

2020 年超长梅雨期间新安江流域多模式降水预报评估

王丹, 余贞寿*

浙江省气象科学研究所, 杭州, 310008

提 要: 数值模式精细化的降水预报对流域的防汛防洪工作有重要的支撑作用。2020 年梅汛期持续强降雨导致新安江水库发生建成以来最大洪水事件且首次全面开闸泄洪。文章基于站点观测降水资料, 评估 4 个全球模式和 5 个区域模式对新安江流域降水和面雨量的预报性能, 并重点关注模式对流域降水的极端性和累积效应的预报能力, 以了解当下业务预报模式能否满足水库泄洪预报服务的需求, 此外, 还分析了地形高度对各模式降水预报的影响。结果表明: ①全球模式普遍低估降水, 且对极端降水的预报能力弱于区域模式; 区域模式对降水预报则多表现为偏高估计, 单模式间的离散度相对较大, 多模式预报的集合平均表现更佳。②区域模式对暴雨至大暴雨量级的降水预报表现较好, 但对其落区和发生时间上存在一定偏差。③相较于模式单日降水的预报评估, 综合考虑模式预报降水的累积效应和极端性对水库泄洪预报更具指示意义。④地形高度对各模式预报暴雨及以上量级的极端降水有较为明显的影响, 随地形升高, 区域模式预报优势得以体现, 尤其是浙江省中尺度数值预报业务系统和浙江快速更新同化预报系统, TS 评分由不足 0.1 提高到 0.15 左右; 而全球模式对暴雨及以上量级的预报能力下降, 中雨及以下量级的降水受地形影响不显著。

关键字: 新安江流域, 梅雨期降水, 多模式, 地形高度, 检验评估

10.7519/j.issn.1000-0526.2025.010202

Evaluation of multi-models forecast of precipitation in Xin'an River Basin during the ultra-long Meiyu in 2020

WANG Dan¹, YU Zhenshou¹

¹ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract: The continuous heavy rainfall during the Meiyu season in 2020 (May 29 to July 17) led to event since the construction of the Xinanjiang Reservoir and the first time that all the sluices were fully opened. Refined precipitation forecasts are of great support to flood control efforts in the basin. Based on observed precipitation data from various stations, this study examines the

作者简介 王丹, 主要从事降水和数值模式评估研究. E-mail: 465486434@qq.com

***通讯作者** 余贞寿, 主要从事数值预报和台风研究. E-mail: yuzhenshou@163.com

资助项目 浙江省气象科技项目 (2020ZD06、2022ZD14、2023ZD14) 和浙江省自然科学基金气象联合基金资助项目 (ZJMA23D50007) 共同资助

forecast performance of four global models and five regional models regarding both overall precipitation patterns and area-specific rainfall within Xin'an River Basin. Additionally, it focuses on evaluating the predictive capabilities of these models regarding extreme and cumulative precipitation effects in the basin to determine whether they can meet the demand of reservoir flood discharge forecasting service. Furthermore, an analysis is conducted to assess how topographic height influences each model's precipitation forecasts. The results show that: (1) The global model consistently yielded lower precipitation forecast results compared to the regional model. The regional model exhibited high accuracy but had relatively large variability among its predictions. The regional multi-model ensemble average demonstrated superior forecast performance than single model results. (2) The regional model performed well in forecasting rainfall ranging from rainstorm to heavy rainstorm; however, there were some discrepancies in predicting the magnitude and timing of heavy rainstorms. (3) Compare to forecast evaluation of single-day precipitation in models it is more instructive to comprehensively consider the cumulative effects and extreme of precipitation predicted by the models. (4) Topographic height significantly influences extreme rainfall prediction for heavy rainfall events and above. As topographic height increases, the advantage of using a regional model becomes evident while the predictive ability of a global model for heavy rainfall events decreases. Especially for ZJWARMS and ZJWARRS, the TS score has increased from below 0.1 to approximately 0.15. Additionally, moderate or lighter intensity rains do not exhibit significant prediction effects.

Key words: Xin'an River Basin, precipitation in Meiyu, multi-models, topographic height, evaluation

引言

梅雨指每年 6 到 7 月间发生在江淮流域的连续阴雨天气,期间的异常降水是影响江淮地区发生干旱或洪涝的主要原因(张庆云和郭恒, 2014; Pan et al, 2021),对当地的社会经济发展造成重要影响。2020 年梅雨呈现出入梅早、出梅晚、梅雨期长、雨区范围广、累积降水量大、强降水过程多的特点(刘芸芸和丁一汇, 2020),是自 1961 年来江淮流域夏季降水最强的一次(Wei et al, 2020)。连续不断的强降水导致中国长江中下游水位长期超警,给当地造成严重的经济损失,引起社会广泛关注(Ye and Qian, 2021),与此同时,学者们也针对此次超长梅雨事件的成因和影响机制从多个角度进行了分析和研究(刘芸芸和丁一汇, 2020; 陈涛等, 2020; Liu et al, 2020; Ye and Qian, 2021; Zhou et al, 2021; Tang et al, 2022; Ma et al, 2022; Lu et al, 2022)。一方面,从大气环流变化角度来看,刘芸芸和丁一汇(2020)的研究表明东亚季风区内多个关键大气环流系统的准双周振荡和欧亚中高纬“两脊一槽”型环流是造成 2020 年梅雨异常偏强的主要因素。Zhou et al (2021)认为 2019 年秋季在南印度洋自东向西缓慢移动的海洋罗斯贝波是 2020 年梅雨异常偏多的重要原因。Liu et al (2020)指出北大西洋涛动和中纬度冷空气次季节尺度变化的影响是造成 2020 年持续性“暴力梅”事件的成因之一。另一方面,从气候变化和人为强迫角度来看, Ye and Qian (2021)对“暴力梅”事件归因研究发现,气候变化影响导致 2020 年“暴力梅”事件发生概率增加了近 5 倍。Yang et al (2022)的研究认为人为气溶胶排放的减少对 2020 年长江流域夏季破纪录降水有重要贡献。

在全球气候变化的影响下,极端降水事件的频率和强度与日俱增,对流域径流的影响也在加剧(Blair and Sanger, 2016)。研究表明,流域内持续不断的极端暴雨天气是水库泄洪最直接的因素(Zhang et al, 2004; Furey and Gupta, 2005; 刘洪韬等, 2010)。针对流域降水预报,也有不少学者进行了相关的评估研究(周慧等, 2010; 刘永和等, 2013; 朱占云等, 2016; 祁海霞等, 2020; 宋雯雯等, 2021; Li et al, 2021; 卜文惠等, 2022)。例如,周慧等(2010)利用国家气象中心 T639 模式和 NCEP 模式对长江流域的降水天气过程进行预报检验,结果表明模式对一般降水的预报能力较好,但对暴雨预报稍差。谈丰等(2012)利用高分辨率的区域气候模式对淮河流域降水进行模拟评估,认为模式能很好模拟出流域降水的年际变化和空间分布特征,其中对年降水量的模拟效果最佳,但对降水强度和大雨日数的结果稍差。朱占云等(2016)利用多模式客观集成预报结果对浙江地区六大水库梅雨期降水的面雨量进行预报评估,发现其对不同降水类型造成的各流域的面雨量预报效果差别较大。陈光舟等(2021)基于多种模式的预报结果分别制作了集成面雨量预报产品和单一模式面雨量预报产品,并评估检验各面雨量预报产品对 2013-2016 年汛期期间滁河流域面雨量的预报能力,发现多种模式的集成产品预报效果优于单一模式的产品,但集成预报对弱降水过程的预报优势不明显。上述研究表明,气象数值预报模式对流域降水预报、尤其是对大雨及以上量级的降水预报尚存有一定的不确定性,而当下亟需更多个例检验来评估模式降水预报不确定性能否满足当前流域洪涝预警及防洪需求,评估研究也能为今后气象模式产品更好地释用于流域洪涝预报服务及防洪减灾工作做好前期铺垫及事后案例的检验性分析。

本文以 2020 年超长梅雨期间新安江流域的降水过程为例,评估检验业务预报常用的全球模式和区域模式的降水预报能力,及当前模式预报性能与新安江水流域复杂下垫面之间的联系,以期提高模式预报产品在流域预报服务中的适用性,同时也为改进模式对该区域流域降水精细化预报预警提供有意义的参考。

1. 数据与方法

1.1 研究区域

新安江流域地跨两省，发源于安徽省黄山市休宁县境内，汇集于浙江省淳安县，最后经建德市汇入钱塘江（图 1a 所示区域）。通常，上游流域的产流流量和累积面雨量能直接影响下游水库坝址区的防汛抗旱、水库调度等决策（刘洪韬等，2010；包红军等，2021），位于浙江省杭州市淳安县的新安江水库属于国家一级水源地，总库容接近 220 亿 m^3 ，控制流域面积占 1.1 万 km^2 ，是华东地区最大的水库，同时，它也是浙江省内重要的大型水电站，在钱塘江流域的防洪度汛中起到关键作用。

