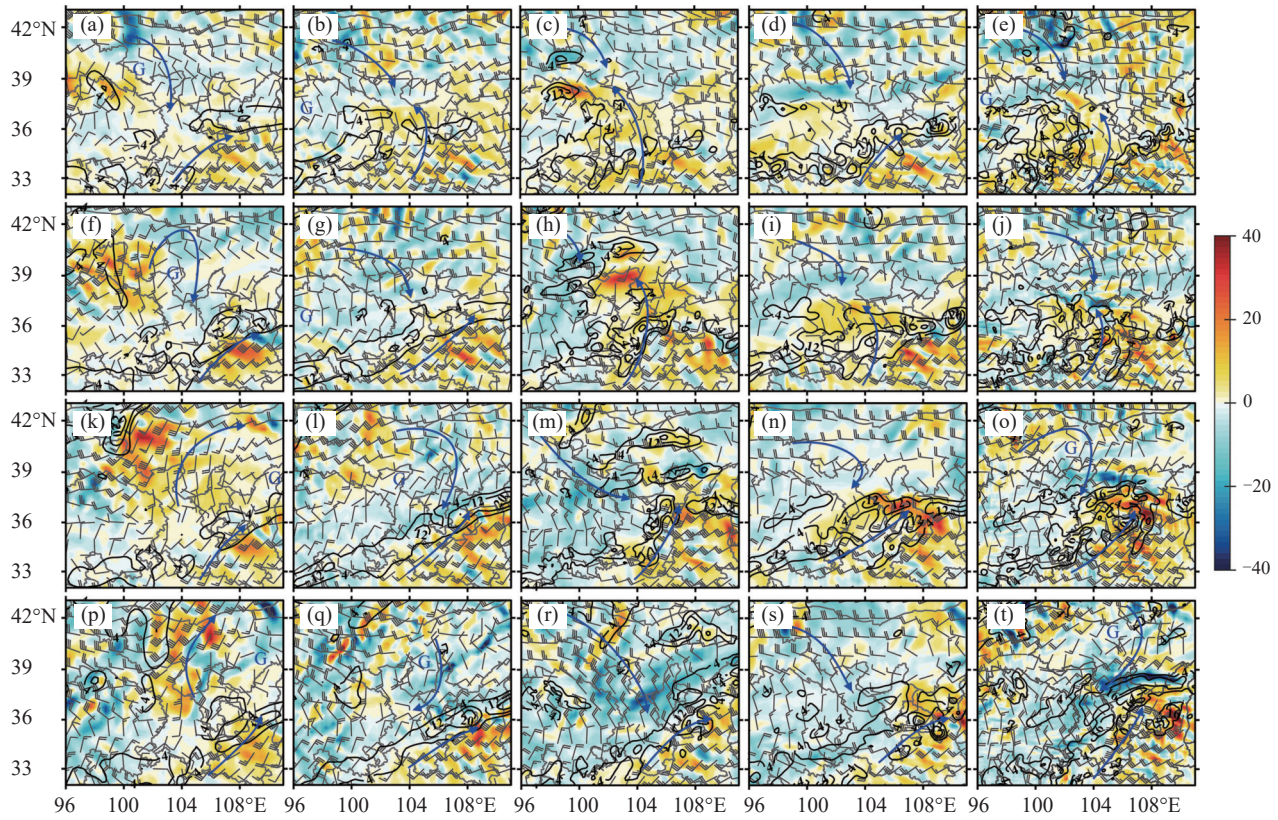


图 7 2024 年 7 月 23 日 02 时 (a—e)、08 时 (f—j)、14 时 (k—o)、20 时 (p—t) 基于 ERA5 再分析数据 (a、f、k、p) 和 ECMWF (b、g、l、q), CMA-GFS (c、h、m、r), CMA-SH9 (d、i、n、s), CMA-MESO (e、j、o、t) 模式的 500 hPa 风场 (风向杆)、温度平流 (填色, 单位: 10^{-5} K·s^{-1})、相对涡度 (等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 的空间分布 (蓝色箭头代表显著流线, G 代表高压中心)

Fig. 7 Spatial distribution of wind (wind-directing posts), temperature advection (color-filled, unit: 10^{-5} K·s^{-1}), relative vorticity (contour lines, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 500 hPa based on (a, f, k, p) ERA5 reanalysis, (b, g, l, q) ECMWF, (c, h, m, r) CMA-GFS, (d, i, n, s) CMA-SH9, (e, j, o, t) CMA-MESO models at (a-e) 02:00 BT, (f-j) 08:00 BT, (k-o) 14:00 BT, and (p-t) 20:00 BT on 23 July 2024 (The blue arrow represents significant streamline, and the G represents high-pressure center)

