

苏翔,刘梅,康志明,等,2022.2020年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J].气象,48(3):357-371. Su X, Liu M, Kang Z M, et al, 2022. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteor Mon, 48(3):357-371(in Chinese).

2020 年江苏主汛期短期暴雨预报检验^{*}

苏翔^{1,2} 刘梅^{1,2} 康志明^{1,2} 李昕^{1,3}

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041

2 江苏省气象台,南京 210041

3 南京气象科技创新研究院,南京 210041

提 要: 基于江苏预报业务常用的三个全球模式(ECMWF、NCEP-GFS、CMA-GFS)、三个区域模式(CMA-MESO、CMA-SH9、PWAFS)、本地客观预报和预报员主观预报,对 2020 年江苏主汛期(6—9 月)中的短期暴雨预报总体性能进行检验,并按降水性质分稳定性暴雨和对流性暴雨分别进行了检验和个例展示。结果表明:从总体检验来看,预报员的暴雨主观预报仅在 24 h 时效内相比于 ECMWF 有 TS 评分正技巧,本地客观和预报员暴雨预报的 TS 评分 > 区域模式 > 除 ECMWF 以外的全球模式,且无论是全球模式还是区域模式,并非分辨率越高预报性能越好;区域模式的暴雨预报大多面积偏大,空报率较高;全球模式除 ECMWF 以外的暴雨预报大多面积偏小,漏报率较高;20 时起报的 CMA-MESO 的预报性能明显好于 08 时起报的预报;对于稳定性暴雨预报,应重点参考 ECMWF、48 h 时效内的本地客观预报和 20 时起报的 CMA-MESO;对于对流性暴雨预报,应重点参考区域模式 CMA-SH9、PWAFS 和 24 h 时效内的本地客观预报。

关键词: 暴雨,检验,稳定性降水,对流性降水

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.071301

Verification of Short-Range Torrential Rain Forecast During the 2020 Jiangsu Main Flood Season

SU Xiang^{1,2} LIU Mei^{1,2} KANG Zhiming^{1,2} LI Xin^{1,3}

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210041

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210041

3 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041

Abstract: The total performance of short-range torrential rain forecasts during the 2020 Jiangsu main flood season (June—September) is verified based on the three global models (ECMWF, NCEP-GFS, CMA-GFS), three regional models (CMA-MESO, CMA-SH9, PWAFS), local objective forecast commonly used in Jiangsu operational forecast service and subjective forecast by forecasters. Verification and case analyses of stable and convective torrential rain forecast are also demonstrated respectively according to the types of precipitation. Results show that from the overall verification, the subjective torrential rain forecasts of forecasters only have positive TS skill compared to ECMWF within the 24 h forecast lead time. The torrential rain forecasts by local objective method and forecasters have TS > regional models > global models except ECMWF. It is not true that the higher model resolution, the better forecast performance for either global models or regional models. Most regional models have obviously larger torrential rain forecast

^{*} 国家自然科学基金项目(41805078)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-046)共同资助

2021 年 2 月 28 日收稿; 2022 年 1 月 21 日收修定稿

第一作者:苏翔,主要从事预报检验和客观预报技术研究. E-mail: suxiang01@163.com

通讯作者:刘梅,主要从事中短期天气预报研究. E-mail: lmkerly@163.com

area and high false alarm ratio, while most global models except ECMWF have obviously smaller torrential rain forecast area and high miss rate. The CMA-MESO model initialized at 20:00 BT has obviously better forecast performance than that initialized at 08:00 BT. For stable torrential rain forecast, forecasters should take more references of the ECMWF forecasts, the local objective forecasts within 48 h lead time and the CMA-MESO forecasts initialized at 20:00 BT. As for convective torrential rain forecast, forecasters should refer to the region models CMA-SH9, PWAFS, and the 24 h local objective forecasts more.

Key words: torrential rain, verification, stable precipitation, convective precipitation

引 言

2020年6月9日江苏淮河以南地区自南向北先后入梅,江苏正式进入主汛期(6—9月)。期间经历了长达51 d的超长梅雨期(6月9日至7月29日),暴雨频发,全省平均梅雨量达615.4 mm,是常年同期(236 mm)的2.61倍,为有气象记录以来第二多(仅次于1991年的738.8 mm)。不少气象工作者通过诊断分析(杜小玲等,2016;蒋骏等,2016;金琼等,2020;毛程燕等,2019)和数值试验(刘建勇等,2011;闵锦忠等,2018;梅疏影和闵锦忠,2018;张舒阳和闵锦忠,2018)研究了梅雨锋暴雨的环流特征和发展机制,而且在实际暴雨预报业务中,数值模式提供的降水预报是预报员最重要的参考依据。

一些学者对部分业务模式的暴雨预报性能进行了检验评估。孙素琴等(2017)基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、日本气象厅(JMA)和T639模式降水预报产品,对2015年江西省汛期区域性暴雨预报进行了检验,发现ECMWF模式的降水预报分布总体偏北,三个模式都存在暴雨漏报的问题。党英娜(2018)基于ECMWF和华东区域气象中心模式(CMA-SH9),对山东半岛2016—2017年汛期暴雨预报能力进行了检验,发现ECMWF暴雨预报偏弱,CMA-SH9空报率高。宫宇等(2018)对比了中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)、ECMWF和T639在2013—2015年的20次南方暴雨、6次北方暴雨以及12次台风暴雨预报中的性能,发现CMA-GFS模式明显优于T639,预报稳定性较好。然而上述研究与江苏预报业务的实际情况存在一定差距,一方面是区域气候特征上的差异,另一方面是所用的业务模式有所不同,例如JMA和T639模式在江苏已被其他的数值模式所取代。目前江苏预报业务上常用的三个全球模式为ECMWF、美国国家环境预报中心全球预报系统(NCEP-GFS)、CMA-

GFS,常用的三个区域模式为中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)、CMA-SH9和江苏本地研发的精确化天气分析与预报系统(PWAFS)(Li et al,2016;2020),与之相关的本地化检验评估研究仍相对缺乏。

