

王丹,余贞寿,2025. 2020 年超长梅雨期间新安江流域多模式降水预报评估[J]. 气象,51(5):581-594. Wang D, Yu Z S, 2025. Evaluation of multi-model forecast of precipitation in Xin'anjiang Basin during the ultra-long Meiyu season in 2020[J]. Meteor Mon, 51(5):581-594(in Chinese).

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 年梅汛期期间,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 4 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,区域模式随地形增高预报优势逐渐明显,尤其是浙江省中尺度数值预报业务系统和浙江省快速更新同化预报系统,TS 评分由不足 0.10 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。

关键词: 新安江流域,梅雨期降水,多模式,地形高度,检验评估

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.010202

Evaluation of Multi-Model Forecast of Precipitation in Xin'anjiang Basin During the Ultra-Long Meiyu Season in 2020

WANG Dan YU Zhenshou

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract: The refined precipitation forecasts from numerical prediction models are of a crucial support to flood control efforts within river basins. The continuous heavy rainfall during the Meiyu season in 2020 led to the heaviest flood event since the construction of the Xin'anjiang Reservoir and it was the first time that all the sluices were fully opened. Based on precipitation observation data from various stations, this paper examines the forecast performance of four global models and four regional models regarding both overall precipitation patterns and areal rainfall within Xin'anjiang Basin. Additionally, it focuses on evaluating the predictive capabilities of these models regarding extreme and cumulative precipitation effects in the basin to understand whether they can meet the demand of reservoir flood discharge forecasting service. Furthermore, an analysis is conducted to assess how terrain height influences models' precipitation forecasts. The results show that the global models consistently underestimate the precipitation and have weaker prediction

* 浙江省气象科技项目(2020ZD06、2022ZD14、2023ZD14)和浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMJ23D050005)共同资助

2024 年 2 月 12 日收稿; 2025 年 4 月 6 日收修定稿

第一作者: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

ability for extreme precipitation than the regional models. The regional models mostly overestimate the precipitation but have relatively large variations among the predictions. The regional multi-model ensemble average demonstrates a better forecast performance than single-model results. The regional models perform well in forecasting rainfall of rainstorm to heavy rainstorm, but have some discrepancies in predicting the locations and timing of heavy rainstorm. Compare to the model evaluation of single-day precipitation forecast, it is more instructive to comprehensively consider the cumulative effects and extremity of precipitation prediction. Terrain height significantly influences the prediction of rainstorm events and above. As the terrain height increases, the advantage of regional models becomes evident while the predictive ability of global models for rainstorm events decreases. Especially for ZJWARMS and ZJWARRS, the TS scores increase from below 0.10 to approximately 0.15 or so. Additionally, moderate or lighter intensity rains are not affected by terrain so obviously.

Key words: Xin'anjiang Basin, precipitation in Meiyu season, multi-model, terrain height, evaluation

引 言

梅雨指每年 6—7 月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严重影响。2020 年梅雨呈现出入梅早、出梅晚、梅雨期长、雨区范围广、累积雨量大、强降水过程多的特点(刘芸芸和丁一汇,2020),是 1961—2020 年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我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 年梅雨异常偏多的主要原因。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”事件发生概率增加近 5 倍。Yang et al(2022)研究认为,人为气溶胶排放的减少

对 2020 年长江流域夏季的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模拟结果稍差。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,研究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。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,相关评估研究也能为今

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中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

预报数据为 2020 年 5 月 29 日到 7 月 17 日期间的 8 个数值模式的降水预报产品,包括:欧洲中期天气预报中心数值预报系统(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)和中国气象局全球同化预报系统(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)、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)和浙江省快速更新同化预报系统(ZJWARRS),共 4 个区域模式(详见表 1)。值得一提的是,CMA-GFS 和 CMA-MESO 是基于中国自主研发的原 GRAPES 数值预报体系一体化发展而来;CMA-SH9、ZJWARMS 和 ZJWARRS 则是基于 WRF-ADAS 框架发展而来,三者中 CMA-SH9 具有更广的覆盖范围,ZJWARRS 则是基于 ZJWARMS 发展得到的 3 h 快速更新循环同化系统,两者主要在预报时效、同化更新频次上有所差异。观测数据选择新安江全流域(后文简称为 XinAJ)内的 190 个国家级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,下同)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 eight 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 https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/ https://www.wis-jma.go.jp/cms/gsm/
NCEP-GFS	全球	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	24,48,72	
JMA-GSM	全球	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	24,48,72	
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	$0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$	24	气象大数据云平台(天擎)
CMA-SH9	区域	$0.09^{\circ}\times 0.09^{\circ}$	24,48,72	气象大数据云平台(天擎)
ZJWARMS	区域	$0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$	24,48,72	气象大数据云平台(天擎)
ZJWARRS	区域	$0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$	24	气象大数据云平台(天擎)

1.3 方 法

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(方慈安等,2003;江锦红和邵利萍,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,以及空间相关系数和标准差等常规统计量。