新安江流域位于江淮梅雨带最南端，受梅雨降水影响显著。新安江水库自 1959 年建成运营以来共经历了 7 次开闸泄洪，其中以 1996 年、1999 年和 2020 年较为严重（孙彭龄和侯翠香，1998；周黔生等，2001；陆小勇等，2020）。对新安江流域降水的精准预报预警服务能为防范洪水灾害、保护下游流域人民生命财产安全提供重要的决策依据。目前，应用于气象业务的数值模式不论是在分辨率还是观测资料的同化频率上较之前都有了较大提升，并在极端性暴雨预报中发挥重要作用（漆梁波，2015；王丹和余贞寿，2023），开展业务数值模式对流域降水的预报能力评估，有助于提升模式预报服务水库泄洪预警的科技支撑能力。

1.2 数据说明

预报数据为 2020 年 5 月 29 日到 7 月 17 日期间的 9 个数值模式的降水预报产品，包括：欧洲中期天气预报中心（ECMWF），美国国家环境预报中心全球预报系统（NCEP-GFS）、日本气象厅全球谱模式（JMA-GSM）和中国气象局全球区域一体化同化预报系统—全球数值预报系统（CMA-GFS），共 4 个全球模式；以及中国气象局中尺度天气数值预报系统（CMA-MESO 和 CMA-3KM）、中国气象局上海数值预报模式系统（CMA-SH9）、浙江省中尺度数值预报业务系统（ZJWARMS）和浙江快速更新同化预报系统（ZJWARRS），共 5 个区域模式（详见表 1）。值得一提的是，CMA-GFS、CMA-MESO、CMA-3KM 均是基于中国自主研发的多尺度通用数值天气预报系统（原 GRAPES）一体化发展而来，其中 CMA-MESO 和 CMA-3KM 的主要差异是水平分辨率不同；CMA-SH9、ZJWARMS 和 ZJWARRS 则是基于 WRF-ADAS 框架发展而来，其中 CMA-SH9 较其余两个模式具有更广的覆盖范围，ZJWARRS 是基于 ZJWARMS 发展得到的 3h 快速更新循环同化系统，它们在预报时效、同化更新频次上有差异。观测数据选择新安江全流域（后文简称为 XinAJ）内的 190 个国家基本气象站和一般站的降水、海拔高度和经纬度数据，包括新安江流域安徽部分（后文简称为 XRAH）的 91 个站点和新安江流域浙江部分（后文简称为 XRZJ）的 99 个站点。研究时段内的日降水量统一界定为前日 08 时至当日 08 时（北京时）的 24 h 累积值。

表 1 模式的基本信息介绍

Table 1 Description of the basic information about nine weather prediction models

模式名称	覆盖区域	水平分辨率	评估采用的 预报时效/h	模式资料来源
ECMWF	全球	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$	24, 48, 72	https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/open-data
NCEP-GFS	全球	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	24, 48, 72	https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/
JMA-GSM	全球	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	24, 48, 72	https://www.wis-jma.go.jp/cms/gsm/
CMA-GFS	全球	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	24, 48, 72	气象大数据云平台（天擎）

CMA-MESO	区域	0.1°×0.1°	24, 48, 72	气象大数据云平台(天擎)
CMA-3KM	区域	0.03°×0.03°	24	气象大数据云平台(天擎)
CMA-SH9	区域	0.09°×0.09°	24, 48, 72	气象大数据云平台(天擎)
ZJWARMS	区域	0.03°×0.03°	24, 48, 72	气象大数据云平台(天擎)
ZJWARRS	区域	0.03°×0.03°	24	气象大数据云平台(天擎)

1.3 方法介绍

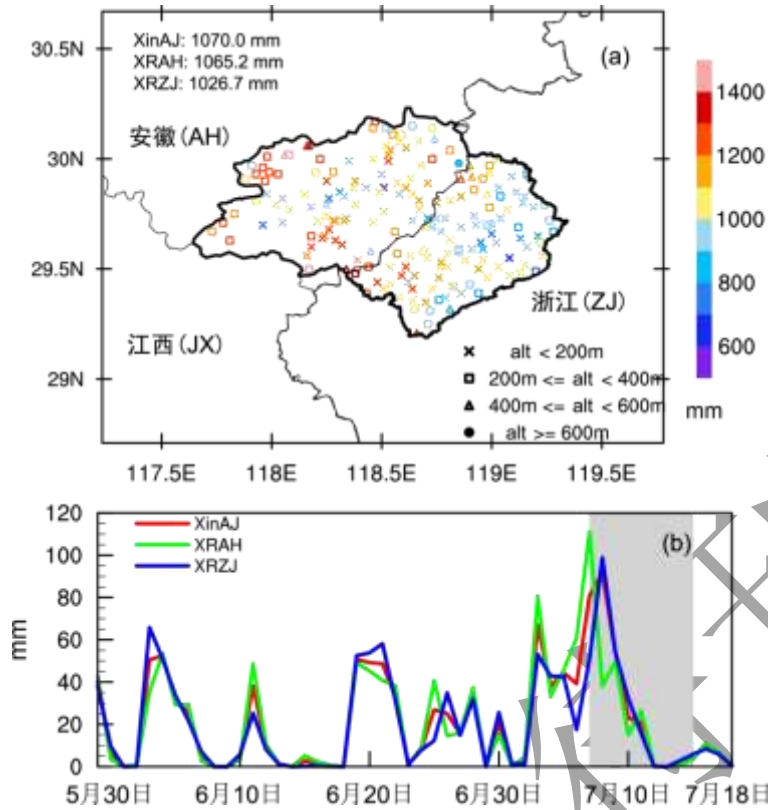
2. 面雨量作为表征区域或流域内平均降水强度的关键参数，在洪水预警与水库调度决策中具有重要的应用价值（江锦红和邵丽萍，2010；韩俊太等，2022；任智慧等，2023）。本研究中的面雨量计算如下：首先利用最邻近插值法将各模式预报的网格点数据产品插值至流域内 190 个观测站点上，再分别计算 XinAJ、XRAH 和 XRZJ 三个区域的观测和模式预报的算术平均面雨量。对于站点降水的预报评估，主要利用传统的点对点客观检验评分方法对模式预报水平进行定量的比较分析，评估指标基于美国大气研究中心的模式评估工具 Model Evaluation Tools(Opatz et al, 2022)计算，包括 TS 评分、空报率(FAR)、命中率(POD)等，以及空间相关系数(CC)和标准差(STD)等常规统计量。**结果**

分析

相较于历史，2020 年的梅雨季呈现入梅早、出梅晚、总降水量偏多、极端性偏强的特点（陈涛等，2020）。新安江流域在此期间先后经历了多轮强降水事件，整体呈现一个多雨阶段的气候特征，水库坝址以上的流域累积面雨量是常年梅雨量的 3.2 倍（陆小勇等，2020）。

2.1 新安江流域降水实况

在实况的空间分布图中（图 1a），全流域梅汛期累积降水量普遍超过 800 mm，尤其在流域西部、西南偏南侧以及西北一带山地起伏明显地区，出现了 1000~1400 mm 的高值区，占站点自身全年总降水量 50%以上。在流域面雨量的日均序列变化中（图 1b），除 6 月 3 日 XRZJ 区域的面雨量显著高于 XRAH 区域外，后续降水峰值集中于 XRAH 区域之内；6 月 18 日起各子区域的日面雨量持续超过 30 mm，导致流域内土壤含水量饱和，为下游区的大量产流提供了有利条件；7 月 2 日起流域内的降水表现出更高的强度和更长的持续时间，其中发生在 XRAH 的两次日面雨量峰值都明显超前和高于发生在 XRZJ 的，在新安江水库泄洪的前一天（7 月 7 日），XRAH 日面雨量峰值达到最高，而 XRZJ 和 XinAJ 的日面雨量最大峰值则出现在 7 月 8 日。这与图 2 中出现大暴雨及以上量级降水（日降水量≥100 mm）的站点分布变化特征一致，在图 2 中，6 月 3 日的 23 个站点集中分布在 XRZJ 南部，后续强降水中心北移至 XRAH 区域；7 月 7—8 日发生大暴雨的站点数达到最大（7 日 XRAH 区域 56 个站点，8 日 XRZJ 区域 46 个站点）。与之相应地，新安江水库自 7 日 10 时起逐步从开 3 孔泄洪，到 12 时开 5 孔、16 时开 7 孔，至 8 日上午 9 时开 9 孔泄洪。随后降水逐渐减弱，泄洪口也次第关闭，至 7 月 14 日 15 时全部关闭，新安江水库完成泄洪，7 月 18 日，梅雨季结束。