预报有不同程度的偏弱 (图 6), 以及 500 hPa 切变强度和位置有较大偏差 (图 7)。22 日夜间至 23 日白天, ERA5 再分析资料显示低槽和高压脊缓慢东移 (图 6b、c), 风场上有反气旋环流自甘肃西部向陕西北部移动, 甘肃东部受“两高”切变的影响 (图 7a、f、k、p)。ECMWF 预报的 500 hPa 环流形势与 ERA5 较为相似, 无论是从高度场还是风场均可见高压脊及其反气旋环流在青海高原上发展并向东移动 (图 6, 图 7b、g、l、q), 但其时空演变有一定偏差。从时间偏差上看, 22 日夜间 ECMWF 预报高压脊及其反气旋环流的主体仍位于青海高原, 在 23 日白天才呈现出东移的趋势, 且相对涡度在 22 日夜间偏小, 23 日白天明显增强 (图 7b、g、l、q), 然而 ERA5 数据显示在 22 日夜间已呈现反气旋环流向甘肃西部发展的趋势, 并且 ERA5 的 500 hPa 切变和相对涡度在 22 日夜间最强, 23 日白天随着高压脊移出而逐渐减弱 (图 7a、f、k、p)。从空间偏差上看, ECMWF 在脊区下游 (即甘肃东部至陕西北部) 有较强的低槽发展, 加之 ECMWF 高压脊东移时间的预报偏差, 在西北地区东部 ECMWF 的槽脊形势与 ERA5 正好呈现反位相的特征 (图 6b—d)。ECMWF 在甘肃东部至陕西北部表现为偏强的偏北风, 并伴有较强的冷平流, 同时低槽区的正相对涡度更强, 强度达 (16.0~20.0)×10^{-5} s^{-1}, 较 ERA5 位置偏东且明显偏强 (图 7l、q)。以上 ECMWF 500 hPa 环流形势的时空偏差导致了对 22 日夜间降水预报偏弱, 23 日降水明显增强 (图 4), 且强降水区域主要位于甘肃东部至陕西北部, 较实况强降水落区的位置偏东、偏北 (图 1b、l)。

CMA-GFS、CMA-SH9 和 CMA-MESO 预报的环流形势偏差较 ECMWF 更大。CMA-GFS 表现为对高压脊预报明显偏弱, 西风带短波槽快速东移南下 (图 6), 对应风场上看 22 日夜间脊前偏北风偏弱, 而西南暖湿气流明显较强, 切变位置偏北, 且相对涡度偏小 (图 7c、h), 23 日白天槽后西北气流迅速南压, 与西南暖湿气流形成明显冷暖交汇 (图 7m、r), 因此 CMA-GFS 预报的 23 日降水强度及范围较 22 日夜间明显增强。CMA-SH9 和 CMA-MESO 在 22 日夜

间至 23 日白天均有高压脊位于青海西部至中部(图 6), 脊前偏北气流与西南气流形成切变, 但不同的是 22 日夜间 CMA-SH9 对切变位置的预报偏差最小, 且在甘肃东部有更大的正相对涡度 (图 7d), 因此其预报的 22 日夜间降水明显增强, 且强降水综合评分最高 (图 2b、图 5); 而 CMA-MESO 对偏南风预报偏强, 切变位置偏差较大, 导致其 22 日夜间强降水落区偏东、偏北 (图 2b)。23 日白天, CMA-SH9 预报的反气旋环流仍位于青海高原, 未表现出明显东移特征, 而 CMA-MESO 预报的反气旋环流东移, 但两者均在脊区下游有经向度更大的低槽 (图 6b、c), 较 ERA5 表现出更强的偏北风, 并且在甘肃东部至陕西北部维持显著的气旋式切变, 对应有正相对涡度大值区为 (16.0~20.0)×10^{-5} s^{-1} (图 7n、o、s、t), 因此造成 CMA-SH9 和 CMA-MESO 的 23 日降水强度及范围较 22 日夜间增强 (图 4), 且特大暴雨区主要位于甘肃东部至陕西北部, 较实况偏东偏北 (图 1n、o)。

3.2 中低层风场的偏差

中低层风场的演变与中小尺度对流系统的触发和维持直接相关 (杨丽杰等, 2024), ERA5 再分析资料显示强降水期间 700 hPa 有低涡及切变位于甘肃东部, 四川北部至甘肃东南部有低空急流发展, 且急流轴中多风速脉动, 强降水区位于低涡的东南象限及西南低空急流的出口区 (图 8a、f、k、p), 低涡切变以及低空急流与对流性降水的形成和维持密切相关 (杨丽杰等, 2024)。

各模式对 700 hPa 低涡及其切变、西南低空急流的发展演变均有偏差。22 日 20 时甘肃东南部低空急流尚未建立, 但 ECMWF、CMA-GFS、CMA-SH9 预报已有低空急流位于甘肃东南部, 因此导致模式在强降水区域的降水开始时间较早 (图 4)。23 日 05 时 700 hPa 低涡东移至宁夏南部与甘肃东部交界一带 (图 8f), ECMWF、CMA-GFS、CMA-SH9 预报在宁夏南部至甘肃东部有 700 hPa 切变和西南低空急流发展, 但低涡的气旋结构均较 ERA5 松散且不完整 (图 8g、h、i), CMA-MESO 预报的切变位置偏差更大 (图 8j)。此外, CMA-SH9 与 CMA-MESO 在 700 hPa 切变附近 3 h 降水量达 50 mm 以上, 虽然位置有偏差, 但其降水量级对 22 日夜间强降水有一定指示意义。相较而言 ECMWF 和 CMA-GFS 预报降水量级