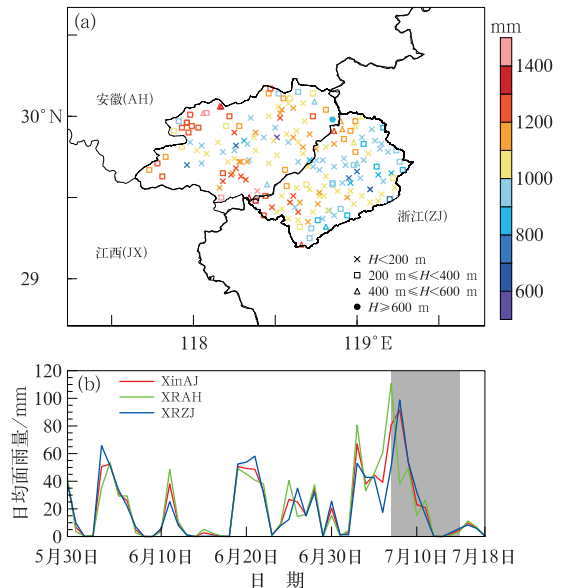
2 结果分析

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雨事件,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

在降水实况空间分布图中(图 1a),新安江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。流域面雨量日均序列变化中(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 区域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 区域的日面雨量峰值达到最高,而 XRZJ 和 XinAJ 的最大峰值则出现在 7 月 8 日。这与图 2 中出现大暴雨(日降水量 ≥ 100 mm)及以上

量级降水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

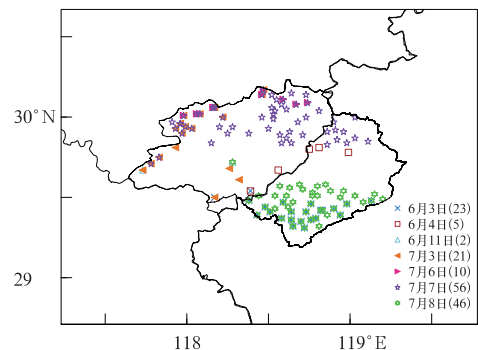


注:图 a 中不同符号标注站点海拔高度(H),图 b 中灰色区域表示新安江水库开闸泄洪时段。

图 1 2020 年梅雨期间新安江流域降水实况
(a)不同海拔高度站点的梅雨期累积降水,
(b)三个区域日均面雨量时间序列

Fig. 1 Observed precipitation in Xin'anjiang Basin during Meiyu season in 2020

(a) accumulated precipitation at stations with different altitudes, (b) time series of daily average areal rainfall in three basin regions



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 年梅雨期间新安江流域
日降水量 ≥ 100 mm 的站点分布

Fig. 2 Station distribution of heavy rainstorm with daily precipitation exceeding 100 mm in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020

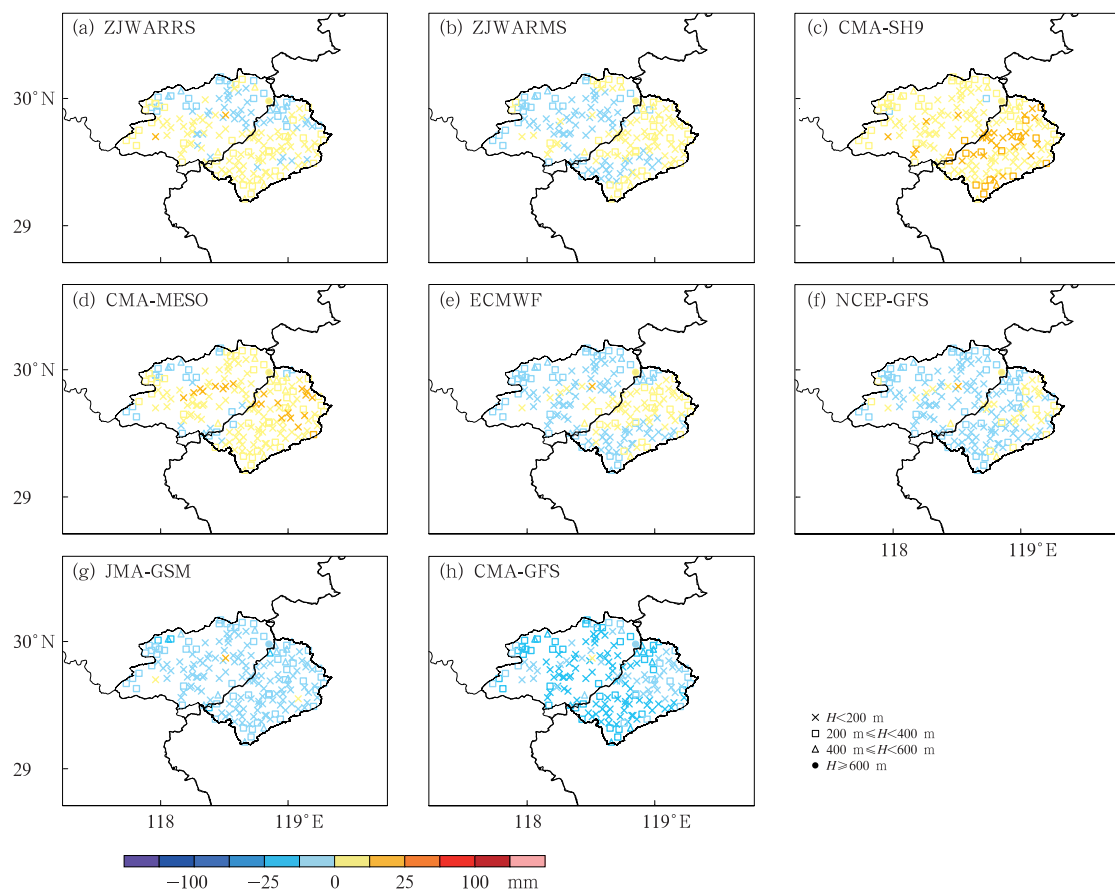
水中心北移至 XRAH 区域;7 月 7—8 日发生大暴雨的站点数达到最大(7 日 XRAH 区域 56 个站点,8 日 XRZJ 区域 46 个站点)。与之相应地,新安江水库自 7 日上午起逐步开 3 孔、5 孔、7 孔泄洪,至 8 日上午开 9 孔泄洪。随后降水逐渐减弱,泄洪口也次第关闭,至 7 月 14 日下午全部关闭,新安江水库完成泄洪,7 月 18 日梅雨季结束。

