

CMA-MESO 对 2020 年夏季四川盆地及周边降水 预报性能的评估

叶茂¹ 吴钰¹ 翟丹华² 陈法敬³

1 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

2 重庆市气象台, 重庆 401147

3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

摘 要 利用 2020 年夏季 (6~8 月) CMA-MESO 逐日 08 时 (北京时) 起报的 12~36 h 逐时降水预报数据和地面-卫星-雷达三源融合逐时降水产品, 着眼于小时尺度降水特征, 细致评估了 CMA-MESO 对四川盆地及周边地区的降水预报性能。结果表明, CMA-MESO 较好地把握了夏季降水的空间分布特征, 即小时平均降水量和降水频率的大值区位于四川盆地西部、北部和东部的高海拔山区, 而降水强度大值区主要位于山脉迎风坡一侧, 但 CMA-MESO 预报的降水量和频率大值区位置较观测偏南。CMA-MESO 合理描述了研究区域内降水量和频率峰值时间位相自西向东逐步滞后的特征, 能够把握区域平均的降水量和频率清晨主峰、傍晚次峰的双峰形态以及降水强度的单峰特征, 但预报的降水日变化位相超前于观测。CMA-MESO 预报的逐时降水量均大于观测, 明显的降水量预报正偏差发生于夜间 21~03 时和午后至傍晚 (14~20 时), 分别由一般性降水 ($0.1\sim 10\text{ mm h}^{-1}$) 预报偏差和强降水 ($\geq 10\text{ mm h}^{-1}$) 预报偏差主导, 其偏差大值区分别位于青藏高原东南缘至四川盆地西部和四川盆地以东、以南地区, 模式对热力和动力场的预报偏差结合地形的影响是降水量预报偏差的成因。

关键词 四川盆地及周边 小时尺度降水特征 CMA-MESO 模式 预报降水评估

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2022-09-09; 网络预出版日期

作者简介 叶茂, 女, 1994 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事数值模拟研究。E-mail: ymyemao@163.com

通讯作者 吴钰, E-mail: wukgdqghg@163.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2021YFB3901400, 重庆市自然科学基金面上项目 cstc2021jcyj-msxmX0698, 重庆市气象部门青年基金项目 QNJJ-202207, 重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目 ZHCXTD-202002

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2021YFB3901400), Chongqing Natural Science Foundation General Project (Grant cstc2021jcyj-msxmX0698), Youth Fund of Chongqing Meteorological Department (Grant QNJJ-202207), Wisdom Meteorological Technology and Innovation Team Project of Chongqing Meteorological Department (Grant ZHCXTD-202002)

Evaluation of the Precipitation Forecast Performance of CMA-MESO in Sichuan Basin and the Surrounding Areas in the Summer of 2020

YE Mao¹, WU Zheng¹, ZHAI Danhua², and CHEN Fajing³

¹ Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

² Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

³ CMA Earth System Modeling and Prediction Center, Beijing 100081

Abstract Based on the 12–36 h hourly precipitation forecast data of CMA-MESO starting at 08:00 BT and hourly gauge-satellite-radar merged precipitation products in the summer (June to August) of 2020, the performance of CMA-MESO for precipitation forecast in Sichuan Basin and the surrounding areas is thoroughly evaluated in terms of hourly precipitation characteristics. The results show that CMA-MESO can capture the spatial distribution characteristics of summer precipitation. The observed larger values of hourly mean precipitation amount and precipitation frequency are located in the high altitude mountains in the west, north and east of Sichuan Basin, and the observed larger values of precipitation intensity are mainly located on the windward slope of the mountains, but the large centers of forecast precipitation amount and precipitation frequency are located in the south of observations. CMA-MESO reasonably reproduces the diurnal variation of summer mean precipitation which is the eastward-delayed diurnal peak phase of precipitation amount and precipitation frequency in the study region, the bimodal pattern with the diurnal peak in the morning and the sub-peak in the evening of the regional averaged precipitation amount and precipitation frequency and the single diurnal peak of the regional averaged precipitation intensity. However, the diurnal variation phase of forecast leads that of observations. The forecast hourly precipitation amount is larger than observations, and obvious positive deviations mostly occur at night (21:00–03:00 BT) and from afternoon to evening (14:00–20:00 BT), which are mainly contributed by forecast deviations of general rainfall (0.1–10 mm h⁻¹) and heavy rainfall (≥ 10 mm h⁻¹) respectively, and the large deviations are located from the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau to the western Sichuan Basin and in the east and south of Sichuan Basin respectively. The forecast deviation of thermal field and dynamic field combined with the influence of topography is found to be the reason for the forecast deviations of rainfall amount.

Keywords Sichuan Basin and the surrounding areas, Hourly precipitation characteristics,

1 引言

降水日变化作为降水的基本演变模态，是大气热力过程对水循环综合作用的产物，直接影响地球系统能量循环、生态环境和人类生产活动 (Yu et al., 2014)。研究降水日变化特征有助于理解降水的形成和发展机制，是认识区域天气气候演变规律的重要途径。Yu et al. (2007a) 研究指出，中国降水日变化存在鲜明的区域特征，中国东南和东北部易在下午时段达到降水量峰值，而青藏高原和四川盆地的降水量峰值多发生在午夜。陈炯等 (2013) 进一步分析中国暖季短时强降水的日变化特征，指出短时强降水日变化的区域特征不仅与较大尺度环流系统有关，还受多尺度地形、海陆分布等影响。

四川盆地地处青藏高原东侧，北靠大巴山脉、东临武陵山脉、南接大娄山脉，盆地及周边的地形十分复杂。受季风环流和复杂地形的共同影响，四川盆地及周边地区的降水频次高且强度大，易造成山体滑坡、泥石流和洪水等灾害 (Luo et al., 2016; 叶茂等, 2022; 董新宁等, 2023)。Chen et al. (2021) 研究指出中国西南山区的突发性暴雨事件多在 5~8 月发生，高频中心位于四川盆地、贵州南部至广西北部 and 湖南西部。李强等 (2020) 研究了四川盆地的西南低涡暴雨过程，指出短时强降水多开始于北京时 21 时至次日 08 时，且具有空间不对称性。还有研究表明，四川盆地及周边区域的降水形成机制复杂 (王婧羽等, 2022)，其预报难度相较东部平原地区更大 (肖玉华等, 2010)。

得益于资料同化技术和物理过程参数化方案的逐步优化，对流可分辨模式迅速发展，成为降水预报的有力工具。为进一步揭示模式对降水的预报偏差、提升模式预报准确性，基于降水日变化特征的对流可分辨模式精细化评估大量开展 (Love et al., 2011; Prein et al., 2015; Li et al., 2020)。Guo et al. (2020) 利用 4 km 分辨率的模式开展为期十年的中国东部气候模拟，结果表明模式对降水频率日振幅的模拟优于降水量。Cai et al. (2021) 评估了南京大学对流可分辨模式对夏季青藏高原东部及周边的预报性能，发现该模式可以合理表征降水量级、日峰值时间和持续时间等降水日变化特征。陈昊明等 (2021) 回顾了千米尺度模式的检验评估进展，指出模式对不同区域降水过程的预报能力存在差异，针对特定区域开展降水日变化评估是提升模式应用水平的关键。

2019 年 6 月，3 km 分辨率预报系统 CMA-MESO (China Meteorological Administration Mesoscale model) 正式运行，实现了覆盖中国区域的对流可分辨尺度数值预报，为逐日天气

预报业务提供了核心支撑 (Shen et al., 2020)。关于 CMA-MESO 的检验评估工作已大量开展, 研究表明 CMA-MESO 对强降水落区和量级的预报存在优势 (沈学顺等, 2020), 对强对流过程的预报性能明显优于低分辨率模式 (唐文苑等, 2018; 张小雯等, 2020)。陈静等 (2022) 研究发现, CMA-MESO 对华南前汛期的降水预报技巧与地形密切相关。许晨璐等 (2017) 研究指出, CMA-MESO 能较好描述中国东南部的日均降水量和降水频率特征。而针对地形复杂的四川盆地及周边地区, CMA-MESO 降水预报性能的精细化评估工作较少。2020 年夏季四川盆地及周边的强降水过程频发, 6~7 月西南地区东部总降水量较常年偏多 5 成 (李永华等, 2022), 针对 2020 年夏季开展降水预报评估能够有相对多的样本体现 CMA-MESO 的降水预报性能。

此外, 目前的研究多采用自动气象站降水数据, 但自动站分布不均, 不能细致描述复杂下垫面对降水的影响 (沈艳等, 2013; Shen et al., 2014)。考虑到中国天气气候的复杂性及降水对各类热动力因子的高度敏感性, 利用高时空分辨率降水资料开展精细化预报服务成为必要 (宇如聪和李建, 2016)。为此, 国家气象信息中心研发了高质量、高分辨率的地面-卫星-雷达三源融合降水产品, 该产品有效结合了不同来源降水资料的优势, 在天气气候监测、数值模式检验和水文监测预报中得到广泛应用 (潘旻等, 2018a; 周自江等, 2022)。张宏芳等 (2020) 利用此三源融合降水产品分析暖季秦岭及周边的降水日变化特征, 指出该产品和站点观测能够较好吻合。

基于以上考虑, 本文利用地面-卫星-雷达三源融合降水产品和 CMA-MESO 模式数据, 系统评估模式对 2020 年夏季四川盆地及周边地区的降水预报性能, 重点关注小时平均降水量、降水频率和降水强度等小时尺度降水特征, 以期对流可分辨模式在复杂地形区域的应用及模式的改进优化提供参考。