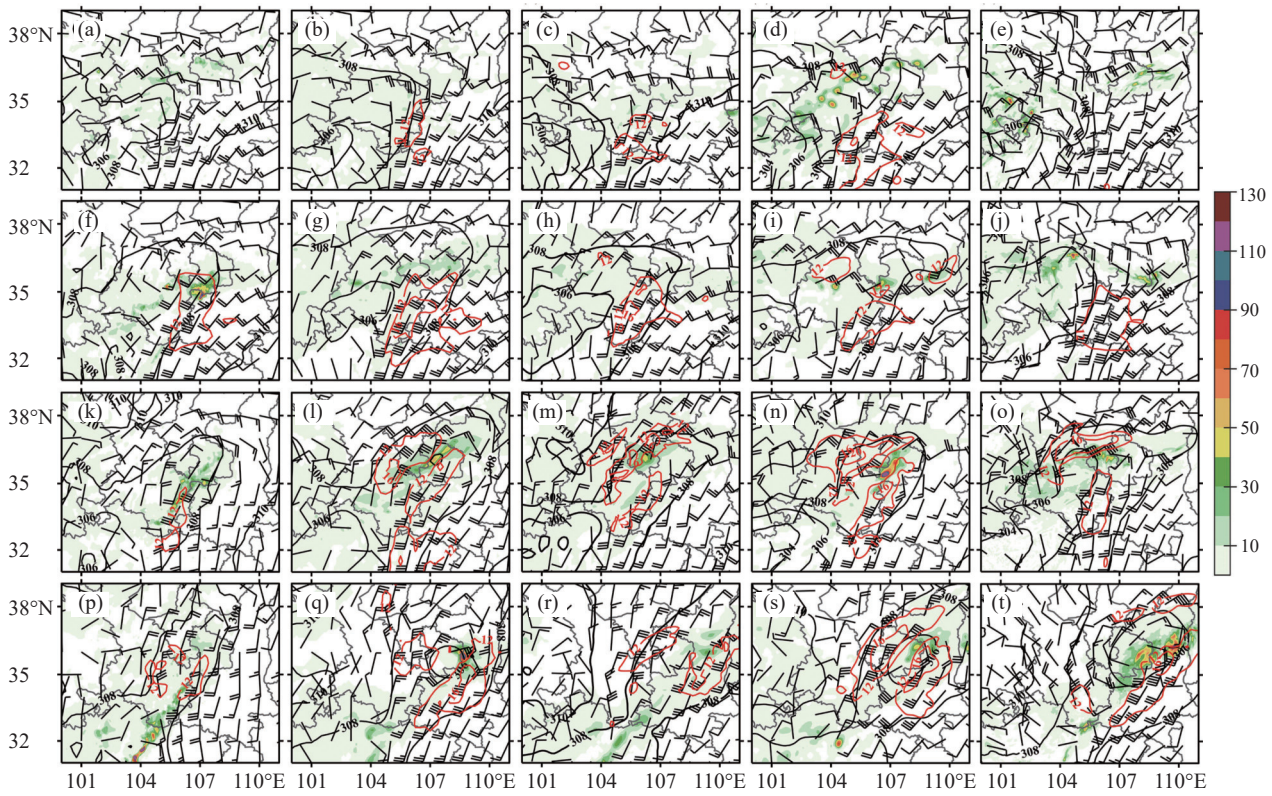


图 8 2024 年 7 月 22 日 20 时 (a—e)、23 日 05 时 (f—j)、23 日 14 时 (k—o)、24 日 02 时 (p—t) 基于 ERA5 再分析数据 (a、f、k、p) 和 ECMWF (b、g、l、q), CMA-GFS (c、h、m、r), CMA-SH9 (d、i、n、s), CMA-MESO (e、j、o、t) 模式的 700 hPa 位势高度 (黑色等值线, 单位: dagpm)、风场 (风向杆)、风速 (红色等值线, 单位: m·s^{-1}), 以及实况和模式 3 h 降水量 (填色, 单位: mm)

Fig. 8 Geopotential height (unit: dagpm), wind (wind-directing posts), wind speed (red contour, unit: m·s^{-1}) at 700 hPa based on (a, f, k, p) ERA5 reanalysis, (b, g, l, q) ECMWF, (c, h, m, r) CMA-GFS, (d, i, n, s) CMA-SH9, (e, j, o, t) CMA-MESO models, and 3 h precipitation (color-filled, unit: mm) of observations and models at (a-e) 20:00 BT 22, (f-j) 05:00 BT 23, (k-o) 14:00 BT 23, and (p-t) 02:00 BT 24 July 2024

明显偏小, 其原因在于 500 hPa 和 700 hPa 动力条件的配置, 由 3.1 节分析可知 22 日夜间至 23 日凌晨, ECMWF 和 CMA-GFS 对甘肃东部的切变和相对涡度均预报偏弱 (图 7a、b), 而 CMA-SH9 与 CMA-MESO 预报偏强 (图 7d、e), 后两者在正相对涡度大值区都对应有 700 hPa 低涡切变和低空急流的发展 (图 8i、j), 因此动力条件配置更为有利, 尤其是 CMA-SH9 在其低涡东南象限的急流出口区以及偏北风前侧的辐合区均预报有强降水, 正好对应有实况场东—西两个强降水中心 (图 8f、i), 在 22 日夜间强降水的 TS 评分中 CMA-SH9 最高。而 CMA-MESO 预报的 700 hPa 低涡及其切变的位置偏差在所有模式中最大, 对应有强降水落区也较实况明显偏北或偏东 (图 8j), 因此 CMA-MESO 的强降水评分较 CMA-SH9 低。

23 日 14 时, ERA5 再分析资料显示低涡位于宁夏南部至甘肃东部, 强降水出现在低涡东南象限及急流的左侧出口区 (图 8k), 23 日夜间低涡东移至甘肃东部至陕西北部, 强度明显减弱, 但西南低空急流仍位于甘肃东南部, 大部雨强转弱, 24 日 02 时西南低空急流轴上仍多风速脉动, 且偏北风明显加强, 在甘肃南部形成较强辐合, 造成了陇南市北部的强降水 (图 8p)。各模式对 23 日白天至 24 日凌晨的低涡发展演变有更大的偏差, 均在 700 hPa 低涡后侧有较强的北风发展, 与西南急流在宁夏南部至甘肃东部形成更为强烈的气流辐合, 其中 ECMWF、CMA-SH9、CMA-MESO 模式预报的 24 日 02 时 700 hPa 低涡强度依旧未减弱, 并且东移至甘肃东部并稳定维持, 模式强降水位于低涡东侧和急流左侧, 与 ERA5 的偏差进一步加大 (图 8k—o、p—t); CMA-GFS 对 23 日白天北风预报偏强, 强降水位于偏北风急流的前沿, 24 日凌晨 700 hPa 切变和降水区均偏东 (图 8m、r)。