2.2 多模式对新安江水库区降水特征的预报评估

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-MESO 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总降水量;此外,全球模式 ECMWF、NCEP-GFS 及区域模式 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;快速更新同化模式 ZJWARRS 主要在 XinAJ 北部预报结果偏低,而中部、南部预报结果偏高。

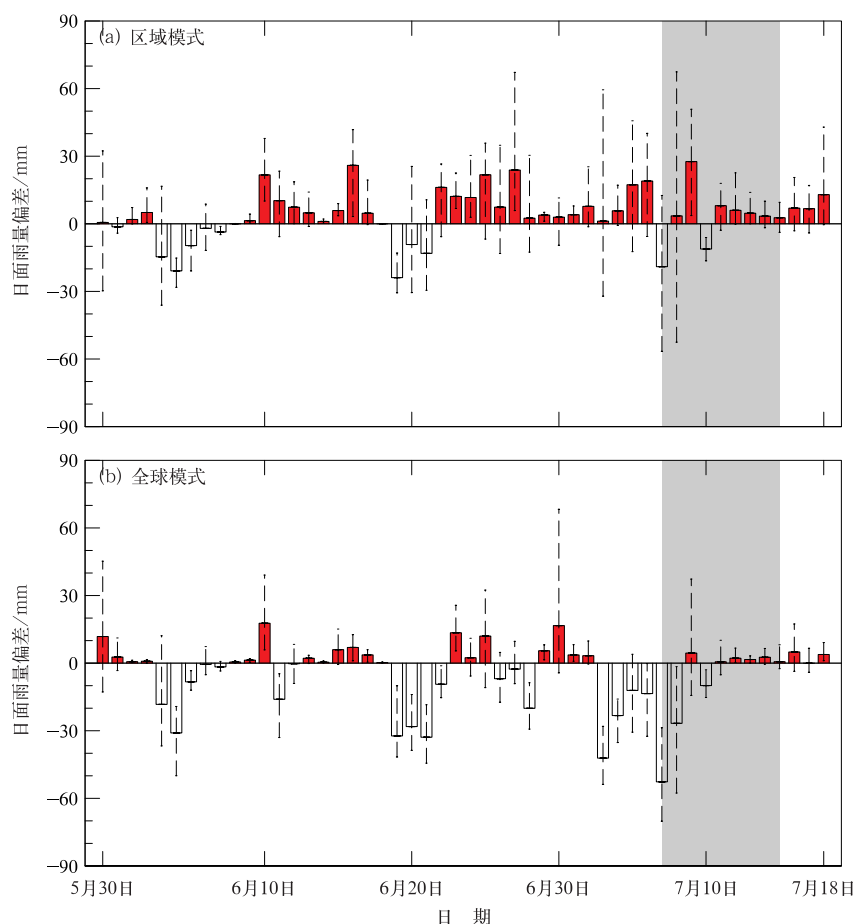
逐日偏差序列图(图 4)中,区域模式的多模式平均在 80% 的时段呈正偏差,而全球模式在 6 月 4 日、20 日及 7 月 7 日等关键降水峰值时段均出现超过 30 mm 的负偏差,表明其对极端降水过程的捕捉能力不足。此外,从单个模式预报的偏差离散度来看,区域模式虽在多模式平均结果上呈现持续的正偏差(尤其是 6 月 20 日之后的增幅显著),但单模式之间的离散度较大、不确定性较高;反观全球模式,其在流域内的偏差离散度小于区域模式,且各模式正负偏差方向基本一致。综上,全球模式的负偏差主要源于对日降水量 ≥ 50 mm 的极端降水事件的偏低估计,而区域模式中,单模式间的预报结果差异相对较大,多模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