此外,基于统计学的客观订正和基于预报员经验的主观订正相比于数值模式是否有预报技巧也是预报业务亟需了解的问题。为了改进预报水平,除了大力发展更加先进的数值模式以外,模式统计后处理技术也在暴雨预报中得到了广泛应用(代刊等,2018;苏翔和袁慧玲,2020)。例如,江苏采用改进的频率匹配法(Zhu and Luo,2015;苏翔等,2021),对ECMWF确定性预报进行订正,生成本地客观降水预报业务产品。2020年主汛期,江苏还引进中央气象台主客观融合算法(唐健等,2018),并在本地化部署时开发了集合融合和物理量融合等多种落区与格点预报融合技术,让预报员在网格预报的基础上制作编辑落区预报,实现落区反演格点预报产品入库,形成统一的主客观融合产品,解决了传统预报“两张皮”的问题,即预报员的降水落区预报与上传的站点考核预报不一致的问题。

除了需要考察江苏2020年主汛期暴雨预报的整体性能以外,由于不同天气系统引发的暴雨存在物理机制上的差异(傅云飞等,2020),可进一步将暴雨样本按降水性质分为稳定性降水和对流性降水分别进行检验。例如梅雨锋中不同尺度天气系统的相互作用使得梅雨锋暴雨的形成机制较为复杂(陆汉城,2019),既有层状云降水,也可产生较强的积云对流(寿绍文,2019)。按降水性质分类统计不同预报产品的暴雨预报性能对于业务具有更加实际的指导意义。

本文基于江苏预报业务常用的数值模式、本地客观、预报员主观的短期降水预报产品和站点观测资料,首先对比不同预报产品在2020年江苏主汛期短期暴雨预报中的整体性能,其次检验不同预报产

品在稳定性暴雨和对流性暴雨预报中的不同表现,最后选取典型暴雨个例进行展示说明。这些分析有助于预报员了解不同预报产品在江苏主汛期暴雨预报中的性能,总结预报经验,以期提升江苏主汛期暴雨预报水平。

1 资 料

1.1 观测资料

所用的观测资料来源于中国气象局考核的 259 个江苏基本站和优质加密站的 08 时至次日 08 时和 20 时至次日 20 时(北京时,下同)累积降水。相比于仅使用基本站和使用所有加密站,可在保证较高数据质量的同时提供更加丰富的降水细节信息。需要注意的是,使用不同的观测资料进行检验所得的预报评分会有差异。

1.2 模式资料

江苏预报业务常用的三个全球模式分别为:(1)欧洲中期天气预报中心 ECMWF 模式,水平分辨率为 0.125° ,每日进行 2 次 0~15 d 预报;(2)美国国家环境预报中心 NCEP-GFS 模式,水平分辨率为 0.5° ,每日进行 4 次 0~16 d 预报;(3)我国自主研发的 CMA-GFS 模式,水平分辨率为 0.25° ,每日进行 2 次 0~10 d 预报。

江苏预报业务常用的三个区域模式分别为:(1)我国自主研发的中尺度模式 CMA-MESO,水平分辨率为 3 km,对流可解析(无积云对流参数化),每日进行 2 次 0~36 h 预报,采用 NCEP 同时刻分析场和云分析生成模式初值(许晨璐等,2017;张小雯等,2020);(2)华东区域气象中心模式 CMA-SH9,水平分辨率为 9 km,每日进行 4 次 0~72 h 预报,同化了中国高低空常规观测资料、雷达基数据以及风云卫星等多源资料,采用复杂云分析技术改善了模式初始场,并对模式的对流参数化方案和微物理过程进行了优化(吕林宜等,2019);(3)江苏本地 PWFAS 模式,由江苏省气象局与美国俄克拉何马大学 CAPS 实验室合作搭建,内核使用 ARW-WRF V3.5.1,采用单向嵌套双重网格,外层区域水平分辨率为 15 km,采用 Kain-Fritsch 积云对流方案,内层区域水平分辨率为 3 km(本文使用 3 km 分辨率),对流可解析,每日进行 8 次预报,其中 08 时和

20 时起报的预报时效均为 0~72 h(Li et al,2016)。

1.3 本地客观预报

目前江苏预报业务上采用改进的频率匹配法(Zhu and Luo,2015;苏翔等,2021),对 ECMWF 确定性降水预报进行实时订正,生成与原始预报具有相同水平分辨率的本地客观预报业务产品。对不同起报时间和预报时效单独进行滑动建模,所用的训练样本为去年同期前后各一个月(共 61 d)的历史预报和观测资料。本地客观预报算法的目的是通过消除 ECMWF 模式的频率偏差对降水强度进行订正,其降水分布形态通常与 ECMWF 模式预报具有较高的相似性。考虑到 ECMWF 模式数据计算和传输的时间滞后性,本地客观预报的起报时间与其所订正的 ECMWF 模式降水预报产品相比落后 12 h。例如本地客观 08 时起报的 24、48、72 h 时效产品所订正的对象为 ECMWF 模式前一日 20 时起报的 36、60、84 h 时效产品。

1.4 预报员主观预报

江苏 2020 年主汛期开始实行基于主客观融合的预报业务流程。预报员自由选取不同的数值模式和客观预报算法作为网格预报背景场,并在此基础上制作编辑降水落区预报。系统平台会通过主客观融合算法将预报员绘制的降水落区预报转换为连续变化的格点预报,形成统一的主客观融合产品库。每日 06 时之前由值班预报员制作完成 08 时起报的 24、48 和 72 h 逐日降水预报产品,每日 17 时之前由首席预报员制作完成 20 时起报的 24、48 和 72 h 逐日降水预报产品。

2 检验方法

2.1 主汛期暴雨样本的选取

从 2020 年江苏主汛期(6—9 月)08 时至次日 08 时和 20 时至次日 20 时观测出现暴雨的日期中剔除暴雨站点数小于总站点数 2% 的局地暴雨日期,分别得到 35 个和 39 个暴雨观测样本用于江苏主汛期暴雨预报的总体性能检验。需要注意的是,多样本总体检验可能存在部分降水较多日样本评分覆盖降水较少日样本评分的情况,检验结果仅代表统计时段内的总体性能,不代表单日样本性能。

2.2 预报时效的对应

模式资料由于计算和传输等原因,实际的产品可用时间滞后于模式起报时间。例如预报员早上制作 08 时起报的 24 h 预报时,实际可参考的资料为同一起报时间和预报时效的本地客观产品以及各个模式前一日 20 时起报的 36 h 时效产品。为了考察预报员的主观订正相比于模式和客观预报产品是否有预报技巧,将预报员和本地客观 08 时起报的 24、48、72 h 时效产品与各个模式前一日 20 时起报的 36、60、84 h 时效产品进行对比检验,并将预报员和本地客观 20 时起报的 24、48、72 h 时效产品与各个模式当日 08 时起报的 36、60、84 h 时效产品进行对比检验。根据不同模式预报时效的长度,CMA-MESO 模式仅检验 36 h 时效,CMA-SH9 和 PWAFS 模式仅检验 36 h 和 60 h 时效。