在 700 hPa 低涡及低空急流发展过程中, 低涡东南侧和急流左侧有正涡度平流逐渐增强, 有利于地面辐合发展并维持, 对强降水的触发和维持提供了动力条件。基于国家和区域站数据分析得出, 23 日凌晨在定西市东部有偏北风与偏南风的辐合形成并维持 (图 9a、f), 正好对应该地区的强降水时段, 同时定西市东部的海拔高度为北高南低, 强降水多位于偏南风的迎风坡, 地形抬升作用也较为显著。23 日凌晨至 23 日白天, 在甘肃庆阳至陕西北部有高压发展并逐渐东移, 其辐散出的东北风或偏东风在六盘山东侧迎风坡即平凉市东部产生辐合, 并形成强降水 (图 9a、f、k)。23 日白天, 陇南市北部地面辐合较弱 (图 9k), 但受 500 hPa 和 700 hPa 天气系统影响出现强降水 (图 7k、8k), 之后随着系统东移减弱而雨强减小, 24 日凌晨偏北风向南发展 (图 9p), 地面辐合增强, 因此陇南市北部降水再次增强 (图 4c)。

各模式均预报出了北风发展的过程, 但对地面辐合线位置及强度的预报偏差较大。ECMWF 与 CMA-GFS 在 23 日凌晨预报有偏北风与偏南风在定西市形成辐合, 但较实况偏西偏北, CMA-GFS 在六盘山东侧即平凉市东部的地面流场与实况偏差更大 (图 9h), 加之高层动力条件配置较弱, 降水量级偏弱且位置偏差较大; 23 日白天, ECMWF 与 CMA-GFS 模式在甘肃东部预报出“虚假”的地面低压系统, 该系统所形成的辐合作用更强, 即从高层至地面的天气系统均呈现出偏东偏强的特征, 因此在偏东地区预报有强降水, 较实况偏差较大 (图 9l、m、q、r)。

CMA-SH9 模式在 22 日夜间的地面流场与实况较为接近, 预报出了位于甘肃东部的辐散中心 (图 7a、f、k、d、i、n), 虽然在时空特征上存在较大偏差, 但其辐散出的偏东风在六盘山东侧形成辐合, 同时在定西市东部也预报出偏南风与偏北风辐合, 并形成东—西两个强降水中心 (图 9i), 虽较实况偏西 (图 9f), 但在所有模式中偏差是最小的; 此外在偏北风尚未发展的稍早时段, 在偏南风中预报有多个分散“虚假”的强降水中心, 且多位于迎风坡 (图 9d), 这可能是由于模式过多模拟了地形对降水的增幅作用; 23 日白天, 偏东风与偏北风在六盘山东侧形成辐合, 对应有强降水, 较实况落区偏东偏北 (图 9k、n), 同时在陇南北部预报出了辐合但未产生强降水, 这可能和中高层天气尺度系统配置有关系。CMA-MESO 预报的地面风场与实况偏差较大 (图 9e、j、o、t)。

3.3 水汽与不稳定条件的偏差

暴雨的发生需要充沛的水汽和不稳定条件配合, 23 日凌晨至 23 日白天, ERA5 再分析资料显示在定西市东部、平凉市东部、陇南市北部有对流有效位能 (CAPE) 的大值区, 同时定西市东部、平凉市东部 23 日 02 时的 CAPE 大于 23 日 14 时, 陇南市北部则表现相反 (图 10), 这与以上区域强降水的时间变化趋势是一致的 (图 4)。ECMWF 在强降水区域的 CAPE 时间演变趋势与 ERA5 较为一致, 但对甘肃庆阳至陕西北部 CAPE 预报偏强, 这可能也是 ECMWF 强降水区偏东、偏北的原因之一 (图 1b)。CMA-GFS 在平凉市东部的 CAPE 呈现出 23 日 02 时明显小于 23 日 14 时的日变化特征, 与该模式的降水预报表现一致, 即对 23 日凌晨降水预报偏弱, 而 23 日白天明显偏强 (图 4b)。CMA-SH9 的 CAPE 变化趋势与