注:不同符号标注站点海拔高度(H)。

图 3 8 个模式对 2020 年梅雨期间新安江流域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 Distribution of deviation (colored) between the 24 h forecasts of eight models and observation of total accumulated precipitation at each station in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020



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 年梅雨期间(a)区域模式和(b)全球模式的 24 h 预报与观测的新安江流域日面雨量偏差时间序列

Fig. 4 Time series of deviation of daily areal rainfall (in XinAJ) between the 24 h forecasts of (a) regional and (b) global models and the observation in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020

(48 h、72 h 预报时效)预报结果表明(图略),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,不同时效的面雨量预报与观测的相关性差异表明(表略),在 24 h 时效下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)。其中,区域模式 CMA-MESO(0.82)和 CMA-SH9(0.81)表现最佳,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(0.68)的,而 ZJWARMS 在提高观测资料的同化频次后,相关性略有提升(ZJWARRS:0.70)。

全球模式中,NCEP-GFS(0.81)和 JMA-GSM(0.76)表现突出,而 CMA-GFS(0.52)相对偏低。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 0.50,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

的降水发生,随着降水量级的增大,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。

图 5a 表明,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、CMA-SH9 和

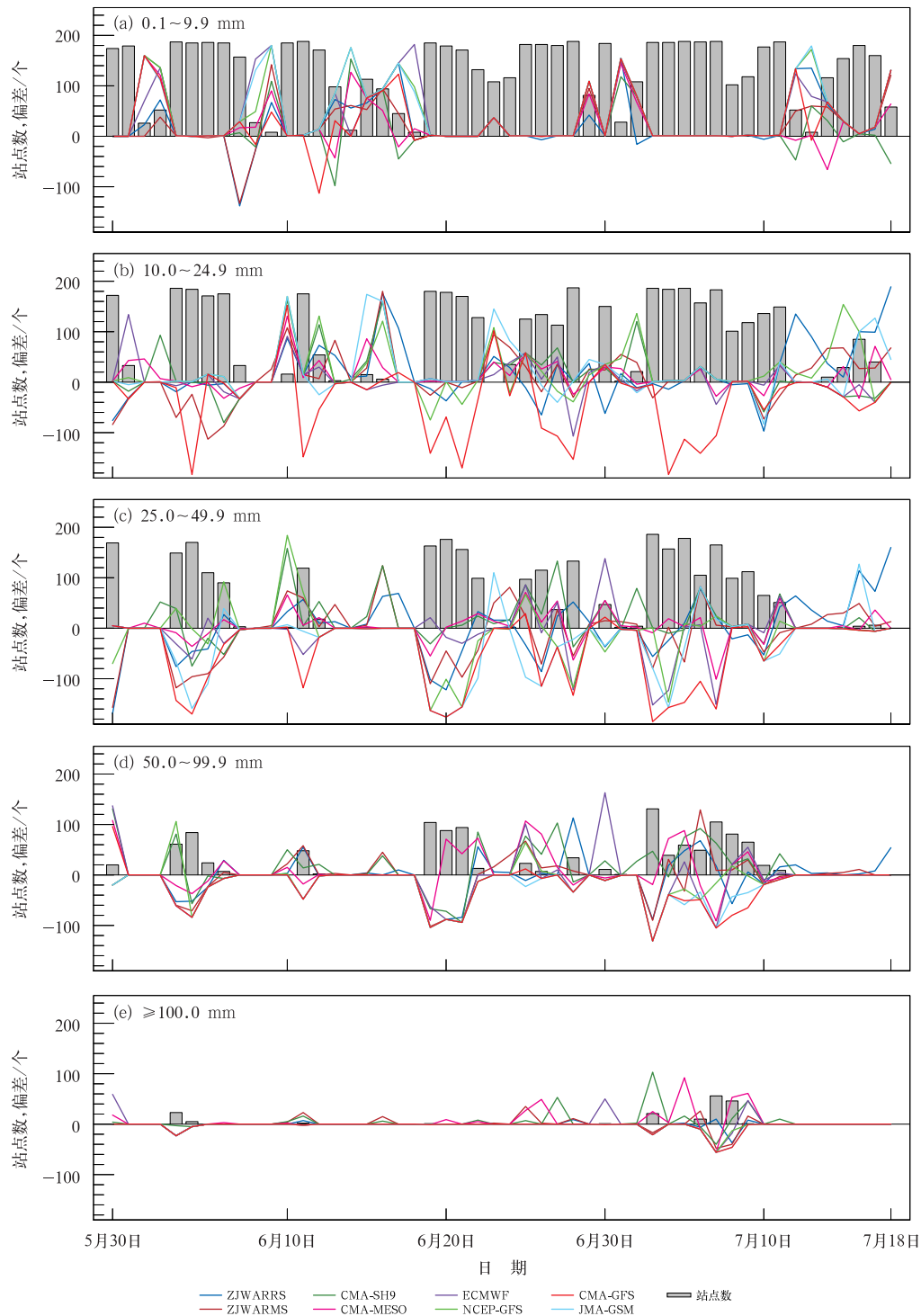


图 5 2020 年梅雨期间新安江流域不同量级日降水量站点数的观测值及其与不同模式的预报偏差

Fig. 5 The observations of stations with different precipitation amounts in Xin'anjiang Basin during the 2020 Meiyu season, and their deviations from different models' forecasts