2.3 稳定性暴雨和对流性暴雨的划分

对于 24 h 累积降水,目前并没有一个明确的方法可以划分稳定性降水和对流性降水。层云稳定性降水和积云对流性降水既可能存在水平和垂直空间上的叠加,也可能存在时间上更替,可根据两者出现的比例,按一定客观标准划分为以稳定性降水为主的暴雨样本和以对流性降水为主的暴雨样本。考虑到稳定性降水具有持续时间长的特点,对流性降水具有强度大的特点,可采用逐小时站点降水观测数据进行客观划分。根据经验和测试,设计了如下划分标准:计算将暴雨($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)站点上的 24 h 累积降水拆分为逐小时降水,计算其中短时强降水($20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)小时数与降水($> 0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)小时数的比值 r ;若 $r \geq 5\%$,则判断为对流性降水(为主);若 $r < 5\%$,则判断为稳定性降水(为主)。按此标准,08 时至次日 08 时和 20 时至次日 20 时暴雨观测样本可分别划分为 9 个和 12 个稳定性暴雨样本,26 个和 27 个对流性暴雨样本。

2.4 主汛期暴雨的总体检验评分

先将所有模式、本地客观和预报员主观网格预报产品统一双线性插值到观测站点上,再分别计算暴雨($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)的频率偏差(FB)、TS 评分、漏报率(PO)、空报率(FAR)(Jolliffe and Stephenson, 2003):

$$FB = \frac{H + F}{H + M} \quad (1)$$

$$TS = \frac{H}{H + M + F} \quad (2)$$

$$PO = \frac{M}{H + M} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \quad (4)$$

式中: H 、 M 、 F 分别为暴雨命中样本数、漏报样本数和空报样本数。这里的样本数是时间样本数和空间样本(站点)数的乘积。式(1)中的频率偏差为统计时段内预报暴雨总样本数与观测暴雨总样本数的比值,越接近 1 代表预报的系统偏差越小,大于 1 代表暴雨预报面积偏大,小于 1 代表暴雨预报面积偏小。此外,频率偏差和 TS 评分还可以分别写成漏报率和空报率的函数:

$$FB = \frac{1 - PO}{1 - FAR} \quad (5)$$

$$TS = \frac{1}{\frac{1}{1 - PO} + \frac{1}{1 - FAR} - 1} \quad (6)$$

由式(5)可知,当漏报率高于空报率时,暴雨预报面积偏小;当空报率高于漏报率时,暴雨预报面积偏大。由式(6)可知,TS 评分的数值由漏报率和空报率共同决定。选取 ECMWF 模式为参考模式,将不同预报产品的 TS 评分与之进行比较,若 TS 评分高于 ECMWF,则为 TS 评分正技巧,反之则为 TS 评分负技巧。

2.5 小样本检验的注意事项

小样本检验可能存在评分不稳定的情况。在大样本总体检验时,通常默认式(1)~式(4)的分母较大,不会出现评分不稳定的情况;但在小样本检验时,例如个例检验或按降水性质分类检验时,式(1)~式(4)的分母可能会变得很小,导致评分数值不稳定,引起错误理解。例如,NCEP-GFS 和 CMA-GFS 模式 2020 年 6 月 17 日 08 时起报的 12~36 h 累积降水相比于 2020 年 6 月 17 日 20 时至 18 日 20 时的降水观测都没有报出沿淮分布的暴雨雨带,两个模式预报的暴雨雨带几乎都在江苏区域以外(3.3 节中将对对此进行详细讨论)。两个模式预报的暴雨雨带仅存在细微的差异,暴雨命中站点数 H 分别为 1 和 0,暴雨空报站点数 F 分别为 0 和 2,都远低于暴雨漏报站点数 37 和 38,但却导致两者的空报率 FAR 的数值出现了 0 和 1 的巨大差别,与预报员的

主观感受偏差较大,这是由于暴雨预报样本数($H+F$ 的值)太小导致的评分数值不稳定。考虑到文中的个例检验或按降水性质分类检验所用的暴雨样本都是基于观测选取的,即 $H+M$ 的值不会太小,因此在上述小样本检验时改用空报面积比(FAAR)代替空报率(FAR)以获得更加符合预报员主观感受的检验评分结果:

$$FAAR = \frac{F}{H+M} \quad (7)$$

即:空报面积比是暴雨空报样本数 F 与暴雨观测样本数 $H+M$ 的比值,与漏报率 PO 具有相同的分母,是空报率 FAR 与频率偏差 FB 的乘积。上述例子中两个模式的空报面积比 $FAAR$ 分别为 0 和 0.05,代表模式空报的站点数相对于暴雨观测站点数都很低,更加符合预报员的主观认知。在本文的稳定性暴雨和对流性暴雨检验中将使用空报面积比代替空报率。

3 检验结果

3.1 总体性能检验

3.1.1 24 h 时效暴雨预报检验

图 1 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 24 h(对应模式 20 时起报的 36 h)暴雨预报检验评分,并已按评分数值大小对预报产品进行排序。全球模式 NCEP-GFS 和 CMA-GFS 的暴雨预报面积最小且暴雨漏报率最高,区域模式 CMA-MESO 和 CMA-SH9 的暴雨预报面积最大且暴雨空报率较高。从暴雨预报的 TS 评分上看,本地客观、预报员和 CMA-MESO 相比于 ECMWF 都具有一定正技巧。本地客观和预报员较好地订正了 ECMWF 模式暴雨预报面积偏小的系统偏差,订正以后的频率偏差值更接近 1,两者暴雨预报的 TS 评分也最高。CMA-MESO 暴雨预报的 TS 评分正技巧主要得益于较低的暴雨漏报率。区域模式 PWAFS 由于暴雨漏报率和空报率均高于 ECMWF,因此暴雨 TS 评分相比于 ECMWF 为负技巧。