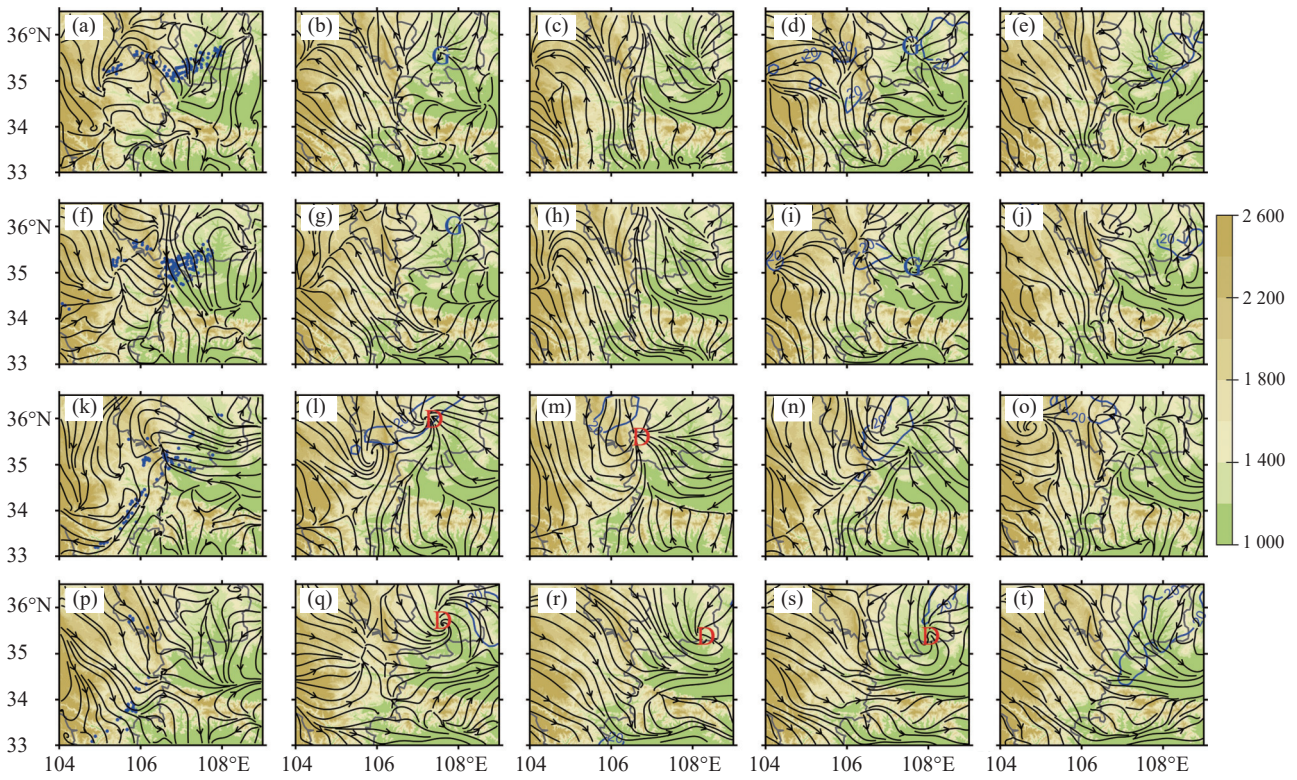


图 9 2024 年 7 月 23 日 02 时 (a—e)、23 日 05 时 (f—j)、23 日 14 时 (k—o)、24 日 02 时 (p—t) 基于实况 (a、f、k、p) 和 ECMWF (b、g、l、q), CMA-GFS (c、h、m、r), CMA-SH9 (d、i、n、s), CMA-MESO (e、j、o、t) 的地面风场 (黑色流线) 和 3 h 降水 (蓝色等值线, 单位: mm), 以及海拔高度 (填色, 单位: m) (图中蓝色圆点为实况 3 h 降水量≥20 mm 的站点, G 代表地面风场辐散中心, D 代表辐合中心)

Fig. 9 Surface wind (black streamline), 3 h precipitation (blue contour, unit: mm) based on (a, f, k, p) observations, (b, g, l, q) ECMWF, (c, h, m, r) CMA-GFS, (d, i, n, s) CMA-SH9, (e, j, o, t) CMA-MESO models at (a-e) 02:00 BT 23, (f-j) 05:00 BT 23, (k-o) 14:00 BT 23, and (p-t) 02:00 BT 24 July 2024, and elevation (color-filled, unit: m) (The blue dots represent observation stations with 3 h precipitation greater than 20 mm. The G and D represents the divergence center and convergence center of the ground wind field)

ERA5 较为一致, 尤其对 23 日 02 时定西市东部的 CAPE 偏强 (图 10d), 这促进了 CMA-SH9 在此处形成另一个强降水中心 (图 1i); CMA-MESO 预报的 CAPE 空间分布特征偏差最大, 并且在 CAPE 的高值区都预报有强降水中心, 尤其对 22 日夜间的强降水落区预报, 与其 CAPE 分布特征高度一致 (图 10e、图 1j), 这表明在 CMA-MESO 模式中不稳定能量对强降水空间格局的影响可能更为显著。

从 700 hPa 水汽输送路径上看, 22—23 日第 4 号台风“派比安”位于广西南部沿海一带, 其组织南海和孟加拉湾洋面的暖湿水汽形成了明显的水汽输送带, 并沿副高外围向甘肃东南部持续输送水汽, 形成持续的水汽辐合 (图 11)。各模式的水汽输送路径与 ERA5 较为相似, 整体表现出了较高的一致性。但不同的是, 基于 ERA5 再分析数据的 23 日 02 时水汽辐合强度与 23 日 14 时没有明显变化, 仅为辐合位置向东南方向移动, 而各模式在甘肃东南部的水汽辐合强度 23 日 14 时明显大于 23 日 02 时, 而这与模式所呈现出的 23 日白天降水明显增强且较实况偏强的特征相对应 (图 4)。

综上, 22 日夜间至 23 日白天, 500 hPa 上甘肃东南部位于副高边缘, 青海北部至甘肃西部有高压脊缓慢东移, 脊区内反气旋环流与副高外围西南气流在甘肃东部形成切变并稳定维持, 强降水区位于 700 hPa 低涡的西南象限和低空急流出口区的左侧, 对应地面上有辐合线形成并发展, 高低空各种尺度天气系统耦合形成了非常有利的动力抬升条件。同时, 甘肃东部是 CAPE 的高值区, 西南暖湿气流持续输送水汽, 为强降水发生和维持提供了有利的环境条件。此外, 23 日白天 500 hPa 切变和 700 hPa 低涡强度减弱, 因此降水强度较 23 日凌晨减弱。

各模式预报的 500 hPa 高压脊强度有不同程度的偏弱, 这不仅影响了 500 hPa 切变位置及强度, 更由于“上下游效应”对低槽强度及移速也产生较大影响, 地面风场受复杂地形影响则偏差更大。22 日夜间至 23 日凌晨, ECMWF 和 CMA-GFS 模式的 500 hPa 切变和 700 hPa 低涡均偏弱, 后者 500 hPa 切变位置