全球模式 CMA-GFS 在 6 月 12 日左右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、8—9 日和 18 日),各模式也出现了不同程度的空报。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,在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;与之对应地,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,可见通过 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。CMA-MESO 对中雨量级降水的预报结果与观测较为接近,站点数没有明显的正负偏差表现,但在大雨(≥ 25 mm)及以上量级(图 5c,5d),预报偏差出现正负交替现象,表明该模式对降水过程的预报可能存在系统性偏移,尽管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。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。全球模式 CMA-GFS 自中雨量级降水预报起,在几次强降水过程中都出现明显的漏报现象。

此外,不同检验评分也表现出一致的对应关系:在全流域内发生大范围有效降水时,模式呈现高 TS 评分和低 FAR(图略)的表现,预报效果较好;反之,在全流域的弱降水时段,则对应较低的 TS 评分和高 FAR。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 ZJWARMS、CMA-MESO、CMA-SH9,以及全球模式 ECMWF 和 NCEP-GFS 等。结合各模式的 POD 和 FAR 表明,NCEP-GFS 在 6 月 4 日和 7 月 2 日左右的两次连续暴雨过程中有较好的 POD 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 和 CMA-MESO 的 POD 和 FAR 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

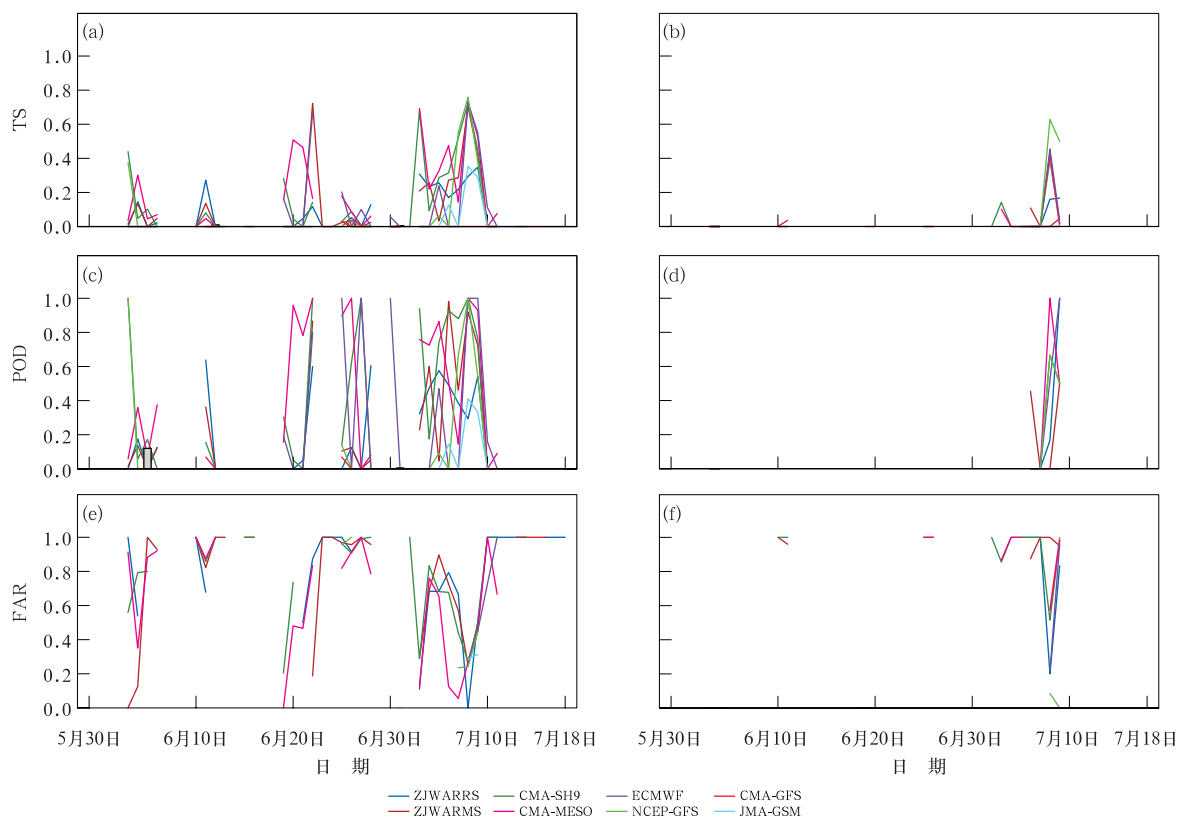


图 6 2020 年梅雨期间新安江流域(a,c,e)暴雨和(b,d,f)大暴雨量级降水的各模式预报评分

Fig. 6 The score results of (a, c, e) rainstorm and (b, d, f) heavy rainstorm in Xin'anjiang Basin during the 2020 Meiyu season