图 2 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 20 时起报的 24 h(对应模式 08 时起报的 36 h)暴雨预报检验评分。部分结论与图 1 一致,即全球模式 CMA-GFS 和 NCEP-GFS 的暴雨预报面积最小且具有最大的暴雨漏报率,区域模式 CMA-SH9 和

CMA-MESO 的暴雨预报面积最大且具有最大的暴雨空报率。而在暴雨 TS 评分方面,预报员和本地客观预报相比于 ECMWF 具有正技巧,这主要得益于较低的暴雨漏报率。区域模式 PWAFS 的暴雨漏报率略低于 ECMWF,但空报率显著高于 ECMWF,因此其相比于 ECMWF 模式的暴雨 TS 评分为负技巧。值得注意的是,20 时和 08 时起报的 CMA-MESO 的暴雨 TS 评分差异较大。虽然两个时次起报的 CMA-MESO 的暴雨空报率均较高,但前者的暴雨漏报率低,因此暴雨 TS 评分较高(图 1),后者的暴雨漏报率与 ECMWF 相当,暴雨 TS 评分较低(图 2)。

3.1.2 48 h 时效暴雨预报检验

图 3 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 48 h(对应模式 20 时起报的 60 h)暴雨预报检验评分。全球模式 NCEP-GFS 和 CMA-GFS 的暴雨预报面积最小且暴雨漏报率最高。仅有区域模式 PWAFS 和 CMA-SH9 的暴雨预报面积轻微偏大,其他产品的暴雨预报面积均偏小。从暴雨 TS 评分上看,所有预报产品相比于 ECMWF 均为负技巧。虽然区域模式 PWAFS 和 CMA-SH9 的暴雨漏报率略低于 ECMWF,但暴雨空报率较高,因此暴雨 TS 评分相比于 ECMWF 为负技巧。本地客观预报和 NCEP-GFS 虽然空报率低于 ECMWF,但暴雨漏报率较高,因此其暴雨 TS 评分也为负技巧。

图 4 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 20 时起报的 48 h(对应模式 08 时起报的 60 h)暴雨预报检验评分。部分结论与图 3 一致,即全球模式 CMA-GFS 和 NCEP-GFS 的暴雨预报面积最小且具有最大的暴雨漏报率,区域模式 PWAFS 和 CMA-SH9 的暴雨预报面积最大且具有最大的暴雨空报率。所有预报产品相比于 ECMWF 的暴雨预报 TS 评分均为负技巧,其中区域模式 CMA-SH9 和 PWAFS 的暴雨预报 TS 评分负技巧主要源于较高的空报率,全球模式 NCEP-GFS 和 CMA-GFS 的暴雨预报 TS 评分负技巧主要来源于较高的漏报率。

3.1.3 72 h 时效暴雨预报检验

图 5 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 72 h(对应模式 20 时起报的 84 h)暴雨预报检验评分。全球模式 CMA-GFS 的暴雨 TS 评分最差,原因是其暴雨漏报率和暴雨空报率都是最高的。NCEP-GFS 暴雨预报面积最小,暴雨漏报率

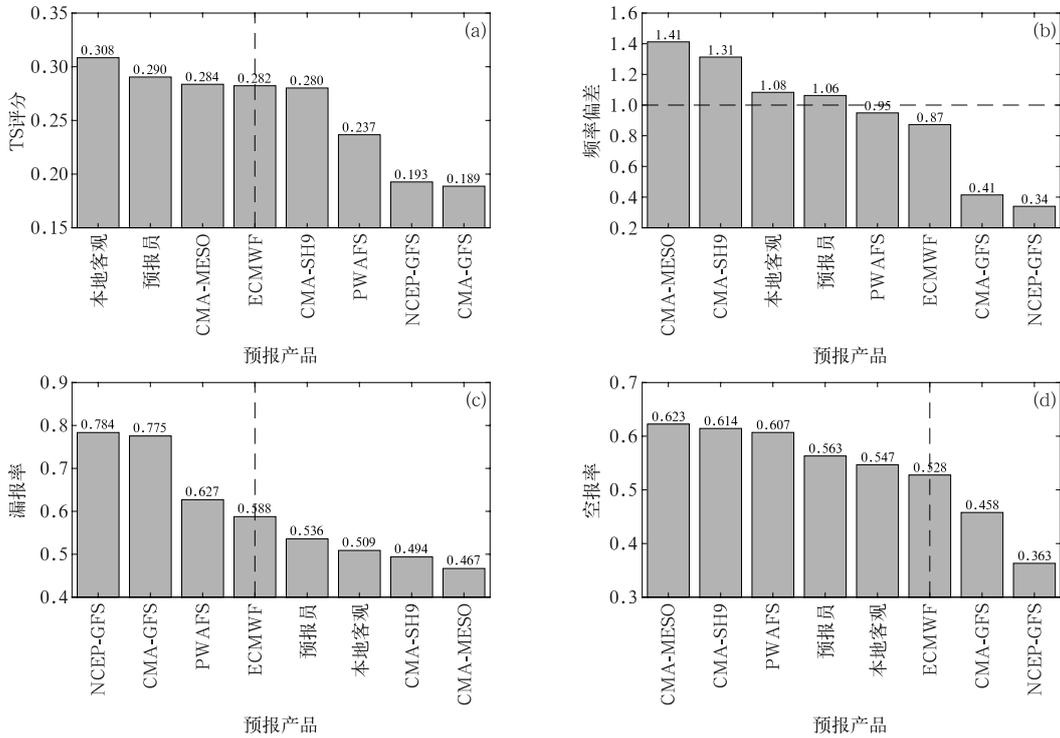


图 1 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 24 h(对应模式 20 时起报的 36 h)暴雨预报的 (a)TS 评分,(b)频率偏差,(c)漏报率和(d)空报率

Fig. 1 The 24 h forecasts of forecasters and local objective method initialized at 08:00 BT (corresponding to the 36 h forecast of models initialized at 20:00 BT) in terms of torrential rain during the 2020 Jiangsu main flood season (a) TS, (b) frequency bias, (c) miss rate, (d) false alarm ratio