2 资料与方法

2.1 资料

基于地面-卫星-雷达三源融合逐时降水产品, 开展 CMA-MESO 的降水预报性能评估, 研究时段为 2020 年夏季 (6~8 月)。研究区域为四川盆地及周边地区 ($25^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$), 包括四川盆地及其西部龙门山脉、北部大巴山脉、东部武陵山脉以及南部大娄山脉等区域 (图 1)。考虑到青藏高原站点稀疏且受高大地形、积雪覆盖和复杂下垫面等因素影响, 融合资料在青藏高原的适用性有待提高 (师春香等, 2019), 因此设海拔高度 3 km 以上区域为非检验区 (图 1 灰色区域)。

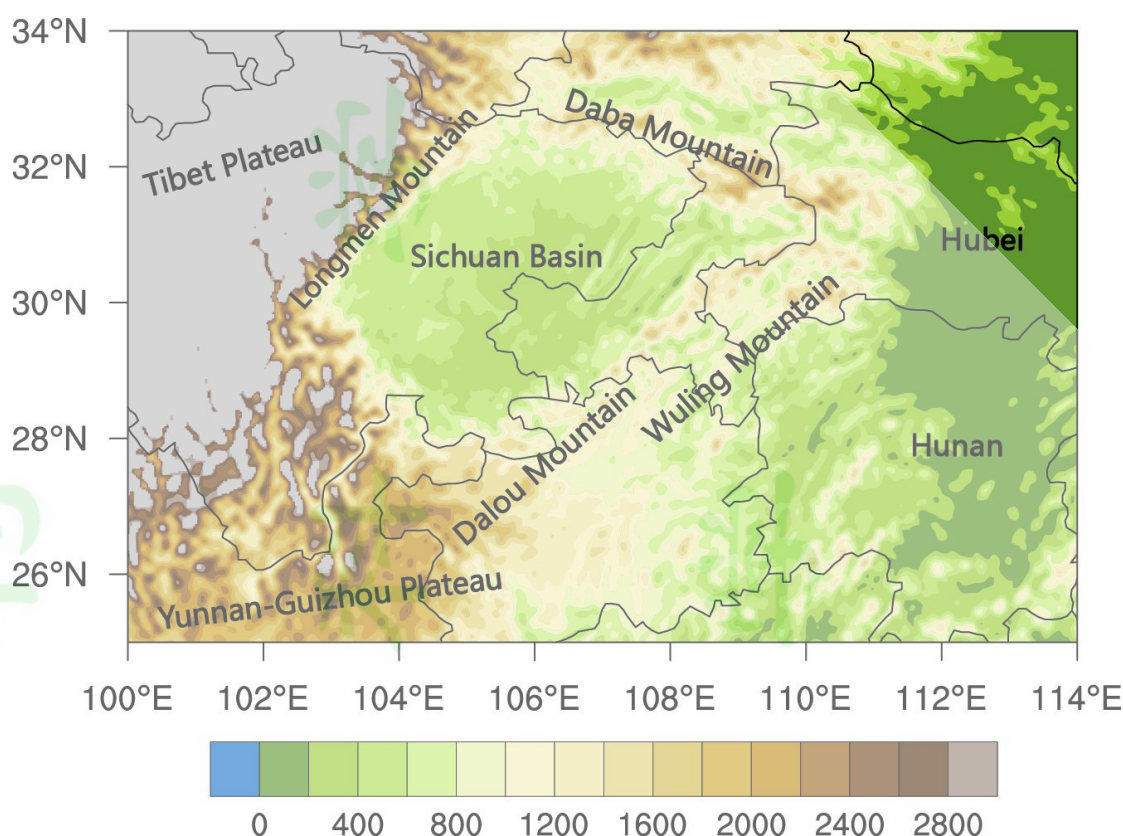


图1 研究区域的地形高度（单位：m）。灰色区域为非检验区

Fig. 1 Terrain elevation (units: m) in the study region. The area shaded in gray is not included in the study

2.1.1 观测数据

将国家气象信息中心提供的地面-卫星-雷达三源融合降水产品用作观测数据，其时间分辨率为1小时，水平分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。该数据通过概率密度函数匹配法、贝叶斯模型平均方法和最优插值法，由中国近4万个自动气象站逐时降水数据与美国海洋大气局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）CMORPH（Climate Prediction Center MORPHing technique）卫星反演降水产品以及中国气象局气象探测中心研制的雷达定量降水估测产品融合而成，其精度优于任何单一来源的降水产品，特别在站点稀疏地区具有优势（潘旻等，2018b）。

为评估地面-卫星-雷达三源融合降水产品在四川盆地及周边地区的适用性，对比了该数据和研究区域内15188个站点观测的小时尺度降水特征（图略），发现二者的量值接近、空间分布形态基本一致，且融合产品具有空间分布均匀的优势。研究区域内小时平均降水量、降水频率和降水强度的空间相关系数分别为0.873、0.841、0.775，均方根误差分别为0.059 mm h⁻¹、2.5%、0.416 mm h⁻¹，说明地面-卫星-雷达三源融合降水产品能够很好反映地面观测降水信息。

此外，在分析模式预报偏差成因时，采用了研究区域内具有较好稳定性与连续性的3285

个站点的逐时 2 m 相对湿度数据。

2.1.2 模式和再分析数据

CMA-MESO 是中国气象局自主研发的数值预报模式 (黄丽萍等, 2022), 其预报区域为 $10^{\circ}\sim 60.1^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$, 水平分辨率为 $0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$, 垂直方向共 50 层, 模式顶高 10 hPa。模式的动力框架采用半隐式半拉格朗日差分方案、水平 Arakawa-C 网格点、垂直方向高度地形追随坐标和全可压非静力平衡动力框架。物理过程参数化方案采用 WSM6 云微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、Noah 陆面过程方案和 NMRF 边界层方案, 未采用积云参数化方案。模式的驱动场来自 NCEP 全球模式, 通过三维变分、云分析和陆面资料同化系统同化雷达、卫星、GPS 水汽和常规观测等资料。2020 年 CMA-MESO 每日运行 8 次 (00、03、06、09、12、15、18、21 时, 世界时), 在世界时 00 和 12 时冷启动, 在其余时次进行暖启动循环更新, 预报时效为 36 h。

本文的模式数据采用 2020 年夏季 (6 月 1 日~8 月 31 日) CMA-MESO 逐日 08 时 (北京时, 下同) 起报的 12~36 h 逐时预报格点数据, 对应于观测 20~20 时的逐时数据, 具体包括地面降水量、2 m 相对湿度、CAPE 值、等压面风场和比湿数据。

再分析数据采用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的 ERA5 逐时格点数据, 水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。研究表明, ERA5 数据能较好反映高空和地面的要素信息 (Belmonte Rivas and Stoffelen, 2019; Hersbach et al., 2020), 代表了当前再分析资料的最高水平 (周自江等, 2022)。

2.1.3 数据插值

为便于数据对比分析, 本文以观测数据为基准, 通过双线性插值方法统一数据的水平分辨率: 分析模式降水预报性能时, 将模式数据插值到和观测数据一致的 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 格点上; 分析地面环境场特征时, 将模式数据插值到相应的观测站点上; 分析高空环流形势时, 将模式数据插值到和 ERA5 数据一致的 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 格点上。

2.2 评估方法

小时平均降水量、降水频率和强度的计算方法参考 Gan et al. (2019)。若某格点的小时降水量 ≥ 0.1 mm 则认为该格点发生一次有效降水, 相应的降水量计为有效降水量。小时平均降水量 (单位: mm h^{-1}) 指研究时段内某格点上累计有效降水量与非缺测时次的比值; 降水频率 (单位: %) 为某格点上有效降水时次与非缺测时次的百分比; 降水强度 (单位: mm h^{-1}) 为某格点上累计有效降水量与有效降水时次的比值。基于以上方法, 首先利用模

式 08 时起报的 12~36 h 预报结果和相应的观测数据,计算研究区域内各格点在 24 h 内(20~20 时)各时次的小时平均降水量、频率和强度,其最大值出现的时次记为日变化峰值时间,而后对区域内所有格点做平均得到四川盆地及周边整体平均的降水日变化演变特征。

降水事件的定义参考 Yu et al. (2007b)。若降水开始至结束期间无间歇或间歇至多 1 h,则将此次降水过程记为一次降水事件;若降水开始后的间歇超过 2 h,则将间歇后的降水记为新的降水事件。降水持续时间即为降水事件开始至结束的时间,持续时间小于 3 h 的降水事件为短时降水事件。

3 夏季降水特征的预报评估

3.1 降水空间分布特征的预报评估

图 2 为 2020 年夏季观测与预报的小时平均降水量、降水频率和降水强度及预报偏差(预报减去观测,下同)的空间分布。由图 2a,观测的降水量大值区主要位于四川盆地西北部的龙门山脉、盆地东北部的大巴山和盆地东部的武陵山脉,0.7~1.0 mm h⁻¹的大值中心位于龙门山脉中段、大巴山南坡和武陵山脉北支。模式预报的降水量空间分布特征与观测基本一致,但大值区位置相对观测偏南(图 2b)。由图 2c,研究区域的降水量预报以正偏差为主,超过 0.5 mm h⁻¹的偏差大值区位于青藏高原东南缘至四川盆地西部一带。

由图 2d,观测的降水频率空间分布特征与降水量较为一致,超过 22%的频率大值区主要位于四川盆地西部、北部和东部海拔高度较高的山区,说明地形有利于降水的出现,但盆地南部山区的降水频率并不突出,周秋雪等(2015)指出这与山脉走向、影响降水的系统等有关,夏季盆地低层的偏南风易在盆地北部和西部的陡峭地形作用下强迫抬升,因此更易形成降水。模式预报的盆地西部降水频率明显偏大,预报的大巴山脉和武陵山脉北支的大值区位置偏南(图 2e)。由图 2f,模式对鄂西山区、大娄山以南地区的降水频率存在低估,对其余地区的降水频率整体存在高估,尤其在青藏高原东南缘至四川盆地西部的高估明显(预报偏差超过 12%)。