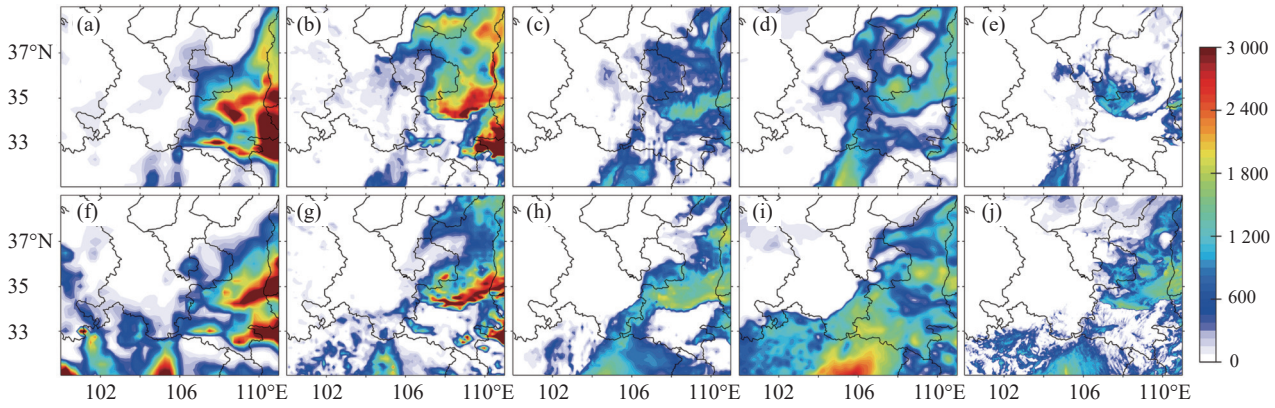


图 10 2024 年 7 月 23 日 02 时 (a—e)、14 时 (f—j) 基于 ERA5 再分析数据 (a、f) 和 ECMWF (b、g), CMA-GFS (c、h), CMA-SH9 (d、i), CMA-MESO (e、j) 模式的对流有效位能 (CAPE, 单位: J·kg^{-1}) 空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of CAPE (unit: J·kg^{-1}) based on (a, f) ERA5 reanalysis, (b, g) ECMWF, (c, h) CMA-GFS, (d, i) CMA-SH9, (e, j) CMA-MESO models at (a-e) 02:00 BT and (f-j) 14:00 BT on 23 July 2024

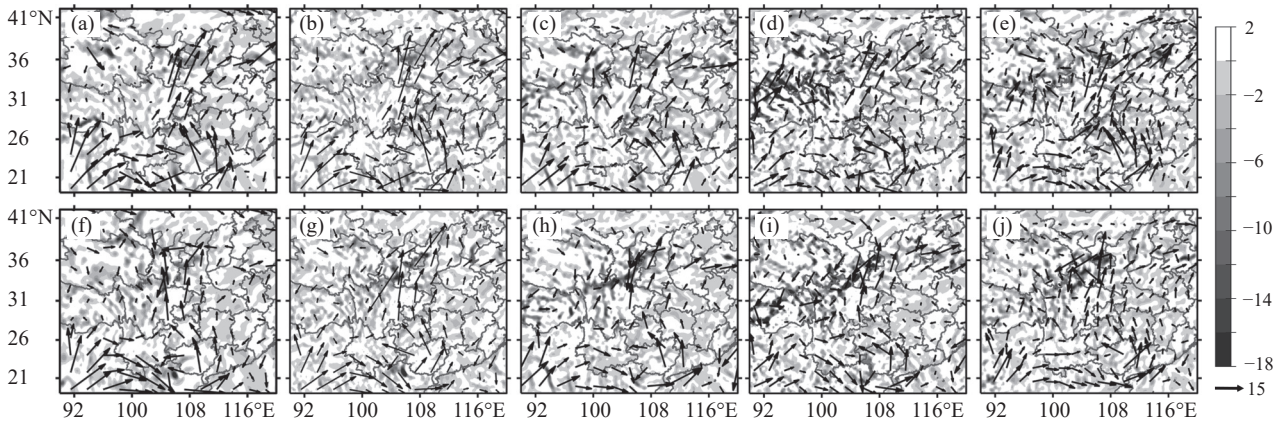


图 11 2024 年 7 月 23 日 02 时 (a—e)、14 时 (f—j) 基于 ERA5 再分析数据 (a、f) 和 ECMWF (b、g), CMA-GFS (c、h), CMA-SH9 (d、i), CMA-MESO (e、j) 模式的 700 hPa 水汽通量 (箭头, 单位: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) 与水汽通量散度 (填色, 单位: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) 的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of water vapor flux (arrow, unit: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) and water vapor flux divergence (color-filled, unit: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) at 700 hPa based on (a, f) ERA5 reanalysis, (b, g) ECMWF, (c, h) CMA-GFS, (d, i) CMA-SH9, (e, j) CMA-MESO models at (a-e) 02:00 BT and (f-j) 14:00 BT on 23 July 2024

显著偏北, 因此两模式在该时段的降水量较实况偏小; CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式均预报出夜间强降水, 但 CMA-MESO 的 500 hPa 和 700 hPa 切变位置较实况偏东偏北, 因此强降水位置偏差较大; CMA-SH9 则表现为 500 hPa 切变偏差较小, 对应有明显的正相对涡度, 动力抬升条件机制更为明确, 同时地面流场与实况也最为接近, 因此该时段内 CMA-SH9 强降水评分最高。23 日白天, 各模式在 500 hPa 脊区下游有偏强的低槽发展, 伴随有更强的冷平流及相对涡度, 并且在偏东、偏北地区有 700 hPa低涡加强和地面低压形成并稳定维持, 因此导致 23 日白天模式强降水较前期显著增强, 且较实况偏强、落区偏东、偏北。各模式的水汽辐合和对流有效位能的时空分布存在一定偏差, 这进一步影响了模式强降水的时空格局。