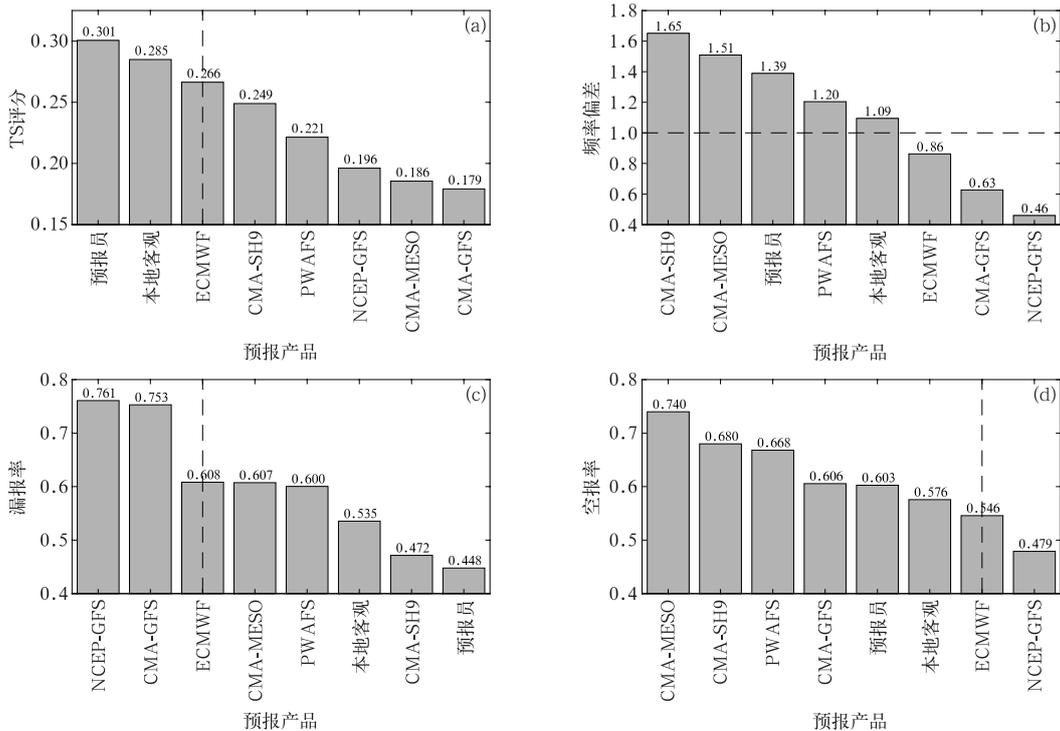


图 2 同图 1,但为预报员和本地客观 20 时起报 (对应模式 08 时起报)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT (corresponding to the forecast of models initialized at 08:00 BT)

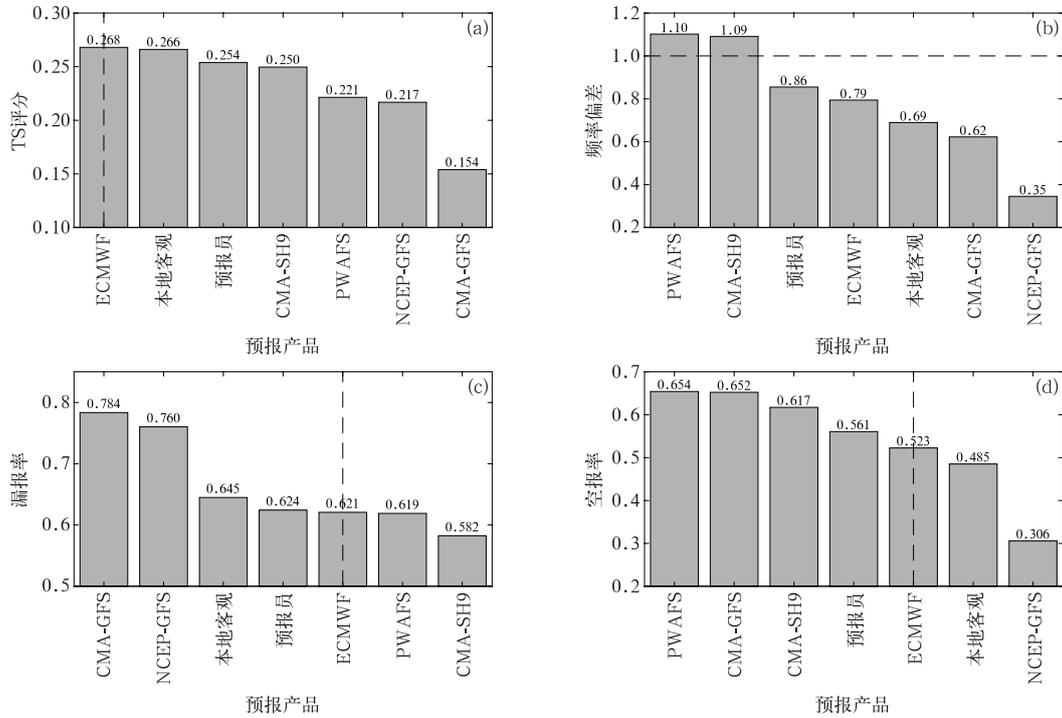


图 3 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 48 h(对应模式 20 时起报的 60 h)暴雨预报的 (a)TS 评分,(b)频率偏差,(c)漏报率和(d)空报率

Fig. 3 The 48 h forecast of forecasters and local objective method initialized at 08:00 BT (corresponding to the 60 h forecast of models initialized at 20:00 BT) in terms of torrential rain during the 2020 Jiangsu main flood season