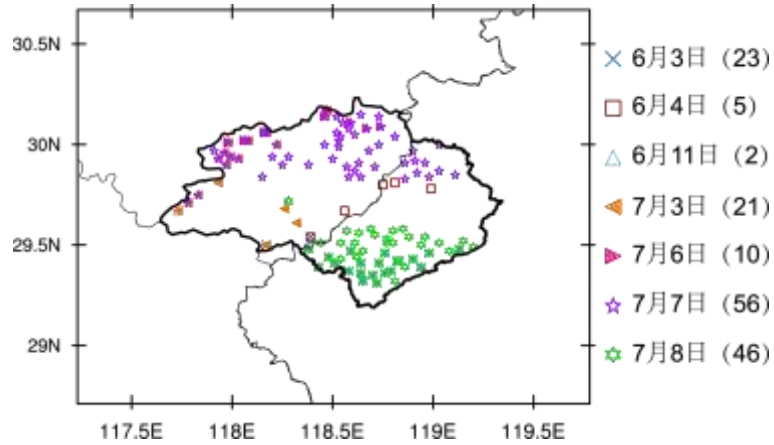
注：图 a 中不同符号示意海拔高度 H，图 b 中灰色区域表示新安江水库开闸泄洪时段。

图 1 2020 年梅雨期间新安江流域的降水实况

(a) 不同海拔高度站点的梅雨期累积降水，

(b) 流域各部分日均面雨量的时间序列

Fig. 1 Precipitation in Xin'an River Basin during Meiyu period in 2020 (unit: mm). (a) Distribution of total cumulative precipitation at each station, with different symbols representing stations at different altitudes (alt). (b) Daily cumulative area rainfall time series diagram, the red solid line, green solid line and blue solid line represent the area rainfall of Xin'an River basin (XinAJ), Xin'an River basin in Anhui Province (XRAH) and Xin'an River basin in Zhejiang Province (XRZJ), respectively; the gray area represents the flood discharge period of Xinanjiang reservoir.

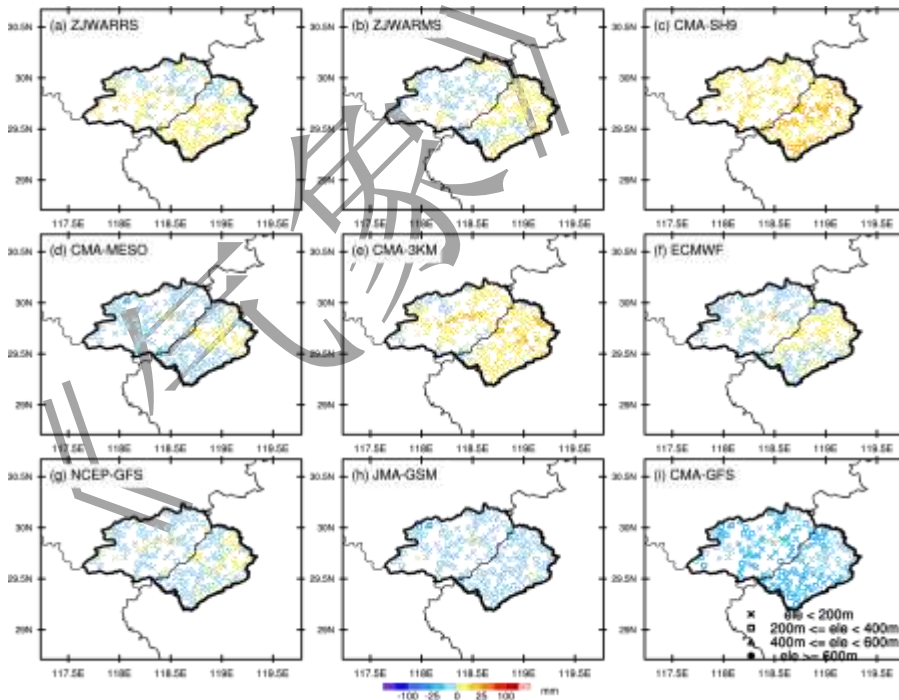


注：不同颜色的符号表示不同日期出现大暴雨量级降水的站点，括号内数字为站点数。

图 2 2020 年梅雨季期间日降水量 ≥ 100 mm 的站点分布

Fig. 2 Station distribution of extreme rainfall with daily precipitation exceeding 100 mm during the Meiyu rainy season in 2020. Different color symbols represent stations with extreme rainfall at different time periods, and the numbers in brackets are the number of stations counted.

2.2 多模式对新安江水库区降水特征的预报评估

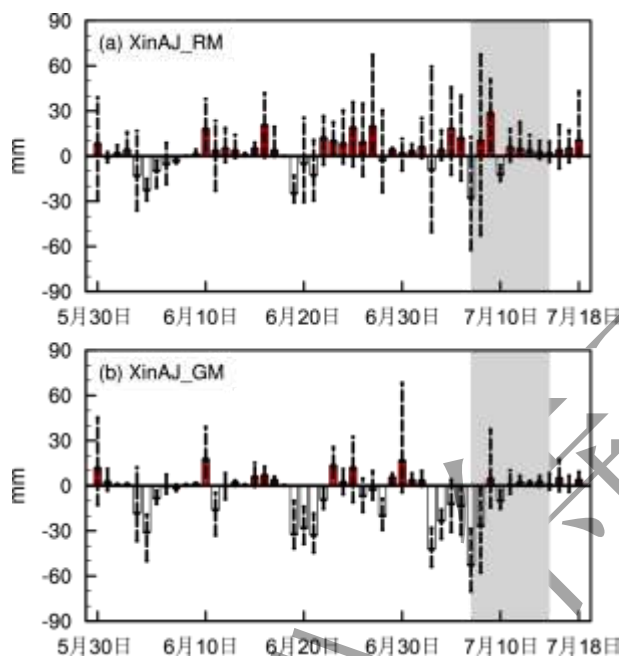


注：不同符号标注站点海拔高度 H 。

图 3 9 个模式对 2020 年梅雨季期间各站点总累积降水量的 24 h 预报与观测的偏差分布(预报减观测, 填色)

Fig. 3 Deviation distribution (predicted minus observed, filled color) with the 24 h forecast and observation of total accumulated precipitation at each station during the Meiyu rainy season in 2020 for 9 models.

图 3 揭示了不同模式累积降水预报偏差的空间分布差异。其中，区域模式 CMA-SH9 和 CMA-3KM 呈现全流域高估表现（部分站点降水偏差 ≥ 25 mm），而全球模式 CMA-GFS 和 JMA-GSM 明显低估了梅雨期间的总降水量；全球模式 ECMWF、NCEP-GFS 及区域模式 CMA-MESO、ZJWARMS 除了在流域东部（XRZJ 区域）出现 ≤ 10 mm 的弱正偏差外，其余大部分地区仍表现为 10 mm 量级的负偏差；此外，快速更新同化模式 ZJWARRS 主要在全流域北部预报结果偏低，而中部、南部预报结果偏高。



注：柱状表示多模式平均值，柱状中的虚线表示多个模式偏差结果的最大、最小范围，灰色区域表示新安江水库开闸泄洪时段。

图 4 2020 年梅雨季期间 (a) 区域模式 (b) 全球模式的 24 h 预报与观测的全流域 (XinAJ) 日面雨量偏差时间序列

Fig. 4 Time series of deviation of daily area rainfall (unit: mm) between 24 h prediction of different forecasting model and observation during the Meiyu rainy season in 2020

逐日偏差序列图 (图 4) 中，区域模式的多模式平均在 80% 的时段呈正偏差，而全球模式在 6 月 2 日、20 日及 7 月 7 日等关键降水峰值时段均超过 -30 mm 的负偏差，表明其对极端降水过程的捕捉能力不足。此外，从单个模式预报的偏差离散度来看，区域模式虽在多模式平均结果上呈现持续的正偏差 (尤其是 6 月 20 日之后的增幅显著)，但单模式之间的离散度较大、不确定性较高；反观全球模式，其在流域内的偏差离散度小于区域模式，且各模式正负偏差方向基本一致。综上，全球模式的负偏差主要源于对日降水量 ≥ 50 mm 的极端降水事件的偏低估计，而区域模式中，单模式间的预报结果差异相对较大，多模式平均的预报表现更佳。延伸期 (48 h、72 h 预报时效，图略) 预报结果表明，区域模式的偏差随预报时效呈明显增长趋势，单个模式的偏差离散度也更大，而全球模式的预报结果在延伸期内表现更为稳定。

与此同时，以全流域 (XinAJ) 的 24 h 预报为例，不同预报时效下面雨量预报与观测的时空相关性差异表明，区域模式的相关系数 (0.68~0.82) 整体优于全球模式 (0.52~0.81)。