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NCEP-GFS(0.6)和ECMWF(0.4),其次是区域模式CMA-MESO和CMA-SH9(≥ 0.4);此外,较高的POD和低的FAR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。结合各模式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,降水的累积效应和降水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。

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,因而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表现稍逊(0.55);CMA-MESO的TS评分(0.44)、POD(0.67)和FAR(0.33)表现均衡。而全球模式中表现最佳的NCEP-GFS的各类指标(TS=0.23, POD=0.29, FAR=0.45)普遍低于区域模式的中位数水平。此外,进一步比较了不同模式对流域逐

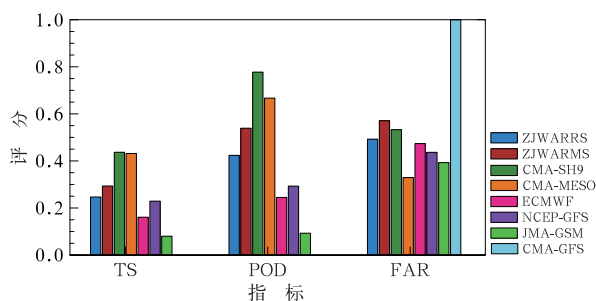


图7 2020年7月3—8日新安江流域暴雨过程各模式的24 h时效预报平均TS、POD、FAR

Fig. 7 The average TS, POD, and FAR scores of the 24 h forecast lead time by each model in Xin'anjiang Basin during 3 to 8 July 2020

日累积面雨量的预报情况(图8)。流域的累积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相对缓慢,这其中6月10—18日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)。

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-MESO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和ZJWARMS与实况吻合度较高。CMA-SH9和CMA-MESO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ZJWARMS和ZJWARRS。此外,除ZJWARRS和CMA-MESO(仅提供24 h预报结果)外,各模式的累积曲线随预报时效临近(图8a~8c)普遍呈增长变化。其中,区域模式CMA-SH9的预报中始终维持高速的累积态势,在72 h和48 h时已明显高估实际的累积面雨量值;而ZJWARMS的临近预报对降水量的调整更趋合理,随预报时效由72 h缩短至24 h,其累积曲线逐渐逼近实况。全球模式方面,CMA-GFS和JMA-GSM明显低估了流域累积面雨量,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

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2个。

故本节主要以地形高度 200 m 和 400 m 为界,将站点分为低、中、较高三类,各类有效站点数分别为 118、56、16 个。分析表明,区域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)。CMA-SH9 与 CMA-MESO 的 TS 评分相当,但对暴雨至大暴雨量级降水的预报在高原地形区有所提升;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 对低地形区的大暴雨量级降水 TS 评分都表现较好,其中 NCEP-GFS 评分最优,但随着地形高度的增加,两个模式的 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-MESO 的相