由图 2g,观测的降水强度大值区位置相对降水频率大值区有所偏移,主要位于龙门山脉以东、大巴山脉以南及武陵山脉至大娄山以南地区,这是因为山脉迎风坡的地形抬升作用有利于触发强降水,导致山前降水大于山峰(方德贤等, 2020)。此外四川盆地的降水强度较强,这和夏季西南涡的频繁活动有关(王鑫等, 2009)。模式较好把握了降水强度大值区的位置,但预报的强度偏强(图 2h)。由图 2i,四川盆地的降水强度预报呈弱的负偏差(约

-0.5 mm h^{-1}), 其余地区整体呈预报正偏差, 最大正偏差 (4.4 mm h^{-1}) 位于湘东南。

综合降水量、降水频率和强度的预报偏差 (图 2c、f、i) 可见, 青藏高原东南缘至四川盆地以西地区明显的降水量预报正偏差来自模式对降水频率和强度的共同高估; 四川盆地的降水量预报偏差不明显是模式对降水频率的高估与降水强度的低估互相抵消的结果。

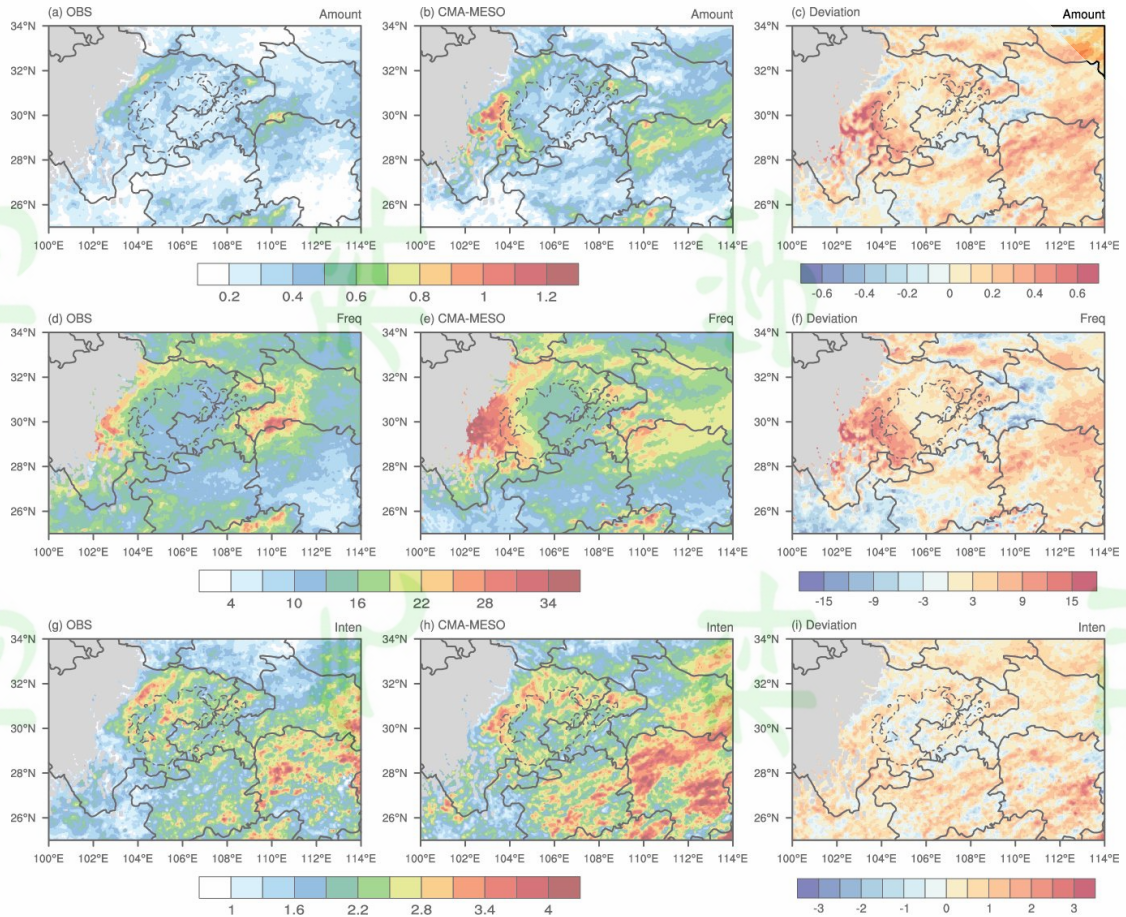


图 2 2020 年夏季观测 (第一列) 和预报 (第二列) 的小时平均 (a、b) 降水量 (单位: mm h^{-1})、(d、e) 降水频率 (单位: $\%$)、(g、h) 降水强度 (单位: mm h^{-1}) 及其 (c、f、i) 偏差 (预报—观测) 分布。黑色虚线为四川盆地区域 500 m 地形高度线, 灰色区域为非检验区

Fig. 2 Spatial distributions of hourly mean (a, b) precipitation amount (units: mm h^{-1}), (d, e) precipitation frequency (units: $\%$) and (g, h) precipitation intensity (units: mm h^{-1}) from observations (first column) and forecasts (second column), as well as (c, f, i) the forecast deviations (forecast—observation) in the summer of 2020. The black dashed line represents 500 m terrain height in the Sichuan Basin area and the area shaded in gray is not included in the study

3.2 降水日变化特征的预报评估

图 3 为 2020 年夏季观测与预报的降水量、降水频率和降水强度日变化峰值时间位相分布。由图 3a, 研究区域内观测的降水量峰值时间自西向东从夜间 23 时滞后至次日傍晚 20 时, 这一位相滞后和对流层低层环流日变化 (Chen et al., 2010)、降水系统东传 (Bao et al., 2011; 李强等, 2017) 等有关。由图 3c, 降水频率峰值时间位相的滞后特征更鲜明, 青藏

高原东坡至四川盆地西部为午夜前后至清晨（23~05 时）峰值，盆地东部地区主要为清晨至傍晚（05~20 时）峰值。由图 3e，降水强度的峰值时间位相分布较为杂乱，但仍可以看出研究区域以夜间至清晨（20~08 时）峰值为主。

模式较好把握了降水量和频率峰值时间位相自西向东逐步滞后的现象，对青藏高原东坡至四川盆地的“夜雨”特征有所体现，但预报的峰值时间较观测提前约 3 h；对盆地东部的峰值时间位相亦有体现，但预报的午后至傍晚（14~20 时）峰值区范围明显偏大（图 3b、d）。模式预报的降水强度的夜间至清晨峰值区范围减小，峰值多出现在午后至傍晚，尤其在四川盆地以东和以南地区表现明显（图 3f）。