区域模式中, CMA-3KM (0.82) 和 CMA-SH9 (0.81) 表现最佳, 其中, 基于 GRAPES 发展的 CMA-MESO 和 CMA-3KM 与观测结果的相关性要优于基于 WRF 发展的 ZJWARMS 和 ZJWARRS 与观测的相关性; 3km 高分辨率的 CMA-3KM 相较 10 km 分辨率的 CMA-MESO 相关系数提升了 25%, ZJWARRS (0.66) 和 ZJWARMS (0.58) 的结果表明提高观测资料的同化频次也对提升模式的预报水平有正反馈影响; 此外, 可能是受区域模式预报范围影响降水预报质量的原因 (Yu et al, 2022), 具有更广的覆盖范围的 CMA-SH9 与观测的相关性明显优于 ZJWARMS 的。全球模式中, NCEP-GFS (0.81) 和 JMA-GSM (0.76) 表现突出, 而 CMA-GFS (0.52) 显著偏低。值得注意的是, 随预报时效的增加, 全球模式和区域模式的相关系数都出现了不同程度的衰减, 其中 CMA-GFS 的相关系数衰减最慢, 在 48 h 的提前量下还略微有提高; 至 72 h 预报时效, 仅 NCEP-GFS、JMA-GSM、CMA-SH9 和 CMA-GFS 模式的相关系数依旧超过 0.5, 其中全球模式占三个, 可见全球模式有更长时间的可预报性。

2.3 多模式对新安江水库区降水预报的定量评估

图 5 定量揭示了模式对不同量级降水的预报技能差异。梅汛期流域内大部分站点都有 ≥ 0.1 mm 量级的降水发生, 随着降水量级的提高, 站点数逐渐减少, 到大雨量级 (≥ 25 mm) 时, 已经能较明显地区分出几次区域性强降水过程, 其中 7 月 2 日起极端降水强度显著增强, 大暴雨量级 (≥ 100 mm) 的站点集中发生在 7 月的几次暴雨过程中。

小雨量级降水预报表明 (图 5a), 各模式对发生降水事件的预报能力较强, 但存在阶段性漏报现象。例如, 区域模式 ZJWARMS 和 ZJWARRS 在 6 月 7 日、以及 CMA-SH9 和全球模式 CMA-GFS 在 6 月 12 日出现明显低估和漏报的情况。在降水间歇期 (例如: 6 月 2—3 日、6 月 8—9 日), 各模式也出现了不同程度的空报现象。中雨量级的降水预报中 (图 5b), 全球模式 CMA-GFS 存在明显漏报现象, CMA-MESO 在 6 月 7 日前后和 7 月 10 日前后也有接近 100 站点数的负偏差, 而 CMA-3KM 的结果与观测较为接近, 站点数没有明显的正负偏差表现。在大雨及以上量级 (≥ 25 mm) 的预报中 (图 5c, 5d), CMA-GFS 依旧为明显的负偏差; CMA-MESO 的结果依旧是以负偏差为主, 表明 CMA-MESO 能反映出几次生消起伏的降水过程, 但对每次降水的强度预报不足; CMA-3KM 的预报结果正负偏差交替出现, 说明该模式对降水过程的预报可能存在系统性偏移, 模式能预报出不同强度的降水, 但在具体发生时间上存在一定偏差。

在 WRF 系列的三个区域模式中, ZJWARMS 在梅汛期前期小到中雨量级的站点数基本为负偏差, 而梅汛期末期偏差转为正, 表明该模式对降水的极端性有较好的预报能力, 而对小雨、中雨量级的降水表现稍弱; 与之对应的, ZJWARRS 的结果在中到暴雨量级的站点数偏差主要表现为负偏差, 在梅汛期末期偏差为正, 表明通过 3 h 一次的快速循环同化后, ZJWARRS 对降水预报有明显的提升。CMA-SH9 在中雨及以上量级降水中都有明显的偏高估计, 且空报率较高。此外, 全球模式 ECMWF、NCEP-GFS 和 JMA-GSM 更多呈现负偏差的现象, 尤其是对 7 月 3—9 日的暴雨到大暴雨量级的降水 (图 5d, 5e), 没有预报出发生该降水量级的站点。

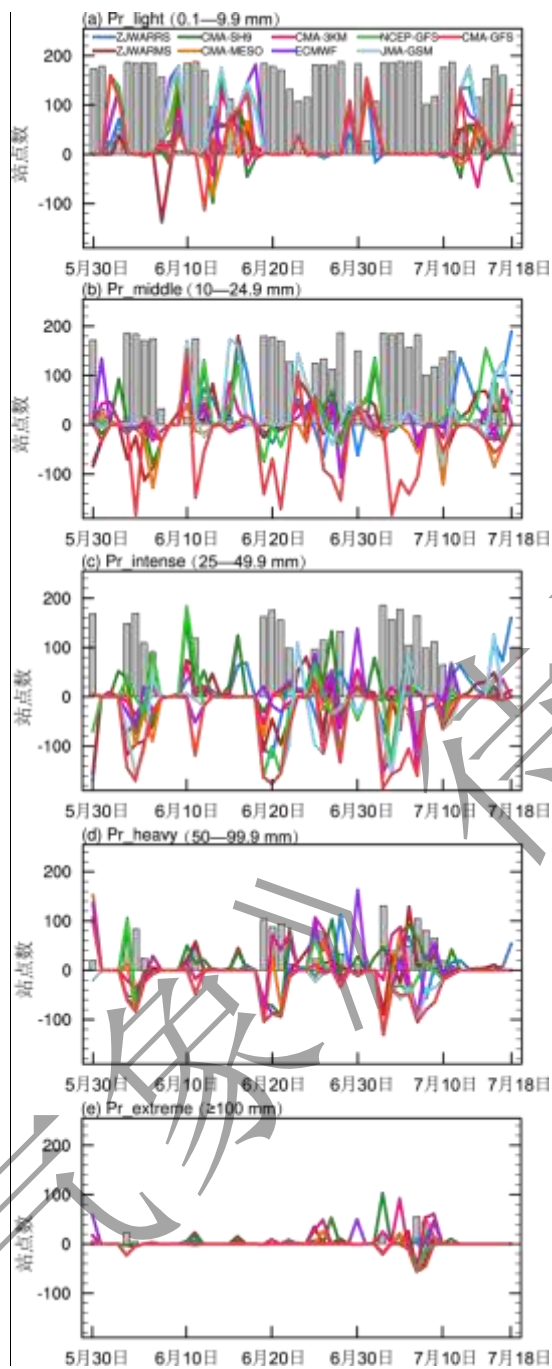


图 5 2020 年梅雨季期间不同量级日降水量站点数（灰色柱状）的观测值及其与不同模式的预报偏差（彩色折线）

Fig. 5 Temporal variations of the number of stations with different precipitation intensity during the 2020 Meiyu season (gray bars), and the deviation from different models' forecasts (colored lines).

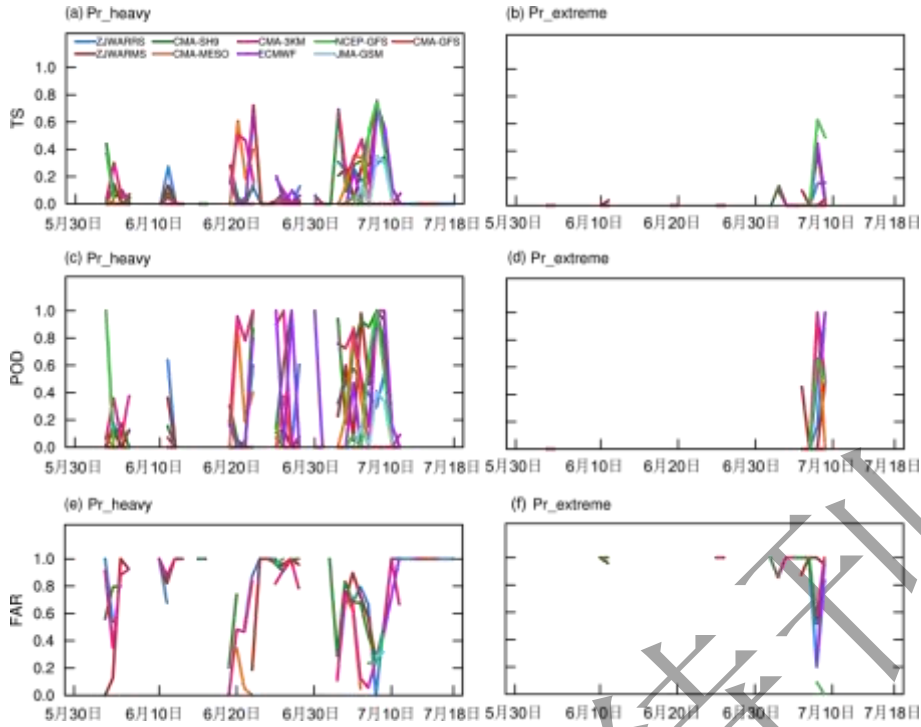


图 6 2020 年梅雨季期间大雨 (Pr_heavy) 和大暴雨量级 (Pr_extreme) 降水的各模式预报评分

Fig. 6 The statistical score results of heavy rain (Pr_heavy) and extreme rain (Pr_extreme) during the 2020 Meiyu