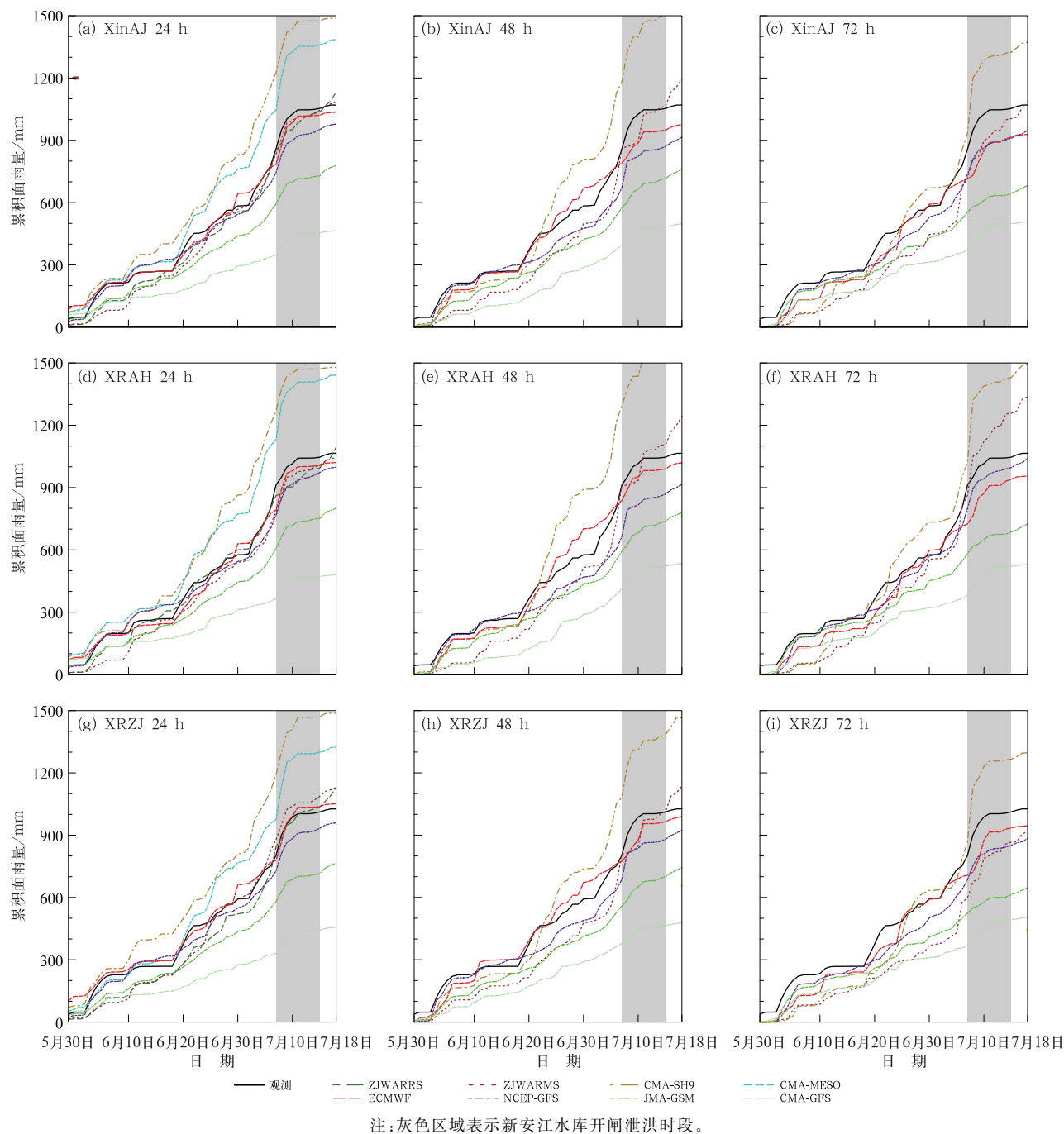


图 8 2020 年梅雨期间观测和各模式不同时效预报的新安江流域逐日累积面雨量分布

Fig. 8 Distribution of the daily accumulated areal rainfall observed at stations and predicted by each model with different forecast lead times in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020