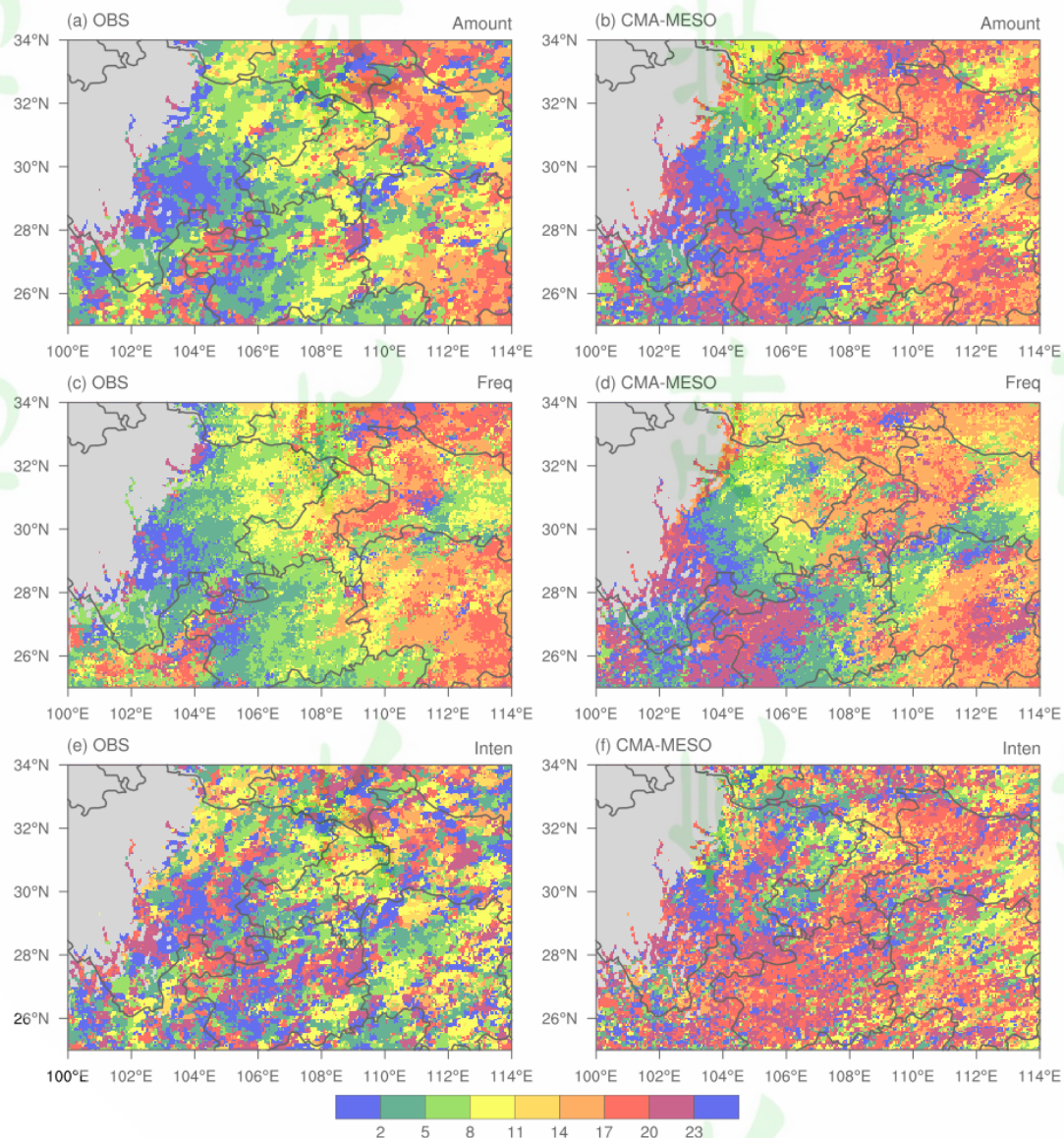


图 3 2020 年夏季观测（左列）和预报（右列）的（a、b）降水量、（c、d）降水频率、（e、f）降水强度日变化峰值时间位相的空间分布。灰色区域为非检验区

Fig. 3 Spatial distributions of the diurnal peak phases of (a, b) precipitation amount, (c, d) precipitation frequency and (e, f) precipitation intensity from observations (left column) and forecasts (right column) in the

summer of 2020. The area shaded in gray is not included in the study

图 4 为研究区域整体平均的观测与预报的降水量、降水频率和降水强度日变化曲线。由图 4a, 观测的降水量日变化主峰值出现在清晨 05 时, 弱的次峰值出现在傍晚 18 时。模式预报了降水量日变化的双峰形态, 但预报的清晨峰值较观测提前 2 h, 傍晚次峰值较观测更突出, 且清晨与傍晚的峰值差距减小 (观测: 0.14 mm h^{-1} ; 预报: 0.06 mm h^{-1})。由图 4b, 观测的降水频率在 06 时和 17 时达到峰值, 模式较好把握了降水频率日变化的清晨主峰、傍晚次峰特征, 但预报的日变化位相超前观测 2~3 h, 且对峰值存在高估。由图 4c, 观测的降水强度日变化呈夜间单峰型, 峰值出现在凌晨 02~04 时, 模式预报的峰值提前至傍晚 20 时左右, 且数值较观测明显偏大。综合图 4a-c, 模式对降水量傍晚次峰值的大幅高估源于对降水频率和强度的共同高估, 这和图 3 中模式高估四川盆地以东和以南地区的午后至傍晚降水峰值区范围有关。

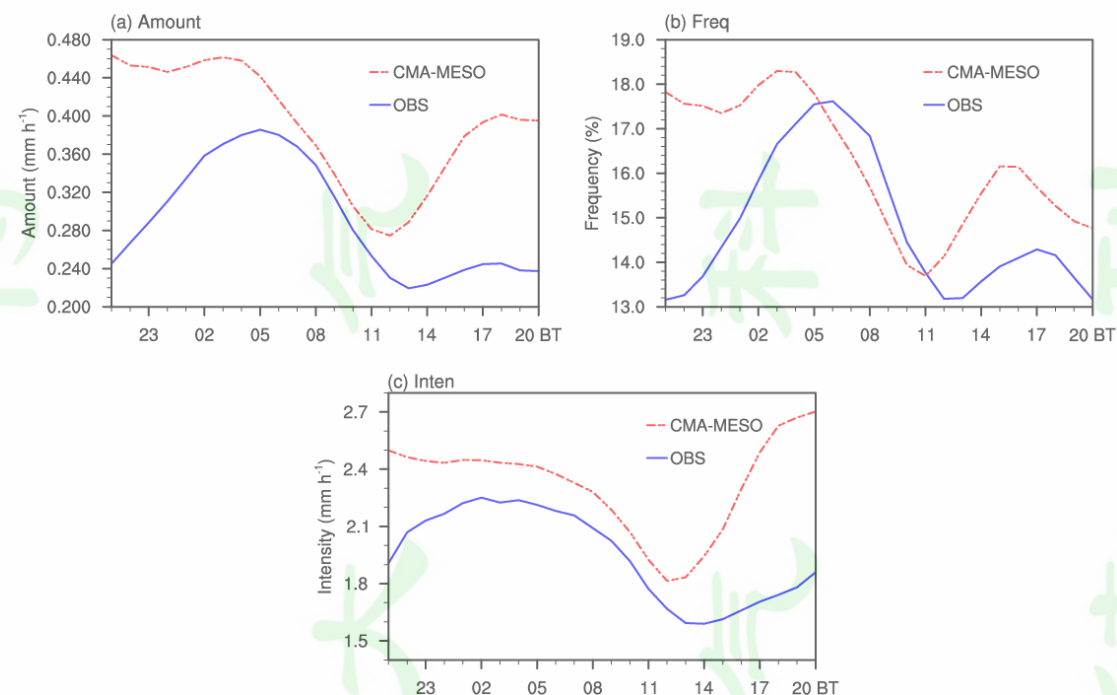


图 4 2020 年夏季区域平均的观测 (蓝线) 和预报 (红线) 的 (a) 降水量 (单位: mm h^{-1})、(b) 降水频率 (单位: %) 和 (c) 降水强度 (单位: mm h^{-1}) 日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variations of observed (blue line) and forecast (red line) regional averaged (a) precipitation amount (units: mm h^{-1}), (b) precipitation frequency (units: %) and (c) precipitation intensity (units: mm h^{-1}) in the summer of 2020

3.3 不同强度降水的预报偏差

由图 4a, 逐时的模式预报降水量均大于观测。为进一步探讨模式对不同强度降水的预报性能, 记有效降水的降水量预报偏差为总偏差, 分析不同强度降水的小时平均降水量预报偏差对总偏差的贡献率 (图 5)。可见随降水强度的增大, 贡献率大值时段逐渐由夜间至正

午（21~13 时）过渡到午后至傍晚（14~20 时）。对于 10 mm h^{-1} 以下强度降水，偏差贡献率在夜间至正午较大，尤其 $2\sim4\text{ mm h}^{-1}$ 强度降水表现明显，其 01~12 时的逐时贡献率均超过 18%；对于 10 mm h^{-1} 及以上强度降水，偏差贡献率大值主要出现在午后至傍晚，尤其 30 mm h^{-1} 及以上强度降水表现明显，其 14~20 时的逐时贡献率均超过 12%。

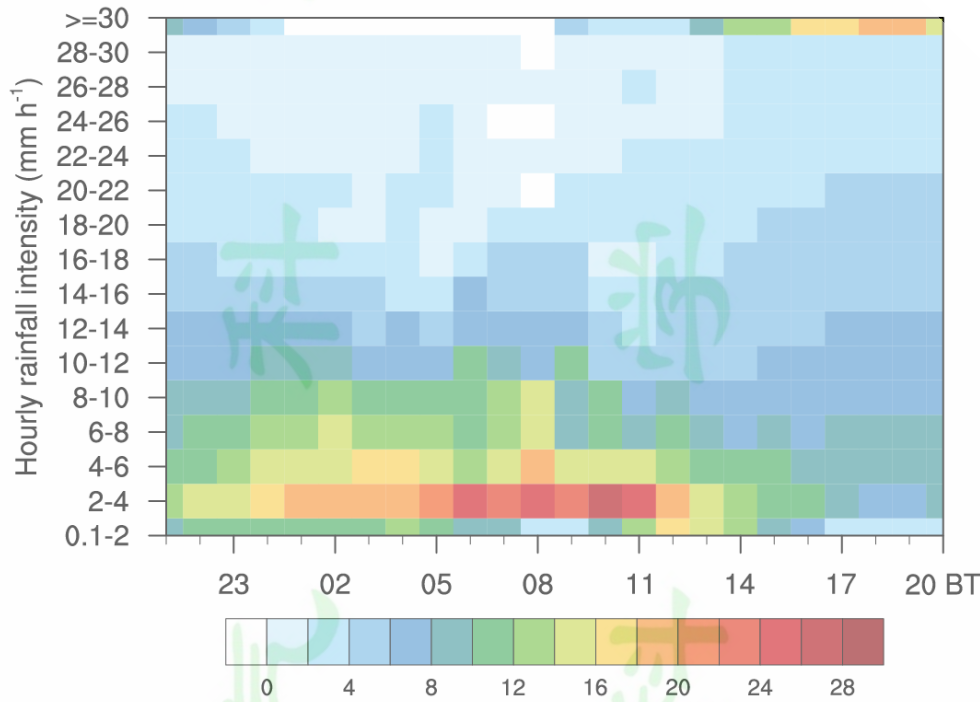


图 5 2020 年夏季区域平均的不同强度降水的降水量预报偏差贡献率（单位：%）日变化

Fig. 5 Diurnal variations of contribution rate (units: %) of regional averaged precipitation forecast deviations with different intensities in the summer of 2020

基于以上分析，将有效降水分解为一般性降水（ $0.1\sim10\text{ mm h}^{-1}$ ）和强降水（ $\geq10\text{ mm h}^{-1}$ ）进行考察。图 6 为区域平均的降水量预报偏差日变化以及小时降水量预报偏差的逐日演变。由图 6a，有效降水预报偏差的峰值和谷值分别出现在傍晚和上午时段，夜间 21~03 时和午后至傍晚（14~20 时）的预报偏差较大（超过 0.1 mm h^{-1} ）。由有效降水预报偏差逐日演变（图 6a 色阶），6 月的逐时预报偏差较大，而 7 月和 8 月的预报偏差主要集中在夜间和午后至傍晚时段。