此外，不同检验评分也表现出一致的对应关系，即在全流域内发生大范围有效降水的时候，模式呈现高 TS 评分和低 FAR 评分（图略）的表现，预报效果较好；反之，在全流域弱降水时段，则对应较低的 TS 评分和高的 FAR 评分。基于流域防洪安全的重点需求，本节重点分析各模式对暴雨至大暴雨量级的预报性能差异（图 6）。暴雨量级下，TS 评分在强降水集中期（6 月 20 日之后）有明显提升，部分模式结果接近 0.8，例如：区域模式的 ZJWARMS、CMA-3KM、CMA-MESO、CMA-SH9，以及全球模式中的 ECMWF 和 NCEP-GFS 等。结合各模式的 POD 和 FAR 评分表明，NCEP-GFS 在 6 月 2 日和 7 月 2 日左右的两次连续暴雨过程中有较好的 POD 评分表现，预报准确率较高；其次是 ECMWF，在几次连续的暴雨过程中 POD 都接近 0.6，但 FAR 均超过 0.5；区域模式 ZJWARMS、CMA-SH9、CMA-MESO 和 CMA-3KM 的 POD 和 FAR 评分在几次连续暴雨过程中都有较明显的波动表现，可见区域模式对暴雨发生的具体落区预报不够稳定。大暴雨量级下的降水集中发生在开闸泄洪前（7 月 7—9 日）的多日连续性极端降水中，TS 评分表现最优的是全球模式的 NCEP-GFS（0.6）和 ECMWF（0.4），其次是区域模式 CMA-3KM、CMA-MESO 和 CMA-SH9（ ≥ 0.4 ）；此外，较高的 POD 和低的 FAR 的评分表现反映出，各模式对 8 日的极端降水预报较好，但都过高估计了 9 日的降水。此外，结合各模式日降水量超过 100 mm 的大暴雨量级的站点分布情况（图略）和图 2 可发现，各模式对多次强降水过程中大暴雨量级的降水站点分布呈现出不同程度的偏差，未能较好地再现出大暴雨事件发生的时空分布特征。可见，单纯依靠模式日降水的预报还不能满足对流域面雨量的预报服务需求。

2.4 多模式对新安江流域降水的极端性和累积效应评估

在流域的产流预报中，降雨的累积效应和降雨强度共同影响着流域流量的变化，被作为山洪灾害预警标准的双重指标（江锦红和邵利萍，2010）。因此，本节继续从流域降水的极端性和累积效应双重维度评估模式预报产品的指示价值。

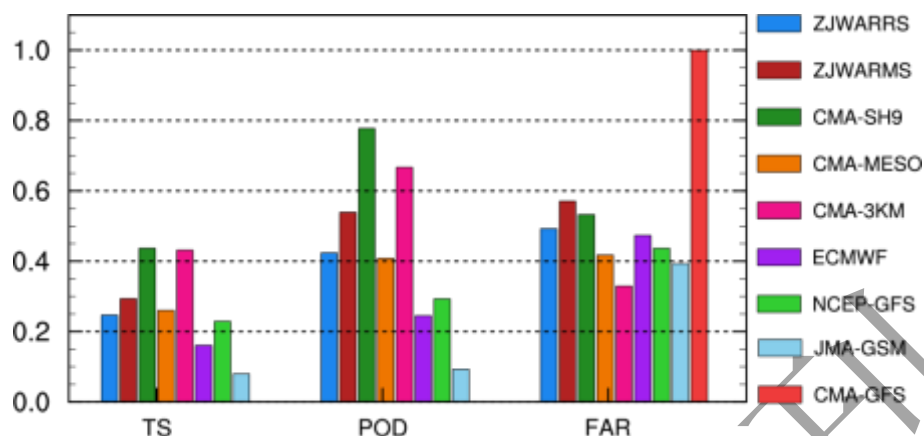
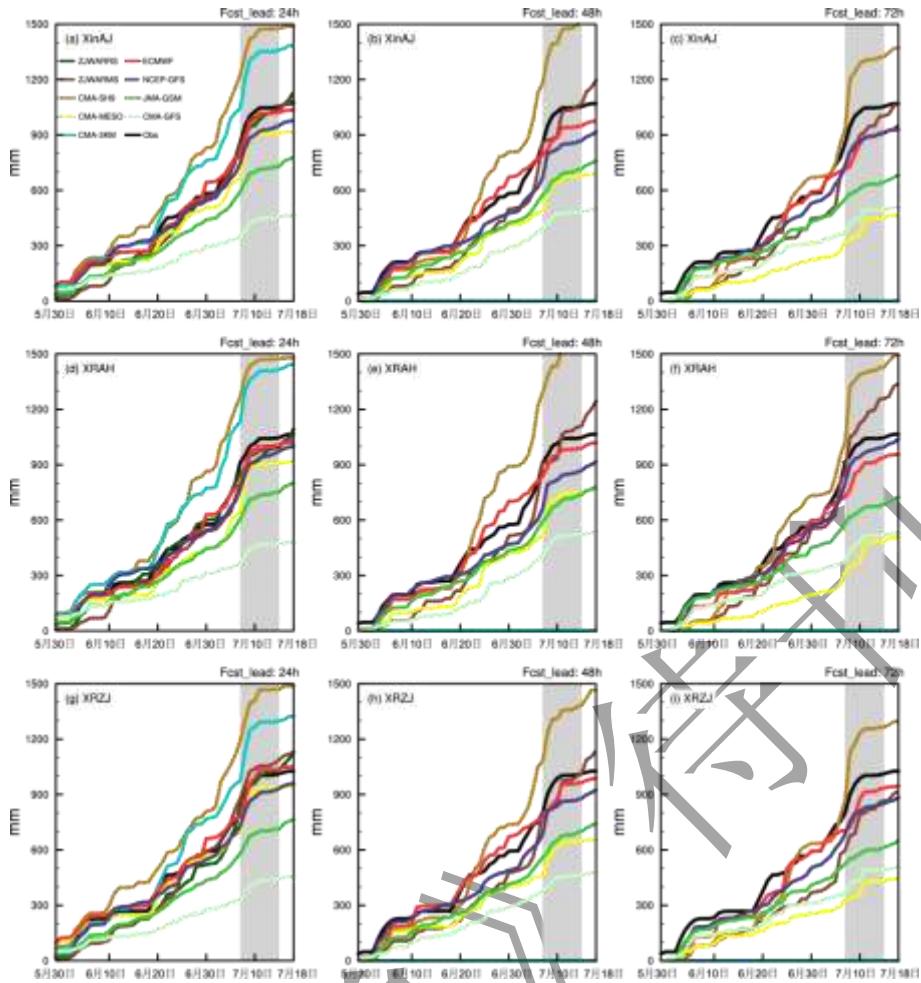


图 7 2020 年 7 月 3—8 日各模式（）对暴雨量级降水的 24 h 时效预报结果的平均 TS、POD 和 FAR 评分

Fig. 7 The average TS, POD, and FAR scores of the 24 h forecast results of heavy rainfall for each model from July 3 to 8, 2020

考虑到 7 月 3—8 日的暴雨过程持续时间较长、范围较广，对 8 日的开闸泄洪决策起了关键性的影响，因此本节以此次暴雨过程为例讨论各业务模式对极端降水的预报能力。针对此次持续暴雨过程（图 7），区域模式展现显著的预报优势，例如，CMA-SH9 的 TS 评分达 0.45（POD=0.78），仅 FAR 评分表现稍逊（0.55）；CMA-3KM 的 TS 评分（0.44）、POD 评分（0.67）和 FAR 评分（0.33）表现均衡。比较而言，全球模式对极端降水的预报则表现不佳，例如，全球模式中表现最佳的 NCEP-GFS 的 TS 评分 0.23（POD=0.48，FAR=0.45），低于区域模式的中位数水平。此外，本节进一步比较了不同模式对流域逐日累积面雨量的预报情况（图 8）。流域的累积面雨量演变主要呈现三阶段特征，即第一阶段的初始累积期（5 月 29 日至 6 月 18 日），面雨量的累积曲线上升相对缓慢，这其中 6 月 10—18 日间的累积曲线趋于平缓、基本停滞，对应图 1b 的降水量时间序列在此期间的日面雨量不足 10 mm、其中 XRZJ 的雨量基本为零；第二阶段的加速累积期（6 月 19 日至 7 月 2 日），累积曲线出现一次攀升，曲线斜率高于第一阶段，对应图 1b 和图 2 也能看出在此阶段流域出现多次连续降水，超过 100 mm 的站点降水集中在 XRAH；第三阶段的雨量爆发期（7 月 3—9 日），此时曲线斜率达到最大，对应流域内面雨量攀升，导致新安江水库于 7 日开闸泄洪，逐渐增开至 9 孔，随着曲线平缓泄洪口逐渐关闭，最终于 14 日完全关闭、泄洪结束（陆小勇等，2020）。