(a) TS, (b) frequency bias, (c) miss rate, (d) false alarm ratio

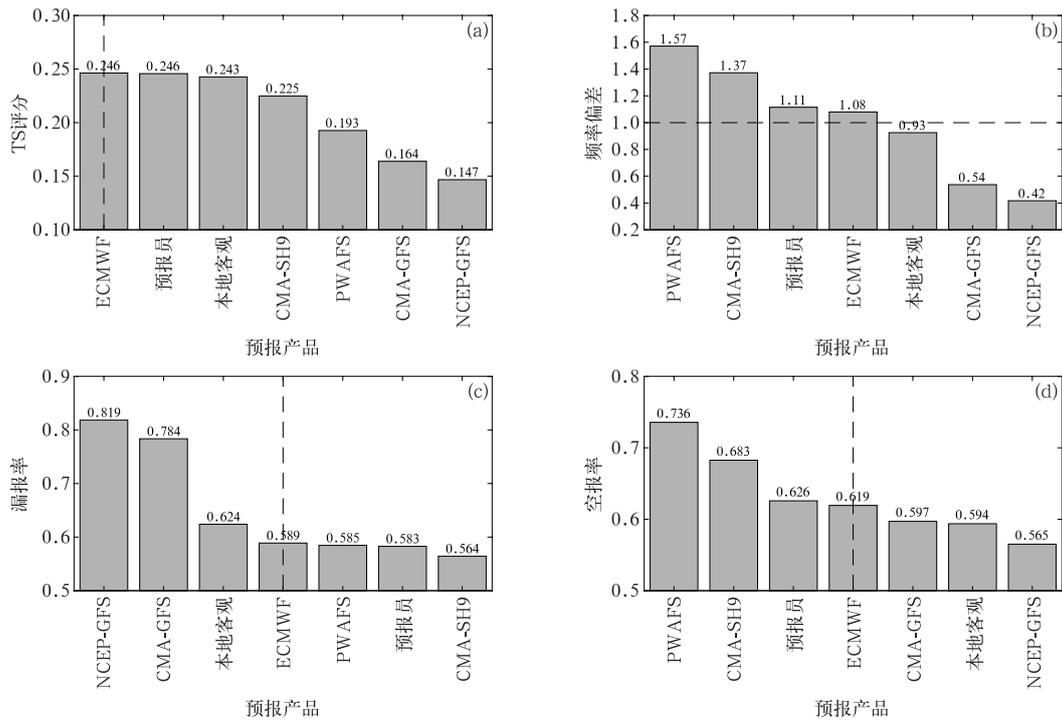


图 4 同图 3,但为预报员和本地客观 20 时起报 (对应模式 08 时起报)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT (corresponding to the forecast of models initialized at 08:00 BT)

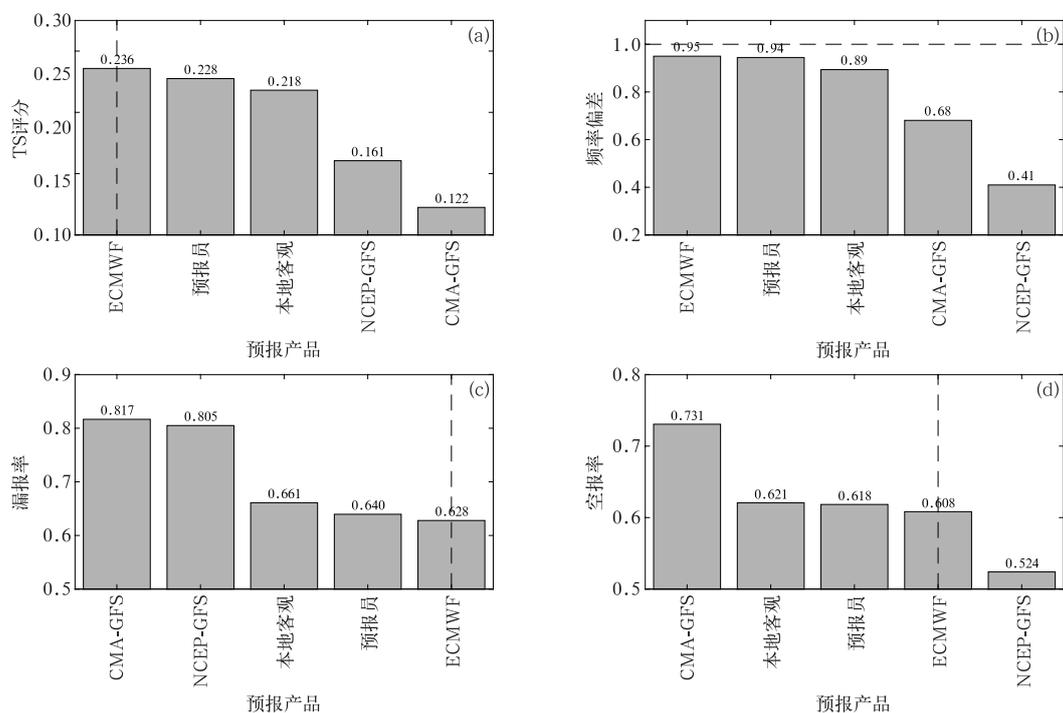


图 5 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 72 h(对应模式 20 时起报的 84 h)暴雨预报的
(a)TS 评分,(b)频率偏差,(c)漏报率和(d)空报率

Fig. 5 The 72 h forecast of forecasters and local objective method initialized at 08:00 BT
(corresponding to the 84 h forecast of models initialized at 20:00 BT) in terms of
torrential rain during the 2020 Jiangsu main flood season
(a) TS, (b) frequency bias, (c) miss rate, (d) false alarm ratio

很高,但暴雨空报率最低,因此暴雨 TS 评分略高于 CMA-GFS。预报员和本地客观的暴雨漏报率和暴雨空报率均略高于 ECMWF,因此暴雨 TS 评分均略低于 ECMWF。

图 6 为 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 20 时起报的 72 h(对应模式 08 时起报的 84 h)暴雨预报检验评分。结论与图 5 基本一致,主要区别在于 08 时起报的 CMA-GFS 暴雨预报面积偏小的程度相比于 20 时起报的更大,其暴雨空报率也明显下降。

从不同预报时效的总体检验来看:本地客观预报和预报员的暴雨预报 TS 评分 > 区域模式 > 除 ECMWF 以外的全球模式,仅有 24 h 时效的本地客观预报、预报员以及 20 时起报的 CMA-MESO 相比于 ECMWF 模式具有暴雨 TS 评分正技巧,而 08 时起报的 CMA-MESO 则性能较差;区域模式大多暴雨预报面积偏大,空报率较高;全球模式除 ECMWF 以外大多暴雨预报面积偏小,暴雨漏报率较高。

3.2 按降水性质检验

3.2.1 稳定性暴雨预报检验

表 1 和表 2 展示了不同起报时间和预报时效下,不同预报产品的稳定性暴雨 TS 评分。6 个模式里面 ECMWF 的总体表现最好,仅有 20 时起报的 36 h 时效的 CMA-MESO 和 CMA-SH9 以及 08 时起报的 84 h 时效的 NCEP-GFS 相比于 ECMWF 具有暴雨 TS 评分正技巧。预报员不同起报时间和预报时效的暴雨预报 TS 评分与 ECMWF 都相差不大,说明预报员的主观预报参考 ECMWF 模式较多。然而预报员仅有 08 时起报的 24 h 预报和 20 时起报的 48 h 预报相比于 ECMWF 具有暴雨 TS 评分正技巧,且订正技巧不如本地客观预报。值得注意的是 20 时起报的 36 h 时效的 CMA-MESO 和 CMA-SH9 相比于 ECMWF 也具有暴雨 TS 评分正技巧,这主要得益于两者具有较小的暴雨漏报率(表略),但也伴随着较大的暴雨空报面积比(表略)。此