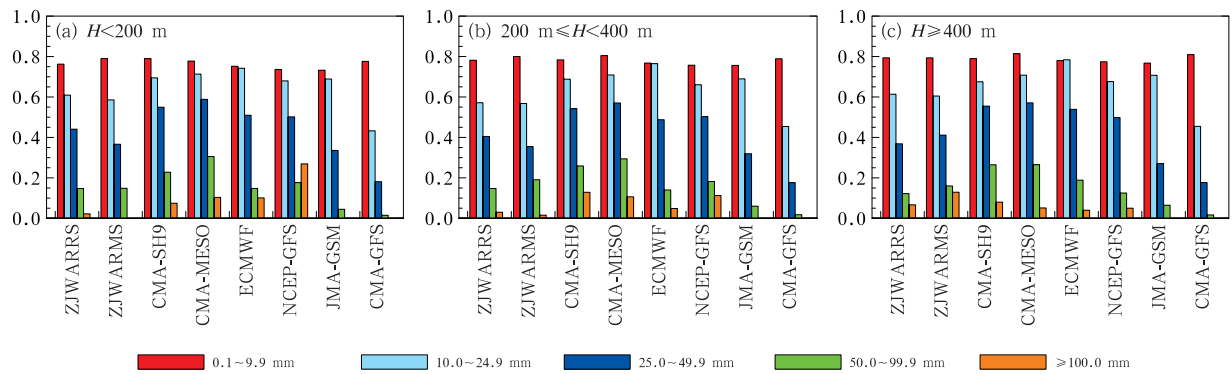
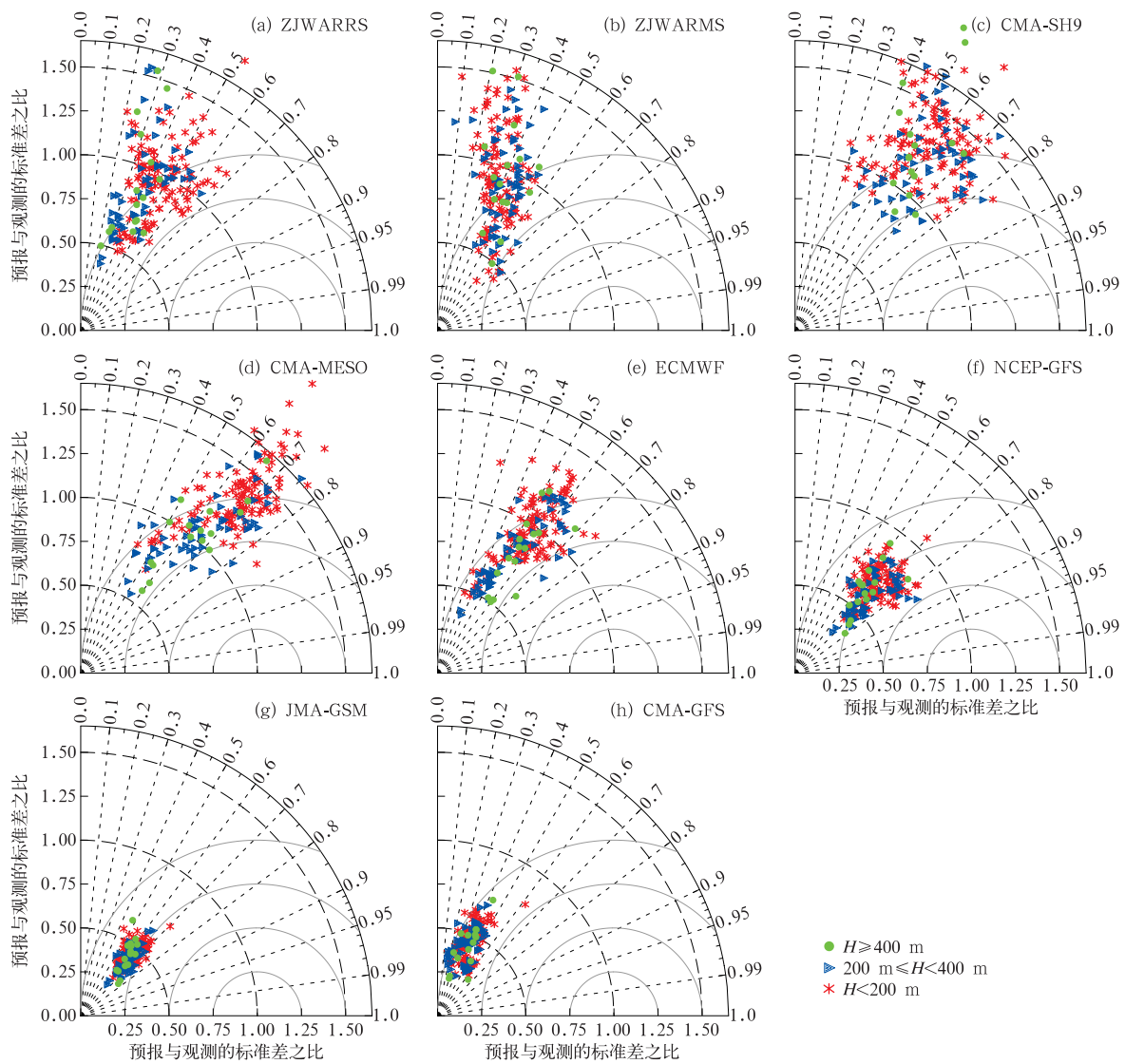
图9 2020 年梅雨期间各模式对新安江流域不同地形高度(H)下不同量级日降水量预报的 TS 评分

Fig. 9 TS of daily precipitation forecast of different levels by all models at different terrain heights in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020



注:彩色符号表示站点海拔高度(H),以零点为中心的放射状虚线为相关系数的参考线。

图10 2020 年梅雨期间新安江流域站点观测与8个模式预报的日降水量泰勒分布图

Fig. 10 Taylor plots of observed daily precipitation at stations and predicted daily precipitation by different weather prediction models in Xin'anjiang Basin during the Meiyu season in 2020

关系数分布在 0.5~0.8,且均满足 $\alpha=0.05$ 显著性检验;低地形站点集中分布在标准差之比(Ratio) >1 一侧,而地形高度在 200 m 以上的站点则更为均匀地分布在 Ratio=1 的两侧。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(0.3~0.7)。全球模式中,ECMWF 表现较好,相关系数集中在 0.4~0.7,Ratio ≤ 1.25 ,表明预报的降水强度较观测偏弱;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。

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)能更好地捕捉降水精细化分布。

(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,WRF 系列的三个模式反映出,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,相较于模式的单日降水,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-MESO 对降水极端性预报最优,表现为较高的 TS 评分(≈ 0.45)和 POD(≥ 0.67),但对流域内累积降水量存在过高估计表现;ZJWARMS 和 ZJWARRS 的累积降水量预报更接近实况,但 TS 评分、POD 和 FAR 表现皆不如 CMA-SH9 和 CMA-MESO,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 在各指标的评分表现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,其中,大暴雨量级降水的 TS 评分随地形高度增加有明显改善,但也易出现偏高估计,而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 WRF-ADAS 发展的 ZJWARMS、ZJWARRS 和 CMA-SH9 的结果间进行比较分析表明,模式区域的选择以及同化频次的提升,对此次梅雨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对于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,姜珊珊,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资料的沂沭河流域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]. Prog 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 Conserv Constr Manag, 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面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 sub-seasonal 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[EB/OL]. (2023-07-31) [2023-09-01]. <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.

(本文责编:戴洋)