注：灰色区域表示新安江水库开闸泄洪时段

图 8 2020 年梅雨季节期间观测和各模式不同时效预报的流域逐日累积面雨量分布（单位：mm）

Fig. 8 The cumulative distribution of observed and predicted by each weather prediction model daily areal rainfall during the Meiyu rainy season in 2020 (unit: mm)

如图 8 所示，各区域模式均能较好刻画累积面雨量的三个阶段特征。CMA-SH9 自首阶段即呈现高估，第二阶段增速已接近实况第三阶段水平，导致过程累积雨量显著高于实况（峰值达 1500 mm）；CMA-3KM 次之，自第二阶段起其累积曲线与 CMA-SH9 基本平行，但量级略低；ZJWARRS、ZJWARMs 和 CMA-MESO 与实况吻合度较高，其中 CMA-MESO 略低估。CMA-SH9 和 CMA-3KM 虽能较好反映累积过程时间演变特征，但因过程降水量系统性偏大导致累积量显著高估，所以预报效果逊于 CMA-MESO 和 ZJWARRS。此外，除 ZJWARRS 和 CMA-3KM（仅提供 24 h 预报结果）外，各区域模式累积曲线随预报时效提前（图 8a~8c）呈发散特征。CMA-SH9 在 48 h 和 72 h 的预报中始终维持高速的累积态势，而 CMA-MESO 随预报时效由 72 h 缩短至 24 h，其累积曲线逐渐逼近实况，区域模式临近预报对降水量的调整更趋合理。全球模式方面，CMA-GFS 和 JMA-GSM 明显低估流域累积面雨量，未达泄洪预警阈值，且预报技巧随时效临近未见改善；NCEP-GFS 和 ECMWF 在 24 h 预报中与实况最为接近，但在 48~72 h 预报中自第二阶段起明显低估，均未能再现第三阶段极端降水引发的面雨量陡增特征。

2.5 地形高度对降水预报的影响

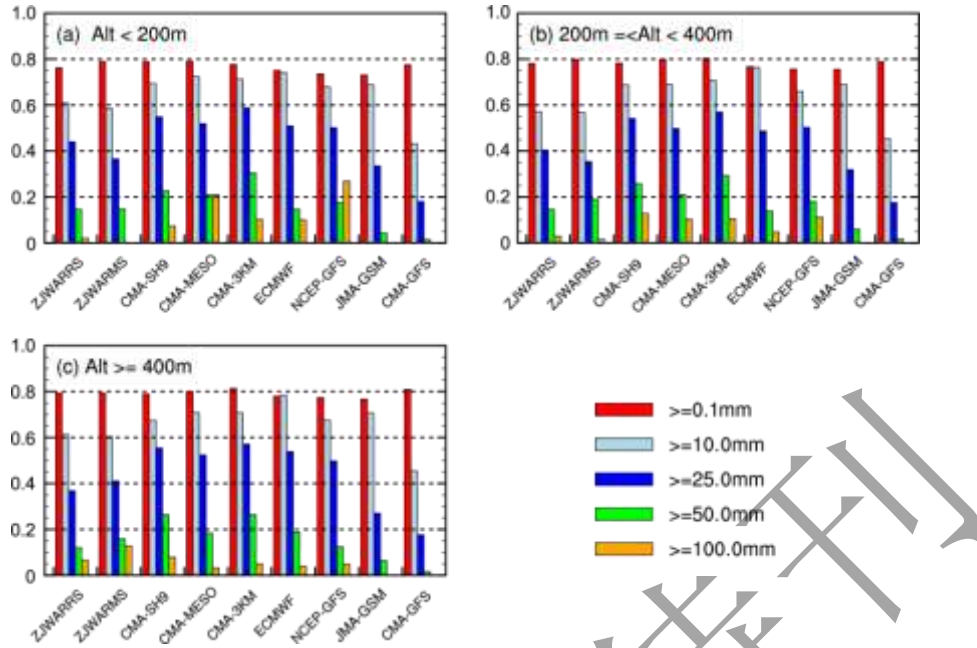
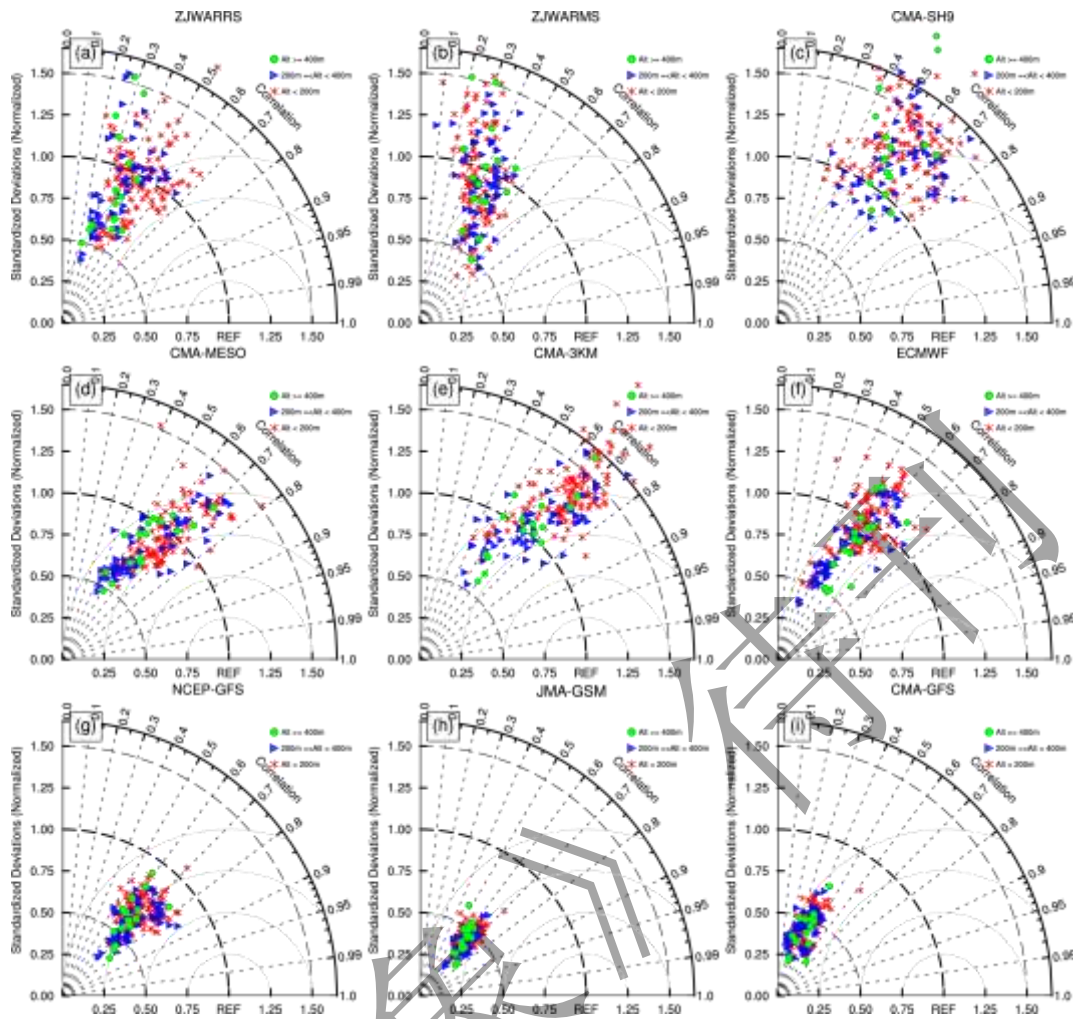


图 9 2020 年梅雨季节期间各模式对不同地形高度 H 的不同量级日降水量预报的 TS 评分

Fig. 9 The TS of daily precipitation for each weather prediction models at different terrain heights during the Meiyu rainy season in 2020