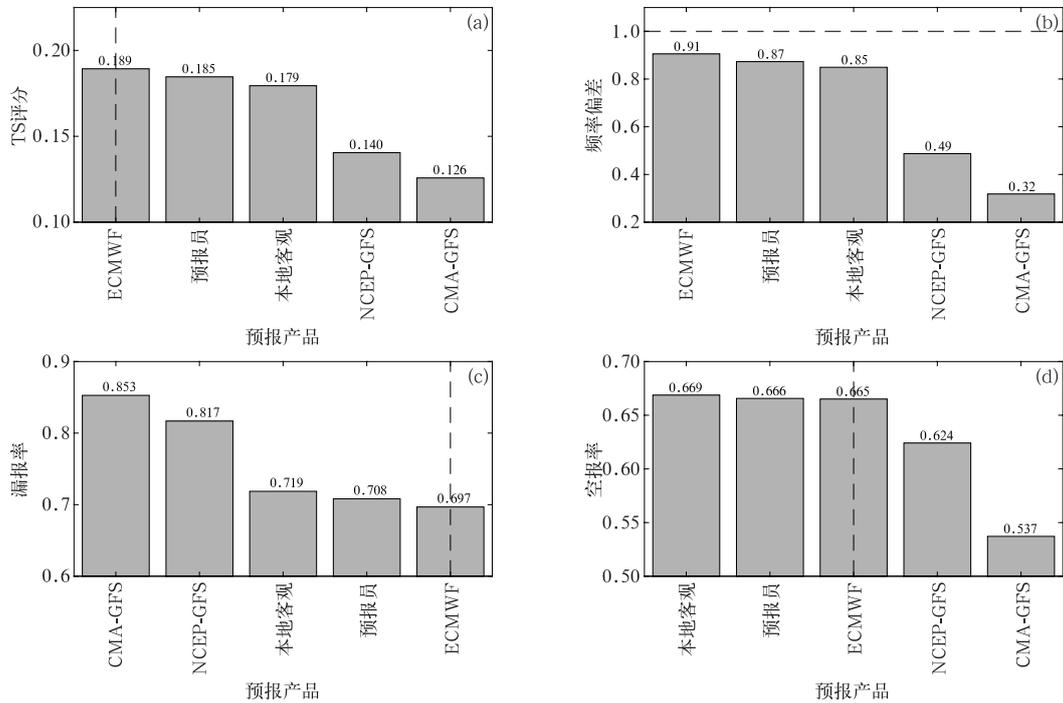


图 6 同图 5, 但为预报员和本地客观 20 时起报
(对应模式 08 时起报)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT (corresponding to the forecast of models initialized at 08:00 BT)

表 1 2020 年江苏主汛期预报员和本地客观 08 时起报的 24, 48, 72 h
(对应模式 20 时起报的 36, 60, 84 h)
暴雨预报中稳定性降水样本的 TS 评分

Table 1 TSs of stable precipitation samples of the 24, 48, 72 h torrential rain forecast of forecasters and local objective method initialized at 08:00 BT during the 2020 Jiangsu main flood season (corresponding to the 36, 60, 84 h torrential rain forecast of models initialized at 20:00 BT)

产品类型	预报产品	24 h	48 h	72 h
全球模式	ECMWF	0.361	0.444	0.406
	NCEP-GFS	0.309	0.321	0.195
	CMA-GFS	0.309	0.230	0.217
区域模式	CMA-MESO	0.382	—	—
	CMA-SH9	0.381	0.332	—
	PWAFS	0.264	0.314	—
客观订正	本地客观	0.394	0.435	0.386
主观预报	预报员	0.369	0.435	0.391

注: TS 评分大于 ECMWF 模式的加粗显示, 下同

Note: TS larger than that the ECMWF model is in bold, the same below

外, 08 时起报的 84 h 时效的 NCEP-GFS 暴雨预报的 TS 评分也高于 ECMWF, 这是由于其暴雨空报面积比很低 (表略)。总体来看, 对于稳定性暴雨,

ECMWF 模式的整体表现较好, 48 h 时效内的本地客观预报对 ECMWF 的订正大多具有暴雨 TS 评分正技巧, 可供预报员参考。

表 2 同表 1, 但为预报员和本地客观 20 时起报 (对应模式 08 时起报)
 Table 2 Same as Table 1, but for forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT (corresponding to the forecast of models initialized at 08:00 BT)

产品类型	预报产品	24 h	48 h	72 h
全球模式	ECMWF	0.348	0.390	0.218
	NCEP-GFS	0.292	0.298	0.269
	CMA-GFS	0.241	0.179	0.181
区域模式	CMA-MESO	0.275	—	—
	CMA-SH9	0.295	0.311	—
	PWAFS	0.329	0.237	—
客观订正	本地客观	0.359	0.423	0.209
主观预报	预报员	0.348	0.402	0.216

3.2.2 对流性暴雨预报检验

表 3 和表 4 展示了不同起报时间和预报时效下, 不同预报产品的对流性暴雨 TS 评分。本地客观预报和预报员仅在 24 h 时效下表现较好, 区域模式 CMA-SH9 和 PWAFS 相比于 ECMWF 大多具有暴雨 TS 评分正技巧, 主要得益于较低的暴雨漏报率(表略), 但也存在暴雨预报面积明显偏大的问题。值得注意的是, 20 时起报的 48 h 和 72 h 时效的 NCEP-GFS 相比于 ECMWF 具有暴雨 TS 评分正技巧, 这是由于其空报面积比很低(表略), 暴雨预报面积明显偏小。此外, 08 时起报的 CMA-MESO

表现较差的原因在于其空报面积比超过 ECMWF 的 2 倍, 但暴雨漏报率相比于 ECMWF 却没有降低, 虚假暴雨落区较多。总体来看, 对于对流性暴雨, 区域模式 CMA-SH9、PWAFS 以及 24 h 时效的本地客观预报总体表现较好, 具有参考价值。