一般性降水和强降水的预报偏差日变化特征与有效降水较为一致，但傍晚时段的强降水预报偏差明显大于一般性降水（图 6b、c 黑色实线）。分别计算一般性降水和强降水预报偏差对总偏差的贡献率，二者呈反位相分布（图 6b、c 灰色虚线）：一般性降水的预报偏差贡献率在 21~13 时较大（超过 50%），这主要源于 6 月和 7 月的偏差贡献，8 月的预报偏差相对较小（图 6b 色阶）；强降水的预报偏差贡献率在 14~20 时较大（超过 50%），这源于模式对夏季各月该时段强降水的明显高估（图 6c 色阶）。综合图 6a-c，降水量预报在 21~03

时和 14~20 时呈明显的正偏差，分别由一般性降水预报偏差和强降水预报偏差主导。

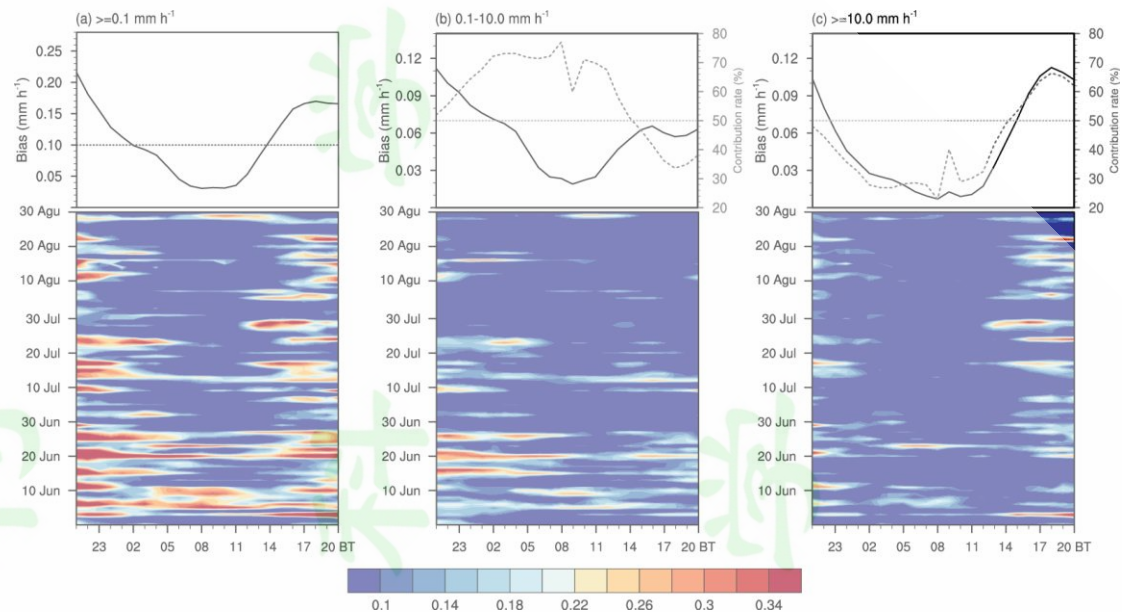


图 6 2020 年夏季区域平均的降水量预报偏差日变化（黑色实线，单位： mm h^{-1} ）及小时降水量预报偏差逐日演变（色阶，单位： mm h^{-1} ）：（a）有效降水；（b）一般性降水；（c）强降水。图 b、c 灰色虚线分别表示一般性降水、强降水的降水量预报偏差贡献率（单位：%）日变化

Fig. 6 Diurnal variations of regional averaged precipitation forecast deviations (black solid line, units: mm h^{-1}) and day-to-day evolution of regional averaged hourly precipitation forecast deviations (colored, units: mm h^{-1}) in the summer of 2020: (a) Effective rainfall; (b) general rainfall; (c) heavy rainfall. The gray dashed lines in Fig. b and Fig. c respectively show diurnal variations of contribution rate (unit: %) of forecast deviations for general rainfall and heavy rainfall

针对夜间 21~03 时的一般性降水和午后至傍晚（14~20 时）的强降水事件，进一步分析观测与预报区域平均的不同持续时间降水事件数（图 7）。由图 7a，观测的夜间一般性降水以超过 3 h 的事件为主，模式较好把握了这一特征，但预报的降水事件总数偏多，这源于对短时降水事件的空报。由图 7b，观测与预报的午后至傍晚强降水均以不超 3 h 的短时事件为主，但模式预报的降水事件明显偏多，说明模式对午后短时强降水事件存在空报。

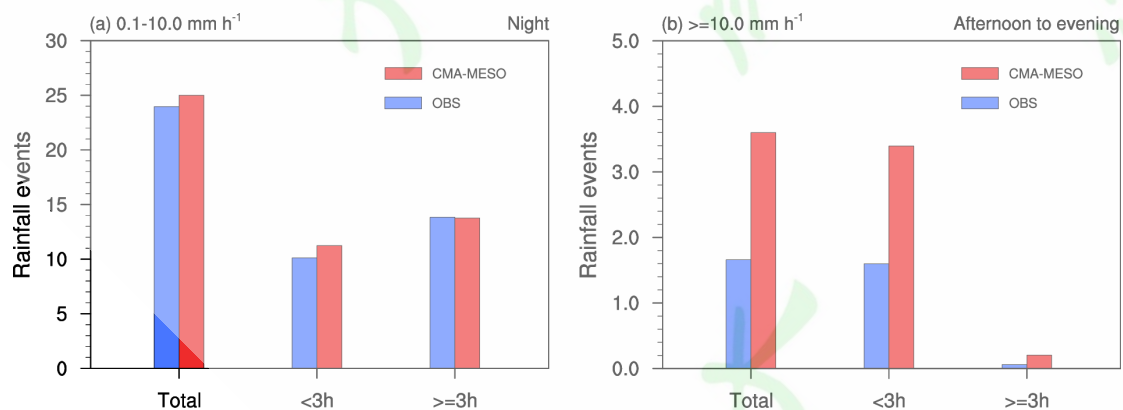


图 7 2020 年夏季区域平均的观测（蓝色）和预报（红色）的不同持续时间降水事件数：（a）夜间（21~03 时）一般性降水事件；（b）午后至傍晚（14~20 时）强降水事件

Fig. 7 The number of regional averaged precipitation events with different durations observed (blue bar) and forecasted (red bar) in the summer of 2020: (a) General rainfall events at night (21:00–03:00 BT); (b) heavy rainfall events from afternoon to evening (14:00–20:00 BT)

4 预报偏差成因分析

前文统计分析表明,观测与模式预报的夜间一般性降水和午后至傍晚强降水存在较大偏差,图8显示了相应的空间分布。模式较好把握了夜间一般性降水的大值区,但对雨量存在高估,明显的预报正偏差集中在青藏高原东南缘至四川盆地西部(图8a、c、e)。模式预报的午后强降水明显偏多,偏差大值区主要位于四川盆地以东和以南地区,其分布和模式预报的降水强度的午后至傍晚峰值区(图3f)相似(图8b、d、f)。