最后, 本文还简要分析讨论了不同地形高度对各模式降水预报性能的影响。由图 1 中观测站点的空间分布可知, 本文用到的有效站点的地形高度主要集中在 600 m 以下, 超过 600 m 的站点仅有两个。故本节主要根据地形高度, 以 200 m 和 400 m 为界, 将站点分为低、中和较高共三类, 各类的有效站点数分别为 118、56 和 16 个。分析表明, 模式对中雨及以上量级降水的预报性能具有较显著的地形依赖性 (图 9)。具体地, 在 GRAPES 系列的两个区域模式中, CMA-MESO 在低地形区大暴雨 TS 达 0.2, 优于 CMA-3KM (≈ 0.1), 但随地形升高, 其 TS 评分逐渐降低; 在 WRF 系列的三个区域模式中, CMA-SH9 与 CMA-3KM 的 TS 评分相当, 但对暴雨至大暴雨量级降水的预报在高地形区有所提升; ZJWARMS 和 ZJWARRS 随地形高度的增加对大暴雨量级降水预报的 TS 评分有明显的改善。此外, 全球模式中, ECMWF 和 NCEP-GFS 在低地形区的降水 TS 评分都表现较好, 其中 NCEP-GFS 在大暴雨量级降水的 TS 评分最优, 但随着地形高度的增加, 两个模式在大暴雨量级降水的 TS 评分明显下降, 表明模式对复杂地形区的降水过程表征不足。

泰勒图 (图 10) 中, 区域模式 CMA-3KM 和 CMA-MESO 的相关系数分布在 0.5~0.8, 且均满足 95% 的信度检验, 标准差之比 CMA-3KM 的站点集中分布在 Ratio>1 一侧, 而 CMA-MESO 的结果较为均匀的分布在 Ratio=1 (参考线) 两侧, 其中位于中、低地形区的站点更多分布在 0.5~0.75 范围, 反映出空间分辨率的提高使模式能更准确地预报出极端性降水, 但也可能会导致模式对降水的偏高估计; CMA-SH9 的结果在各地形高度上都呈现系统性高估 (Ratio>1); ZJWARMS 的相关系数集中在 0.2~0.6, 增加同化频率后, ZJWARRS 的相关系数有所提升, 尤其在中、低地形区改善显著。全球模式中, ECMWF 的结果表现较好, 相关系数集中在 0.4~0.7, Ratio \leq 1.25, 表明预报的降水强度较观测的偏弱; NCEP-GFS 虽相关系数可达 0.5~0.8, 但大部分站点的 Ratio<1, 揭示其对降水强度的持续低估。



注：彩色符号表示不同地形高度的站点；y 坐标表示预报的与观测的降水标准差之比（Ratio）；以 0 点为中心的放射状虚线为相关系数的参考线

图 10 站点观测与 9 个模式预报的日降水量的泰勒分布图

Fig. 10 Taylor plot of observed and predicted daily precipitation at stations by different weather prediction models

综上，地形高度对暴雨及以上量级降水预报有较显著的影响。其中，区域模式对地形刻画更精细、对降水预报有正增益效果，但需警惕其对降水过高估计的风险；全球模式在地形复杂区对降水的预报性能明显下降，降水整体呈现偏低估计。

3. 结论

2020 年超长梅雨季节期间，新安江流域内降水呈现出持续时间长、暴雨过程多、累积降水量大等特点，持续的降水导致新安江水库在该年首次开闸 9 孔泄洪。因此，本文基于站点观测资料，通过对新安江流域的日均降水量、降水强度和过程累积面雨量的时空特征，评估业务数值预报模式对此次降水的预报性能，并着眼于流域预报的业务需求，重点关注模式对流域内降水的累积效应和极端性的预报能力，以了解当下业务预报数值模式能否达到水库泄洪预警的需求；此外，文中还探讨了地形高度对模式降水预报的影响。主要结论如下：

(1) 各模式对新安江流域降水特征的预报评估表明, 全球模式的各成员和多模式平均普遍存在降水低估, 对降水极端性的预报能力弱于区域模式; 区域模式间离散度较大, 多模式平均结果表现更佳。全球模式具有更长的时效预报稳定性 (72 h 预报与实况偏差较小), 而区域模式临近预报 (24 h) 能更好捕捉精细化降水分布。

(2) 各模式对新安江流域降水预报的定量评估同样反映出, 全球模式对降水预报存在明显的偏低估计, 区域模式对暴雨和大暴雨量级的降水预报表现较好, 但在几次连续暴雨过程中, POD 和 FAR 评分波动显著, 反映模式预报结果对暴雨及以上量级降水发生的具体落区和时间上存在一定偏差。此外, GRAPES 系列中 CMA-3KM (3 km) 对中雨以上量级预报优于 CMA-MESO (10 km), 提高模式分辨率对预报性能有显著影响; WRF 系列中, 具有更广模拟范围的 CMA-SH9 较 ZJWARMS 更接近实况, 增加同化频次 (ZJWARRS) 可有效提升 ZJWARMS 的预报技巧。

(3) 各模式对新安江流域降水的极端性和累积效应的评估表明, 相较于模式单日降水的预报, 综合考虑模式预报降水的累积效应和极端性具有更直观的预报指示意义。区域模式 CMA-SH9 和 CMA-3KM 对降水极端性预报最优, 表现为较高的 TS 评分 (≈ 0.45) 和 POD 评分 (≥ 0.67), 但对流域内累积降水量存在过高估计; ZJWARMS、ZJWARRS 和 CMA-MESO 的累积降水量预报更接近实况, 但 TS、POD 和 FAR 评分表现皆不如 CMA-SH9 和 CMA-3KM, 可见, 在对流域内产流预报中, 应结合各区域模式 24 h 预报时效下的结果进行综合分析。全球模式中, CMA-GFS 和 JMA-GSM 在评分表现上和累积流域面雨量方面都有明显的低估表现, 预报结果未达到新安江水库开闸泄洪的要求。

(4) 地形高度对各模式预报暴雨及以上量级的降水有较为明显的影响, 主要表现为全球模式预报水平随地形高度上升而下降, 而区域模式 (CMA-SH9、ZJWARMS、ZJWARRS) 对较高地形的极端降水预报有一定提高, 对大暴雨量级降水时 TS 评分随地形高度增加有明显改善, 但也易出现偏高估计; 中雨及以下量级的降水预报结果受地形高度影响不大。

本文旨在评估业务预报模式对新安江流域降水的预报性能, 以期提高模式预报产品在流域降水预报以及水库泄洪预警的释用性; 并从各模式间的联系与区别着手, 简要分析比较模式设计与模式自身性能对降水预报结果的影响, 例如对基于 GRAPES 发展的 CMA-MESO 和 CMA-3KM、以及基于 WRF-ADAS 发展的 ZJWARMS、ZJWARRS 和 CMA-SH9 的结果间进行比较分析表明, 模式水平分辨率的提高、模式区域的选择、同化频次的提升, 对此次梅雨季期间的降水预报水平都有一定的正效应, 与前人研究结论一致 (Yu et al, 2022)。但未涉及更多天气气候背景, 对模式预报误差成因尚缺乏深入探讨。后续将继续以新安江流域的降水预报为研究对象, 拟设计敏感性试验探究模式对新安江流域及库区的降水—流量预报的误差来源及成因, 以提升模式对该流域的预报水平, 为流域及库区蓄水/开闸决策提供科学预

报依据。参考文献

- 包红军, 张恒德, 许凤雯, 等, 2021. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 47(6): 671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting[J]. Meteor Mon, 47(6): 671-684 (in Chinese).
- 卜文惠, 陈昊明, 李普曦, 2022. ECMWF 模式对 2020 年夏季江淮流域降水的预报偏差分析[J]. 暴雨灾害, 41(3): 315-323. Bu W H, Chen H M, Li P X, 2022. Analysis of the deviation of precipitation forecast of ECMWF model over the Yangtze-Huaihe River valley in summer 2020[J]. Torr Rain Dis, 41(3): 315-323 (in Chinese).