4　结论与讨论

本文选取全球数值模式 ECMWF、CMA-GFS 及区域数值模式 CMA-SH9、CMA-MESO, 利用地面自动气象站实况资料、ERA5 再分析资料对 2024 年 7 月 22—24 日甘肃省区域性暴雨过程的模式降水预报进行综合检验评估, 并从暴雨形成机制的角度进行偏差分析, 得到的主要结论如下:

(1) ECMWF、CMA-SH9、CMA-MESO 的 48 h 降水量极值达 300 mm 以上, 对降水极端性有一定的体现, CMA-GFS 的强降水量级和范围明显偏小, 但其暴雨落区与实况强降水落区的形态特征较为一致。各模式的强降水落区均较实况偏东、偏北, 尤其是 23 日强降水较 22 日偏差更大, 落区位置更加偏东、偏北, 其中 CMA-SH9 偏差距离最小。各模式对 22

日夜间至 23 日凌晨的强降水预报偏弱，23 日白天的降水预报偏强。其中 CMA-SH9 模式预报出了夜间降水增强的趋势且峰值时间对应较好，但同样量级偏小。

(2) 100 mm 以下降水量评分中，ECMWF 和 CMA-GFS 高于 CMA-SH9、CMA-MESO。100 mm 以上强降水评分中，CMA-SH9 最高，尤其以 22 日夜间强降水的评分明显高于其他模式，CMA-MESO 评分次之，ECMWF 和 CMA-GFS 最低；其中 CMA-SH9 的命中率为 28.9%，CMA-MESO 的为 15.2%，但两者空报率均在 70% 以上。

(3) 各模式对 500 hPa “两高”之间切变、700 hPa 低涡和低空急流等关键影响系统预报有一定准确性，但对其发展演变存在较大时空偏差导致特大暴雨的准确性不高，此外各模式的地面风场受复杂地形影响而偏差更大。在 22 日夜间至 23 日凌晨的强降水时段，ECMWF 和 CMA-GFS 模式对 500 hPa 切变、700 hPa 低涡预报偏弱，尤其以 CMA-GFS 偏差最大，因此两者在该时段的降水强度明显偏弱。CMA-MESO 对 500 hPa、700 hPa 切变的位置均较实况偏东偏北，因此其强降水落区偏差较大。CMA-SH9 模式 500 hPa 切变位置偏差最小并形成更大的正相对涡度，同时地面风场与实况也最为接近，因此 CMA-SH9 模式该时段的强降水综合评分最高。

(4) 23 日白天强降水向东南部发展，各模式在 500 hPa 脊区下游有偏强的低槽发展，伴随有更强的冷平流及相对涡度，同时在实况强降水区的偏东、偏北区域有 700 hPa 低涡、地面辐合的加强和稳定维持，因此 23 日白天强降水明显偏强且落区偏东偏北。此外，各模式预报的水汽通量散度和不稳定能量条件的时空分布特征均存在一定偏差，进一步影响了模式强降水的时空格局。

此次过程由于模式对主要影响系统的发展演变存在时空偏差，强降水的极端性和特大暴雨落区的预报难度较大。ECMWF 模式对大尺度天气系统发展演变的预报较为准确，其小到大雨的评分较高，CMA-GFS 模式略低于 ECMWF，全球模式的降水范围和平均强度有较高的参考价值；而区域模式 CMA-SH9、CMA-MESO 对局地对流性强降水和降水极值的预报有更大的优势，但存在强降水面积或强度较实况偏强的情况，其他针对模式降水量检验评估的研究工作也得到了类似的结论 (徐同等，2022；陈晓燕等，2022)，在本文中区域模式的强降水空报率达 70% 以上，呈现空报率较高的特征。此外，复杂地形下中尺度对流系统的触发机制非常复杂，且模式对极端降水的可预报性不高，在业务工作中极端降水的定量预报仍是关键难点之一，需在充分理解和把握天气形势演变的基础上，结合各模式的优势，加强对流系统短时临近监测预报，及时对降水量预报进行订正。

参考文献 (References)：

曹萍萍,肖递祥,王佳津,等.2018. SWCWARMS 及 ECMWF 模式对四川盆地暖区型和斜压锋生型暴雨预报检验分析[J].高原山地气象研究,38(1):22−29. Cao P P, Xiao D X, Wang J J, et al. 2018. The verification of precipitation forecast of warm zone and baroclinic front heavy rains for Sichuan Basin between SWCWARMS and ECMWF model [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,38(1):22−29 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2018.01.004

陈晓燕,孔祥伟,彭筱,等.2022.全球和区域数值模式在甘肃 2020 年汛期降水预报中的检验评估[J].干旱气象,40(3):524−535. Chen X Y, Kong X W, Peng X, et al. 2022. Verification and assessment of precipitation forecast based on global and regional numerical models in Gansu in flood season of 2020 [J]. Journal of Arid Meteorology, 40(3):524−535 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−03−0524

谌芸,陈涛,汪玲瑶,等.2019.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):483−493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al. 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5):483−493 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.010

胡嘉缨,董春卿,操俊伟.2023.山西复杂地形下 CMA-MESO 3 km 系统降水预报检验及订正[J].暴雨灾害,42(4):384−394. Hu J Y, Dong C Q, Cao J W. 2023. Assessment and correction of precipitation forecast with the CMA-MESO 3 km model under the complex terrain in Shanxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(4):384−394 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−218