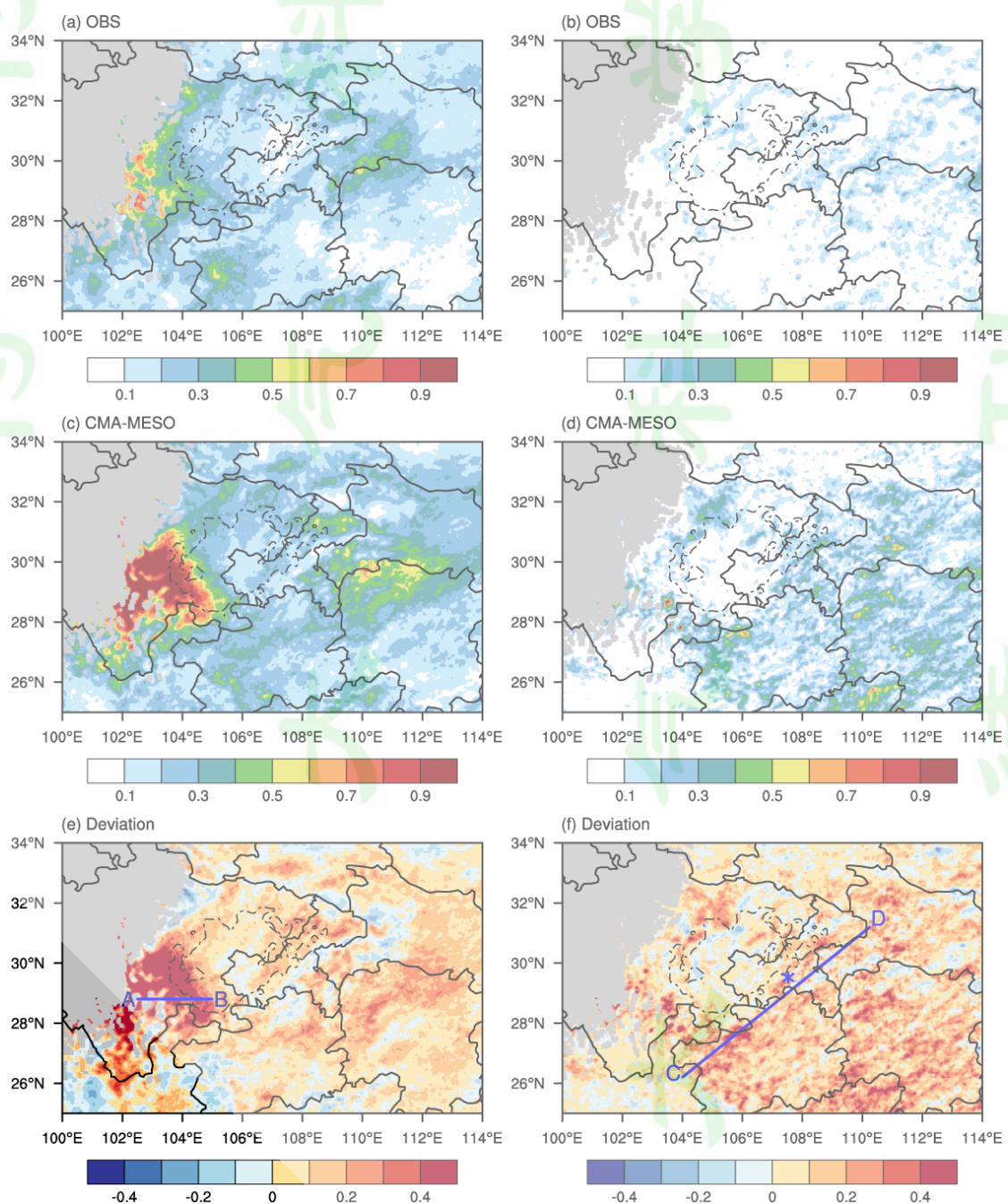


图 8 2020 年夏季夜间（21~03 时）一般性降水（左列，单位： mm h^{-1} ）和午后至傍晚（14~20 时）强降水（右列，单位： mm h^{-1} ）的空间分布：（a、b）观测；（c、d）预报；（e、f）偏差（预报—观测）。图 e 中 AB 线段为图 9a-c 的剖面位置。图 f 中 CD 线段为图 10d 的剖面位置，星号表示武陵山站。黑色虚线为四川盆地地区 500 m 地形高度线，灰色区域为非检验区

Fig. 8 Spatial distributions of general rainfall at night (21:00–03:00 BT) (left column, units: mm h^{-1}) and heavy rainfall from afternoon to evening (14:00–20:00 BT) (right column, units: mm h^{-1}) in the summer of 2020: (a, b) Observations; (c, d) forecasts; (e, f) deviations (forecast—observation). Line AB in Fig. e denotes the position of the cross section in Figs. 9a–c. Line CD in Fig. f denotes the position of the cross section in Fig. 10d, with an asterisk indicating the location of Wulingshan Station. The black dashed line represents 500 m terrain height in the Sichuan Basin area and the area shaded in gray is not included in the study

选取夜间一般性降水预报正偏差较大的 18 例过程进行合成分析，沿图 8e 中 AB 线段做 21 时比湿、涡度和风场的垂直剖面（图 9a–c）。ERA5 再分析场在 700 hPa 以下为偏东风，对流层中低层为正涡度、高层为负涡度，迎风坡的动力抬升作用以及低层辐合、高层辐散的环境配置有利于降水的产生（黄楚惠等，2022）。CMA-MESO 的预报结果和 ERA5 较一致，但在对流层低层的正涡度和偏东风更强，且在降水区上空存在深厚的水汽预报正偏差。图 9d 为 850 hPa 风场和比湿的预报偏差分布，可见从四川盆地东南部进入盆地的偏差风场为偏南风，有利于水汽的输送。在青藏高原东南缘的迎风坡地形影响下，偏东的偏差气流在降水预报偏差大值区内（图 9d 黑框区域）引起了弱辐合偏差和更充沛的水汽输送，这有助于垂直上升运动的发展和水汽的凝结，导致降水预报偏多。同时注意到四川盆地内存在偏差风场的反气旋性环流，且渝西的水汽预报呈弱的负偏差，该区域的降水预报也弱于观测（图 8e）。

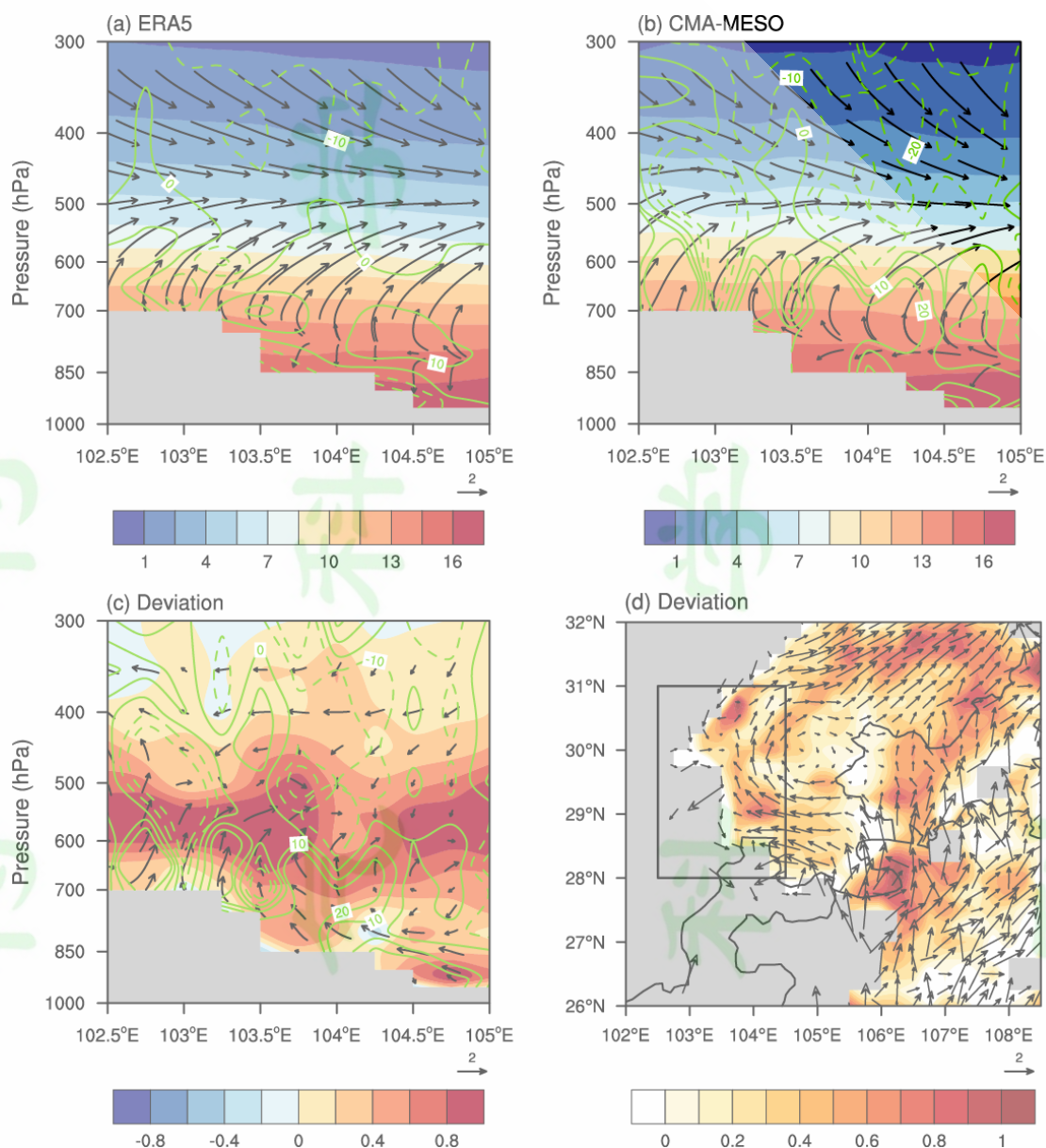


图9 2020年夏季18例降水过程合成的21时(a) ERA5再分析场和(b) CMA-MESO预报场沿图8e中AB线段的比湿(填色, 单位: g kg^{-1})、纬向风和经向风(箭头, 单位: m s^{-1})、涡度场(等值线, 单位: 10^{-7}s^{-1} , 实线表示正值, 虚线表示负值)垂直剖面及其(c)偏差(CMA-MESO-ERA5)分布;(d) 850 hPa风场(箭头, 单位: m s^{-1})与比湿(填色, 单位: g kg^{-1})的预报偏差(CMA-MESO-ERA5)分布。灰色阴影表示地形, 图d中黑色方框表示夜间一般性降水的预报偏差大值区

Fig. 9 Vertical cross-sections of specific humidity (colored, unit: g kg^{-1}), zonal wind and meridional wind (arrows, units: m s^{-1}) and vorticity (contours, units: 10^{-7}s^{-1} , solid lines represent positive values and dashed lines represent negative values) along line AB in Fig. 8e from (a) ERA5 and (b) CMA-MESO, as well as (c) the forecast deviations (CMA-MESO-ERA5) at 21:00 BT composed of 18 precipitation cases in the summer of 2020; (d) forecast deviations (CMA-MESO-ERA5) of wind field (arrows, units: m s^{-1}) and specific humidity (colored, unit: g kg^{-1}) at 850 hPa. The area shaded in gray denotes terrain, and the black box in Fig. d represents the area with large forecast deviations of general rainfall at night

针对午后至傍晚时段的强降水预报偏差, 结合2020年夏季逐日14时平均的热力与动力场来分析预报偏差的可能原因(图10)。由模式预报与站点观测的2 m相对湿度偏差分布(图