- 陈光舟, 娄珊珊, 王皓, 2021. 滁河流域汛期多模式集成面雨量预报检验评估[J]. 气象与减灾研究, 44(3): 222-227. Chen G Z, Lou S S, Wang H, 2021. Verification and evaluation of multi-model integrated forecasting of areal rainfall for Chuhe river basin in flood period[J]. Meteor Dis Reduct Res, 44(3): 222-227 (in Chinese).
- 陈涛, 张芳华, 于超, 等, 2020. 2020年6—7月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. 气象, 46(11): 1415-1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al, 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River basin during June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1415-1426 (in Chinese).
- 方慈安, 潘志祥, 叶成志, 等, 2003. 几种流域面雨量计算方法的比较[J]. 气象, 29(7): 23-26, 42. Fang C A, Pan Z X, Ye C Z, et al, 2003. Comparison of calculation of methods river valley area rainfall[J]. Meteor Mon, 29(7): 23-26, 42 (in Chinese).
- 韩俊太, 王政荣, 杨雨亭, 2022. 基于动态临界雨量的小流域山洪灾害分级预警[J]. 水力发电学报, 41(9): 67-76. Han J T, Wang Z R, Yang Y T, 2022. Flash flood grading and warning based on dynamic rainfall thresholds[J]. J Hydr Eng, 41(9): 67-76 (in Chinese).
- 江锦红, 邵利萍, 2010. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报, 41(4): 458-463. Jiang J H, Shao L P, 2010. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. J Hydraul Eng, 41(4): 458-463 (in Chinese).
- 刘洪韬, 严中伟, 戴新刚, 等, 2010. 20世纪新安江水库4次泄洪极端降水与环流背景分析[J]. 大气科学学报, 33(2): 198-204. Liu H T, Yan Z W, Dai X G, et al, 2010. Extreme precipitation and circulation background analysis of the four flood discharge events at Xin'anjiang reservoir in the 20th century[J]. Trans Atmos Sci, 33(2): 198-204 (in Chinese).
- 刘永和, 严中伟, 冯锦明, 等, 2013. 基于TIGGE资料的沅沭河流域6小时降水集合预报能力分析[J]. 大气科学, 37(3): 539-551. Liu Y H, Yan Z W, Feng J M, et al, 2013. Predictability of 6-hour precipitation in the Yishu River basin based on TIGGE data[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 539-551 (in Chinese).
- 刘芸芸, 丁一汇, 2020. 2020年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 46(11): 1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1393-1404 (in Chinese).
- 陆小勇, 魏珂, 陈斌, 等, 2020. 2020年汛期新安江水库防洪调度实践[J]. 中国防汛抗旱, 30(8): 47-49. Lu X Y, Wei K, Chen B, et al, 2020. Flood prevention dispatching practice of Xin'anjiang reservoir in flood season of 2020[J]. China Flood Dro Manage, 30(8): 47-49 (in Chinese).
- 祁海霞, 彭涛, 林春泽, 等, 2020. 清江流域降水的多模式BMA概率预报试验[J]. 气象, 46(1): 108-118. Qi H X, Peng T, Lin C Z, et al, 2020. Probabilistic forecasting of precipitation over the Qingjiang River basin using BMA multimodel ensemble technique[J]. Meteor Mon, 46(1): 108-118 (in Chinese).
- 漆梁波, 2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. 气象, 41(6): 661-673. Qi L B, 2015. Operational progress of high-resolution numerical model on severe convective weather warning[J]. Meteor Mon, 41(6): 661-673 (in Chinese).
- 任智慧, 桑燕芳, 杨默远, 等, 2023. 暴雨山洪灾害预警方法研究进展[J]. 地理科学进展, 42(1): 185-196. Ren Z H, Sang Y F, Yang M Y, et al, 2023. Progress of research on the methods for the early warning of mountain flash flood disasters[J]. Progress in Geography, 42(1): 185-196 (in Chinese).
- 宋雯雯, 郭洁, 淡嘉, 等, 2021. 2019年汛期大渡河流域面雨量多模式预报效果检验[J]. 干旱气象, 39(4): 678-686. Song W W, Guo J, Dan J, et al, 2021. Effect verification of multi-model area rainfall forecast in Dadu River basin in flood season in 2019[J]. J Arid Meteor, 39(4): 678-686 (in Chinese).
- 孙彭龄, 侯翠香, 1998. 1996年新安江水库泄洪与汛期天气特点分析[J]. 科技通报, 14(2): 98-101, 107. Sun P L, Hou C X, 1998. Analysis of flood discharge of Xinanjiang reservoir and weather characteristics in 1996 flood season[J]. Bull Sci Technol, 14(2): 98-101, 107 (in Chinese).
- 谈丰, 苏布达, 高超, 等, 2012. 高精度区域气候模式对淮河流域降水的模拟评估[J]. 长江流域资源与环境, 21(10): 1236-1242. Tan F, Su B D, Gao C, et al, 2012. High-resolution regional climate model (CCLM) for simulation of precipitation in the Huaihe River basin, China[J]. Res Environ Yangtze Basin, 21(10): 1236-1242 (in Chinese).
- 王丹, 余贞寿, 2023. 公里尺度分辨率WRF模拟梅雨暴雨对积云对流参数化的敏感性试验研究[J]. 大气科学, 47(6): 1876-1890. Wang D, Yu Z S, 2023. Effect of cumulus parameterization schemes on the high-resolution numerical simulation of heavy Meiyu front rainfall events[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 1876-1890 (in Chinese).
- 张庆云, 郭恒, 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究[J]. 大气科学, 38(4): 656-669. Zhang Q Y, Guo H, 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer[J]. Chin J Atmos Sci, 38(4): 656-669 (in Chinese).
- 周慧, 崔应杰, 胡江凯, 等, 2010. T639模式对2008年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析[J]. 气象, 36(9): 60-67. Zhou H, Cui Y J, Hu J K, et al, 2010. Validation of 2008 heavy rain events over the Yangtze River basin forecast by T639 model[J]. Meteor Mon, 36(9): 60-67 (in Chinese).

- 周黔生, 何斐, 黄健中, 2001. 新安江水库 990701 洪水调度与分析[J]. 水利建设与管理, 21(1): 59-61. Zhou Q S, He F, Huang J Z, 2001. Dispatch and analysis of the 990701 flood at Xinanjiang reservoir[J]. Water Conservancy Construction and Management, 21(1): 59-61 (in Chinese).
- 朱占云, 陈光宇, 姜瑜君, 等, 2016. 浙江省六大水库流域雨量模式预报效果检验[J]. 气象与环境学报, 32(3): 28-33. Zhu Z Y, Chen G Y, Jiang Y J, et al, 2016. Evaluation of the prediction by area rainfall forecast model OCF for six big reservoir basins in Zhejiang province[J]. J Meteor Environ, 32(3): 28-33 (in Chinese).
- Blair A, Sanger D, 2016. Climate change and watershed hydrology—heavier precipitation influence on stormwater runoff[J]. Geosciences, 6(3): 34.
- Furey P R, Gupta V K, 2005. Effects of excess rainfall on the temporal variability of observed peak-discharge power laws[J]. Adv Water Resour, 28(11): 1240-1253.
- Li X D, Rankin C, Gangrade S, et al, 2021. Evaluating precipitation, streamflow, and inundation forecasting skills during extreme weather events: A case study for an urban watershed [J]. J Hydrol, 603:127126.
- Liu B Q, Yan Y H, Zhu C W, et al, 2020. Record-breaking Meiyu rainfall around the Yangtze River in 2020 regulated by the subseasonal phase transition of the North Atlantic Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 47(22): e2020GL090342.
- Lu C H, Sun Y, Zhang X B, 2022. The 2020 record-breaking Mei-yu in the Yangtze River valley of China: the role of anthropogenic forcing and atmospheric circulation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 103(3): S98-104.
- Ma Y Y, Hu Z Y, Meng X H, et al, 2022. Was the record-breaking Mei-yu of 2020 enhanced by regional climate change?[J]. Bull Amer Meteor Soc, 103(3): S76-S82.
- Opatz J, Jensen T, Prestopnik H, et al, 2022. The MET version 11.0.0 user's guide[R]. Developmental Testbed Center. Available at: <https://github.com/dtcenter/MET/releases>
- Pan X, Li T, Sun Y, et al, 2021. Cause of extreme heavy and persistent rainfall over Yangtze River in summer 2020[J]. Adv Atmos Sci, 38(12): 1994-2009.
- Tang S K, Qiao S B, Feng T C, et al, 2022. Predictability of the record-breaking rainfall over the Yangtze and Huaihe River valley in 2020 summer by the NCEP CFSv2[J]. Atmos Res, 266: 105956.
- Wei K, Ouyang C J, Duan H T, et al, 2020. Reflections on the catastrophic 2020 Yangtze River Basin flooding in Southern China[J]. Innovation, 1(2): 100038.
- Yang Y, Ren L L, Wu M X, et al, 2022. Abrupt emissions reductions during COVID-19 contributed to record summer rainfall in China[J]. Nat Commun, 13(1): 959.
- Ye Y B, Qian C, 2021. Conditional attribution of climate change and atmospheric circulation contributing to the record-breaking precipitation and temperature event of summer 2020 in southern China[J]. Environ Res Lett, 16(4): 044058.
- Yu Z S, Wu M W, Min J Z, et al, 2022. Impacts of WRF model domain size on Meiyu rainfall forecasts over Zhejiang, China[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 58(2): 265-280.
- Zhang J C, Zhang W, Li J H, et al, 2004. Relation between precipitation and sediment transport in the Dasha River Watershed[J]. Chin Geogr Sci, 14(2): 129-134.
- Zhou Z Q, Xie S P, Zhang R H, 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 118(12): e2022255118.