何丽华,王咏青,隆璘雪,等.2020.弱天气强迫下一次暖区 MCSs 发生发展研究[J].大气科学学报,43(5):810−823. He L H, Wang Y Q, Long L X, et al. 2020. Study of the occurrence and development of warm-sector MCSs for weak synoptic forcing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,43(5):810−823 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191104002

栗晗,王新敏,朱枫.2022. “21·7”河南极端暴雨多模式预报性能综合评估[J].大气科学学报,45(4):573−590. Li H, Wang X M, Zhu F. 2022. Comprehensive evaluations of multi-model forecast performance for“21·7”Henan extreme rainstorm [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(4):573−590 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211019002

吕林宜,王新敏,栗晗.2019.华东区域模式对河南“7·19”特大暴雨的数值检验与分析[J].气象与环境科学,42(1):101−109. Lv L Y, Wang X M, Li H. 2019. Verification and analysis of SMS-WARMS forecast for “7·19”extraordinary rainstorm in Henan Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences,42(1):101−109 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2019.01.014

屠妮妮,衡志炜,何光碧,等.2022.多数值模式对 2021 年 7 月两次大暴雨过程预报能力检验评估[J].高原山地气象研究,42(2):46−55. Tu N N, Heng Z W, He G B, et al. 2022. Verification of forecasting ability of two rainstorms in July 2021 by multiple numerical models [J].

Plateau and Mountain Meteorology Research,42(2):46−55 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.02.007

肖玉华,赵静,蒋丽娟.2010.数值模式预报性能的地域性特点初步分析[J].暴雨灾害,29(4):322−327. Xiao Y H, Zhao J, Jiang L J. 2010. Analysis on geography & physiognomy character of numerical model prediction performance [J]. Torrential Rain Disaster,29(4):322−327 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2010.04.004

谢漪云,王建捷.2021. GRAPES 千米尺度模式在西南复杂地形区降水预报偏差与成因初探[J].气象学报,79(5):732−749. Xie Y Y, Wang J J. 2021. Preliminary study on the deviation and cause of precipitation prediction of GRAPES kilometer scale model in southwest complex terrain area [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(5):732−749 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.053

熊秋芬.2011.GRAPES_Meso 模式的降水格点检验和站点检验分析[J].气象,37(2):185−193 Xiong Q F. 2011. Verification of GRAPES_Meso precipitation forecasts based on fine mesh and station datasets [J]. Meteorological Monthly,37(2):185−193 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.2.008

徐同,杨玉华,谭燕,等.2022. 2018 年三个华东登陆台风暴雨数值预报结果的空间检验[J].暴雨灾害,41(4):365−374. Xu T, Yang Y H, Tan Y, et al. 2022. Spatial verification of multi-model forecast of three landing typhoons induced rainstorm in East China in 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):365−374 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.04.001

杨丽杰,刘维成,刘新雨,等.2024.引发 2022 年 7 月 15 日甘肃东部强降水的两个中尺度对流系统触发维持机制的对比分析[J].大气科学. Yang L J, Liu W C, Liu X Y, et al. 2024. A comparative analysis of the characteristics,triggering and maintenance mechanisms of two mesoscale convective systems causing heavy rainfall in eastern Gansu on July 15, 2022 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2407.24015

俞小鼎.2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J].气象,38(11):1313−1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing Extreme Flooding Event on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly,38(11):1313−1329 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.11.001

张芳,张芳华,孔期,等.2022. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J].气象,48(6):691−704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al. 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018 [J]. Meteorological Monthly,48(6):691−704 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.123001

张晓美,蒙伟光,张艳霞,等.2009.华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J].热带气象学报,25(5):551−559. Zhang X M, Meng W G, Zhang Y X, et al. 2009. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over south China [J]. Journal of Tropical Meteorology,25(5):551−559 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2009.05.005

周胜男,王东勇,冯颖,等.2024.安徽省 2021 年梅雨期降水预报检验分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):165−173. Zhou S N, Wang D Y, Feng Y, et al. 2024. Verification and analysis of precipitation forecast during Meiyu priod of 2021 in Anhui Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):165−173 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.021

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理与方法[M].北京:气象出版社:125. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. Principles and Methods of Synoptic Meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press:125 (in Chinese)

Colle B A, Mass C F. 2000. The 5-9 February 1996 flooding event over the Pacific northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts [J]. Monthly Weather Review,128(3):593−617. doi:10.1175/1520−0493(2000)1282.0.CO;2

Fu X H, Lee J-Y, Wang B, et al. 2013. Intraseasonal forecasting of the asian summer monsoon in four operational and research models [J]. Journal of Climate,26(12):4186-4203. doi:10.1175/JCLI−D−12−00252.1

He Z, Hsu P-C, Liu X W, et al. 2019. Factors limiting the forecast skill of the boreal summer intraseasonal oscillation in a subseasonal-to-seasonal model [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(1):104−108. doi:10.1007/s00376−018−7242−3

Lu S, Hu Z Y, Yu H P, et al. 2021. Changes of extreme precipitation and its associated mechanisms in Northwest China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(10):1665−1681. doi:10.1007/s00376−021−0409−3

Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al. 2015. A review on regionalconvection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges [J]. Reviews Of Geophysics,53(2):323−361. doi:10.1002/2014RG000475

Sun J H, Zhang Y C, Liu R X, et al. 2019. A review of research on warm-sector heavyrainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 36(12):1299−1307. doi:10.1007/s00376−019−9021−1

Zhang W, Zhou T. 2019. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions [J]. Journal of Climate,32(24):8465-8488. doi:10.1175/JCLI−D−18−0662.1

(责任编辑　唐国瑛)