10a), 研究区域整体呈湿度预报正偏差, 说明模式预报的近地面层水汽偏多。进一步选取武陵山站 (29.52°N , 107.53°E) 作为四川盆地东部山区站的代表, 由其 2 m 相对湿度的日变化曲线 (图 10c) 可见, 观测的 2m 相对湿度在夜间偏大、白天偏小, 模式预报的湿度演变特征和观测一致, 但在午后至傍晚时段呈明显的预报正偏差, 最大正偏差 (6.5%) 出现在下午 16 时。图 10b 为 CMA-MESO 预报场与 ERA5 再分析场的 CAPE 值偏差分布, 明显的预报正偏差分布于四川盆地以东和以南地区, 说明该区域模式预报的大气层结更不稳定。沿图 8f 中 CD 线段做比湿与涡度场的垂直剖面, 可见对流层低层表现为涡度场和比湿的预报正偏差 (图 10d)。总体而言, CMA-MESO 在午后预报了偏强的辐合上升运动、充沛的水汽供应和不稳定的大气状态, 热力和动力场的预报偏差促使产生虚假的强降水。

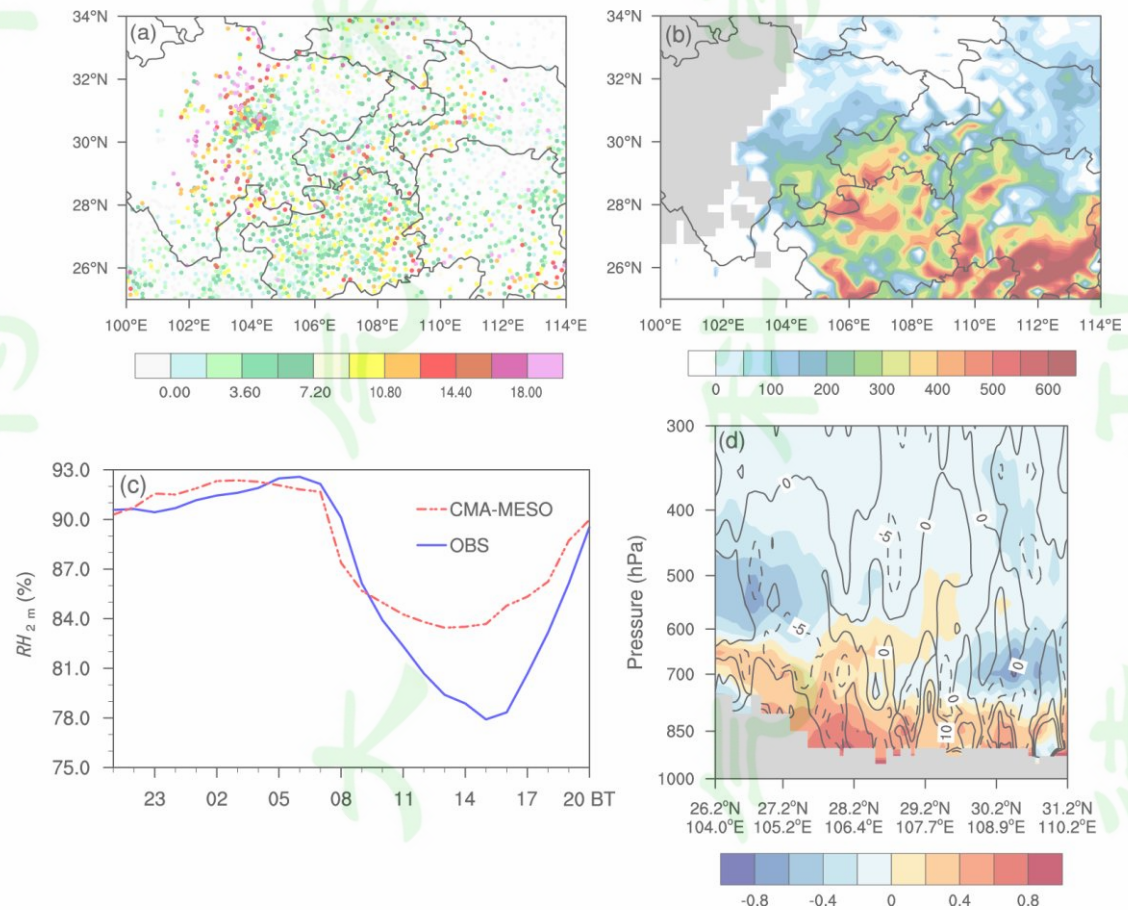


图 10 2020 年夏季平均 14 时 (a) 2 m 相对湿度 (单位: %), (b) CAPE 值 (单位: J kg^{-1}), (d) 沿图 8f 中 CD 段的比湿 (填色, 单位: g kg^{-1}) 和涡度场 (等值线, 单位: 10^{-7}s^{-1} , 实线表示正值, 虚线表示负值) 垂直剖面的预报偏差 (CMA-MESO—ERA5) 分布; (c) 2020 年夏季观测 (蓝线) 和预报 (红线) 的武陵山站的 2 m 相对湿度 (单位: %) 日变化曲线。图 b、d 中灰色阴影表示地形

Fig. 10 Summer average deviations (CMA-MESO—ERA5) of (a) 2 m relative humidity (units: %), (b) CAPE (unit: J kg^{-1}) and (d) vertical cross-sections of specific humidity (colored, unit: g kg^{-1}) and vorticity (contours, units: 10^{-7}s^{-1} , solid lines represent positive values and dashed lines represent negative values) along line CD in Fig. 8f at 14:00 BT in 2020; (c) diurnal variations of observed (blue line) and forecast (red line) 2 m relative humidity (units: %) at Wulingshan Station in the summer of 2020. In Figs. b and d, the area shaded in gray denotes terrain

5 结论与讨论

基于 2020 年夏季（6~8 月）地面-卫星-雷达三源融合逐时降水产品，以小时平均降水量、降水频率和降水强度等降水特征为指标，细致地评估了 CMA-MESO 对四川盆地及周边地区的降水预报性能，进而讨论了模式预报偏差的可能成因。主要结论如下：

（1）四川盆地及周边地区的小时平均降水量和降水频率的空间分布较一致，大值区位于四川盆地西部、北部和东部的高海拔山区，而降水强度大值区主要位于山脉迎风坡一侧。CMA-MESO 较好把握了夏季降水的空间分布特征，但预报的降水量和频率大值区位置偏南，对量值的预报也存在偏差：青藏高原东南缘至四川盆地以西地区呈明显的降水量预报正偏差，这源于模式对降水频率和强度的共同高估；四川盆地的降水量预报偏差不明显，这是模式对降水频率的高估与降水强度的低估互相抵消的结果。

（2）CMA-MESO 较好预报了四川盆地及周边地区降水量和频率峰值时间位相自西向东逐步滞后的特征，能够把握区域平均的降水量和频率清晨主峰、傍晚次峰的双峰形态以及降水强度的单峰特征，但预报的降水日变化位相超前于观测。CMA-MESO 对降水量傍晚次峰值的明显高估来自对降水频率和强度的共同高估，这和模式高估四川盆地以东和以南地区的午后至傍晚降水峰值区范围有关。

（3）CMA-MESO 预报的逐时降水量均大于观测，明显的预报正偏差发生于夜间 21~03 时和午后至傍晚（14~20 时），其中夜间预报偏差主要由一般性降水（ $0.1\sim 10\text{ mm h}^{-1}$ ）预报偏差所贡献，而午后至傍晚的预报偏差由强降水（ $\geq 10\text{ mm h}^{-1}$ ）预报偏差主导。模式较好把握了夜间一般性降水（午后强降水）以超过 3 h（不超 3 h）事件为主的特征，但预报的短时降水事件偏多。

（4）夜间一般性降水的预报正偏差大值区位于青藏高原东南缘至四川盆地西部，这是由模式预报的偏强的对流层低层偏东气流及水汽输送，在青藏高原东南缘的迎风坡地形配合下造成。午后至傍晚时段的强降水预报正偏差主要分布于四川盆地以东和以南地区，这是因为模式预报了偏强的辐合上升运动、充沛的水汽供应和不稳定的大气状态，热力和动力场的预报偏差有利于触发虚假的强降水。

2020 年为气候上的异常年份，西南地区降水较常年偏多（Hu et al., 2021; 李永华等, 2022）。本文分析了 2020 年夏季四川盆地及周边地区的降水日变化特征，系统评估了 CMA-MESO 的降水预报性能，但还应采用长时间序列的数据开展不同气候背景下的评估分析。研究发现模式对热力和动力场存在一定预报偏差，后续应结合模式开展模式物理参数化、

动力方案或地形相关参数的敏感性试验, 以进一步理解预报偏差的可能成因。

参考文献 (References)

- Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139(9): 2790–2810. doi:10.1175/MWR-D-11-00006.1
- Belmonte Rivas M, Stoffelen A. 2019. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT [J]. *Ocean Sci. Discuss.*, 15: 831–852. doi: 10.5194/os-2018-160
- Cai S X, Huang A N, Zhu K F, et al. 2021. Diurnal cycle of summer precipitation over the Eastern Tibetan Plateau and surrounding regions simulated in a convection-permitting model [J]. *Climate Dyn.*, 57: 611–632. doi:10.1007/s00382-021-05729-5
- 陈昊明, 李普曦, 赵妍. 2021. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望 [J]. *气象科技进展*, 11(3): 155–164.
- Chen Haoming, Li Puxi, Zhao Yan. 2021. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution [J]. *Advances in Met S&T* (in Chinese), 11(3): 155–164. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.018
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley [J]. *J. Climate*, 23(4): 905–917. doi:10.1175/2009jcli3187.1
- 陈静, 庞波, 吴政秋, 等. 2022. 华南复杂地形下 GRAPES_Meso 3 km 对流尺度模式前汛期精细化降水预报评估 [J]. *大气科学学报*, 45(1): 99–111. Chen Jing, Pang Bo, Wu Zhengqiu, et al. 2022. Evaluation of fine-scale precipitation forecast of GRAPES_Meso 3km convective-scale model in early summer rainy season in South China under complex topographical conditions [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 45(1): 99–111. doi:10.13878/j.cnki.kqkxxb.20210308001
- 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析 [J]. *气象学报*, 71(3): 367–382. Chen Jiong, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, et al. 2013. Analysis of climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of MCSs over China during the warm season [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 71(3): 367–382. doi:10.11676/qxxb2013.035
- Chen Y R X, Wang X F, Huang L, et al. 2021. Spatial and temporal characteristics of abrupt heavy rainfall events over Southwest China during 1981–2017 [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(5): 3286–3299. doi:10.1002/joc.7019
- 董新宁, 吴遥, 黄安宁, 等. 2023. 川渝地区夏季极端降水日变化特征分析 [J]. *大气科学*, 47(2): 259–272. Dong Xinning, Wu Yao, Huang Anning, et al. 2023. Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 47(2): 259–272. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21032
- 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2020. 2008~2016 年重庆地区降水时空分布特征 [J]. *大气科学*, 44(2): 327–340. Fang Dexian, Dong Xinning, Deng Chengzhi, et al. 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008–2016 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 44(2): 327–340. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256
- Gan Y T, Li N N, Li J. 2019. Differences in the rainfall characteristics between Mount Tai and its surrounding areas [J]. *J. Meteor. Res.*, 33(5): 976–988. doi:10.1007/s13351-019-9006-0
- Guo Z Y, Fang J, Sun X G, et al. 2020. Decadal long convection-permitting regional climate simulations over eastern China: evaluation of diurnal cycle of precipitation [J]. *Climate Dyn.*, 54(3): 1329–1349. doi:10.1007/s00382-019-05061-z
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146: 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803

- Hu X L, Yuan W H, Yu R C. 2021. The extraordinary rainfall over the Eastern Periphery of the Tibetan Plateau in August 2020 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(12): 2097–2107. doi:10.1007/s00376-021-1134-7
- 黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2022. 2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响 [J]. *大气科学*, 46(4): 989–1001. Huang Chuhui, Li Guoping, Niu Jinlong, et al. 2022. Dynamic and thermal structure and topographic impact of the night torrential rainfall in Lushan, Sichuan on August 10, 2020 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 46(4): 989–1001. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.21205
- 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等. 2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用 [J]. *应用气象学报*, 33(6): 641–654. Huang Liping, Deng Liantang, Wang Ruichun, et al. 2022. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 33(6): 641–651. doi:10.11898/1001-7313.20220601
- Li N N, Li J, Rong X Y, et al. 2020. Obtaining more information about precipitation biases over East Asia from hourly-scale evaluation of model simulation [J]. *J. Meteor. Res.*, 34(3): 515–528. doi:10.1007/s13351-020-9147-1
- 李强, 邓承之, 张勇, 等. 2017. 1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究 [J]. *气象*, 43(9): 1073–1083. Li Qiang, Deng Chengzhi, Zhang Yong, et al. 2017. Study on spatio-temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980–2012 [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 43(9): 1073–1083. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.005
- 李强, 王秀明, 周国兵, 等. 2020. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究 [J]. *高原气象*, 39(5): 960–972. Li Qiang, Wang Xiuming, Zhou Guobin, et al. 2020. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall during southwest vortex rainstorm in Sichuan Basin [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 39(5): 960–972. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00096
- 李永华, 周杰, 何卷雄, 等. 2022. 2020 年 6~7 月西南地区东部降水异常偏多的水汽输送特征 [J]. *大气科学*, 46(2): 309–326. Li Yonghua, Zhou Jie, He Juanxiong, et al. 2022. Characteristics of water vapor transport associated with abnormal precipitation over the east of southwestern China in June and July 2020 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 46(2): 309–326. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21002
- Love B S, Matthews A J, Lister G M S. 2011. The diurnal cycle of precipitation over the Maritime Continent in a high-resolution atmospheric model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(657): 934–947. doi:10.1002/qj.809
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *J. Climate*, 29(24): 8703–8719. doi:10.1175/JCLI-D-16-0057.1
- 潘阳, 谷军霞, 徐宾, 等. 2018a. 多源降水数据融合研究及应用进展 [J]. *气象科技进展*, 8(1): 143–152. Pan Yang, Gu Junxia, Xu Bin, et al. 2018a. Advances in multi-source precipitation merging research [J]. *Advances in Met S&T* (in Chinese), 8(1): 143–152. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.019
- 潘阳, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 2018b. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验 [J]. *气象学报*, 76(5): 755–766. Pan Yang, Gu Junxia, Yu Jingjing, et al. 2018b. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 76(5): 755–766. doi:10.11676/qxxb2018.034
- Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al. 2015. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges [J]. *Rev. Geophys.*, 53(2): 323–361. doi:10.1002/2014rg000475
- 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展 [J]. *气象学报*, 78(3): 451–476. Shen Xueshun, Wang Jianjie, Li Zechun, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 78(3): 451–476. doi:10.11676/qxxb2020.030
- Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. 2020. Research and operational development of numerical weather prediction in

- China [J]. *J. Meteor. Res.*, 34(4): 675–698. doi:10.1007/s13351-020-9847-6
- 沈艳, 潘旸, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 [J]. *大气科学学报*, 36(1): 37–46.
- Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 36(1): 37–46. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.01.005
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119: 3063–3075. doi:10.1002/2013JD020686
- 师春香, 潘旸, 谷军霞, 等. 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展 [J]. *气象学报*, 77(4): 774–783.
- Shi Chunxiang, Pan Yang, Gu Junxia, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 77(4): 774–783. doi:10.11676/qxxb2019.043
- 唐文苑, 郑永光, 张小雯. 2018. 基于 FSS 的高分辨率模式华北对流预报能力评估 [J]. *应用气象学报*, 29(5): 513–523.
- Tang Wenyuan, Zheng Yongguang, Zhang Xiaowen. 2018. FSS-based evaluation on convective weather forecasts in North China from high resolution models [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 29(5): 513–523. doi:10.11898/1001-7313.20180501
- 王婧羽, 崔春光, 陈杨瑞雪, 等. 2022. 西南山区 5—8 月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征 [J]. *气象学报*, 80(1): 21–38.
- Wang Jingyu, Cui Chunguang, Chen Yangruixue, et al. 2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May–August [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 80(1): 21–38. doi:10.11676/qxxb2022.006
- 王鑫, 李跃清, 郁淑华, 等. 2009. 青藏高原低涡活动的统计研究 [J]. *高原气象*, 28(1): 64–71.
- Wang Xin, Li Yueqing, Yu Shuhua, et al. 2009. Statistical study on the plateau low vortex activities [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 28(1): 64–71.
- 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 Yuhua, Zhao Jing, Jiang Lijuan. 2010. Analysis on geography & physiognomy character of numerical model prediction performance [J]. *Torrential Rain Disaster* (in Chinese), 29(4): 322–327. doi:1004-9045(2010)04-0322-06
- 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍. 2017. 千米尺度分辨率下 GRAPES-Meso4.0 模式定量降水预报性能评估 [J]. *气象学报*, 75(6): 851–876.
- Xu Chenlu, Wang Jianjie, Huang Liping. 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 75(6): 851–876. doi:10.11676/qxxb2017.068
- 叶茂, 吴钲, 高松, 等. 2022. 多物理过程对流可分辨集合预报中不同方案在四川盆地东部降水预报效果评估 [J]. *气象*, 48(7): 840–855.
- Ye Mao, Wu Zheng, Gao Song, et al. 2022. Evaluation of precipitation forecasts with different parameterization schemes of multi-physical convection-permitting ensemble system in eastern Sichuan Basin [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 48(7): 840–855. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032502
- 宇如聪, 李建. 2016. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析 [J]. *气象学报*, 74(1): 18–30.
- Yu Rucong, Li Jian. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 74(1): 18–30. doi:10.11676/qxxb2016.011
- Yu R C, Li J, Chen H M, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. *J. Meteor. Res.*, 28(5): 877–902. doi:10.1007/s13351-014-3272-7
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L01704. doi:10.1029/2006GL028129
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007b. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L13703. doi:10.1029/2007GL030315

- 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 2020. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析 [J]. *高原气象*, 39(5): 935–946. Zhang Hongfang, Pan Liujie, Chen Haoming, et al. 2020. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 39(5): 935–946. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00067
- 张小雯, 唐文苑, 郑永光, 等. 2020. GRAPES_3 km 数值模式对流风暴预报能力的多方法综合评估 [J]. *气象*, 46(3): 367–380. Zhang Xiaowen, Tang Wenyuan, Zheng Yongguang, et al. 2020. Comprehensive evaluations of GRAPES_3km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 46(3): 367–380. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.008
- 周秋雪, 刘莹, 冯良敏, 等. 2015. 2008~2012 年四川强小时雨强的时空分布特征 [J]. *高原气象*, 34(5): 1261–1269. Zhou Qiuxue, Liu Ying, Feng Liangmin, et al. 2015. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of strong hour rainfall intensity in Sichuan during 2008–2012 [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 34(5): 1261–1269. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00070
- 周自江, 曹丽娟, 廖捷, 等. 2022. 水文气象信息概述: 观测、融合与再分析 [J]. *气象*, 48(3): 272–283. Zhou Zijiang, Cao Lijuan, Liao Jie, et al. 2022. Overview of hydrometeorological information: observation, data fusion and reanalysis [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 48(3): 272–283. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.022402