3.3 暴雨个例检验

3.3.1 稳定性暴雨个例检验

图 7 为不同模式 2020 年 6 月 17 日 08 时起报的 36 h 降水预报、预报员和本地客观 2020 年 6 月 17 日 20 时起报的 24 h 降水预报以及对应的 2020 年

表 3 同表 1, 但为对流性降水

Table 3 Same as Table 1, but for convective precipitation samples

产品类型	预报产品	24 h	48 h	72 h
全球模式	ECMWF	0.207	0.121	0.091
	NCEP-GFS	0.080	0.125	0.126
	CMA-GFS	0.077	0.087	0.039
区域模式	CMA-MESO	0.204	—	—
	CMA-SH9	0.214	0.198	—
	PWAFS	0.216	0.161	—
客观订正	本地客观	0.230	0.116	0.085
主观预报	预报员	0.222	0.101	0.087

表 4 同表 2, 但为对流性降水

Table 4 Same as Table 2, but for convective precipitation samples

产品类型	预报产品	24 h	48 h	72 h
全球模式	ECMWF	0.212	0.169	0.165
	NCEP-GFS	0.146	0.053	0.071
	CMA-GFS	0.131	0.156	0.089
区域模式	CMA-MESO	0.126	—	—
	CMA-SH9	0.227	0.180	—
	PWAFS	0.178	0.176	—
客观订正	本地客观	0.242	0.157	0.158
主观预报	预报员	0.272	0.164	0.160

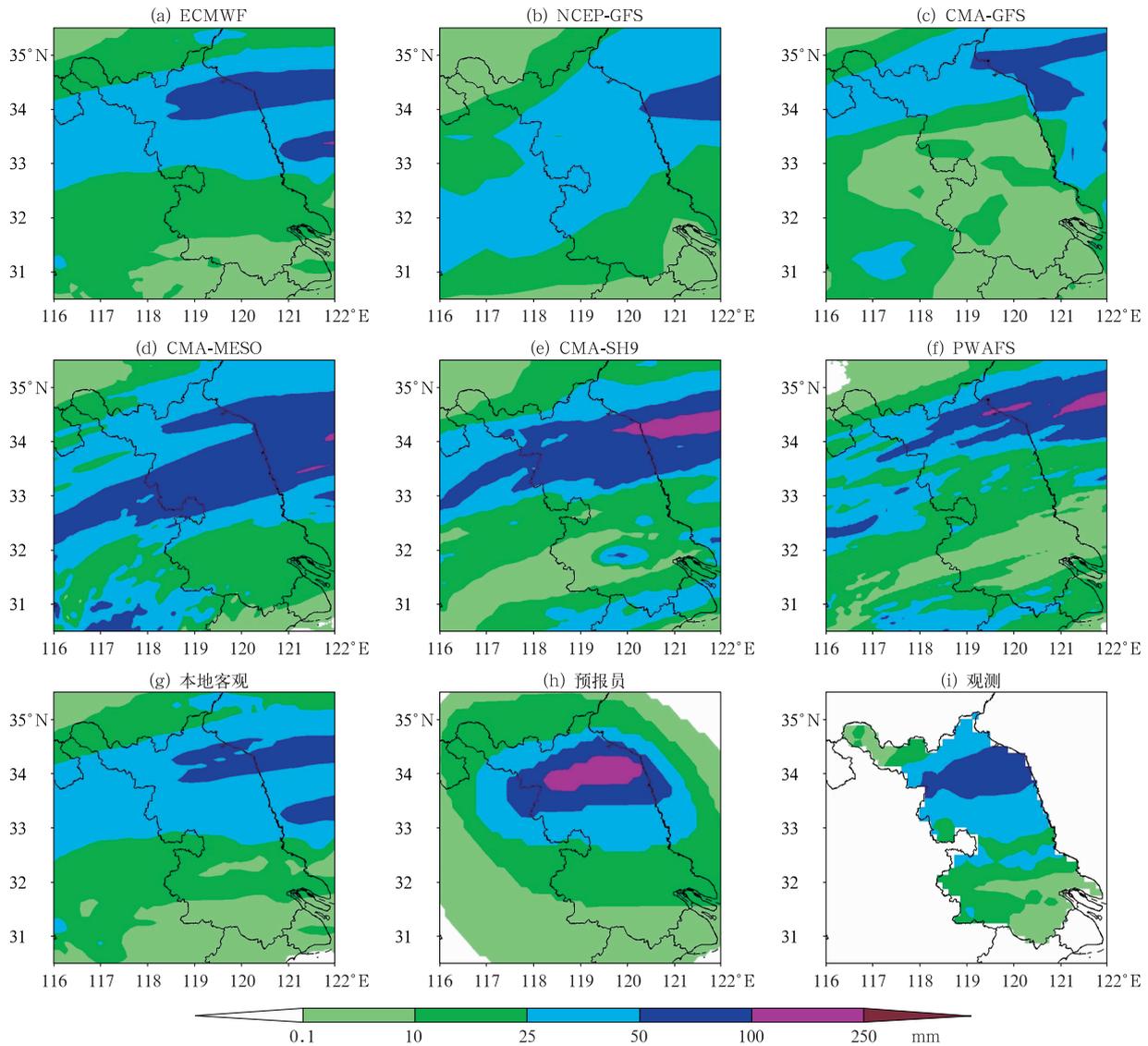


图 7 2020 年 6 月 17 日 08 时起报的 12~36 h 降水预报:(a)ECMWF、(b)NCEP-GFS、(c)CMA-GFS、(d)CMA-MESO、(e)CMA-SH9、(f)PWAFS, 17 日 20 时起报的 0~24 h 降水预报:

(g)本地客观、(h)预报员,以及(i)对应的 17 日 20 时至 18 日 20 时降水观测

Fig. 7 (a-f) the 12-36 h precipitation forecast initialized at 08:00 BT 17, (g, h) the 0-24 h precipitation forecast initialized at 20:00 BT 17 and (i) the corresponding precipitation observation from 20:00 BT 17 to 20:00 BT 18 June 2020

(a) ECMWF, (b) NCEP-GFS, (c) CMA-GFS, (d) CMA-MESO, (e) CMA-SH9, (f) PWAFS, (g) local objective method, (h) forecaster

6 月 17 日 20 时至 18 日 20 时降水观测,表 5 为该稳定性降水个例中不同预报产品暴雨等级的不同评分。下面以此个例为例探讨不同类型模式在稳定性暴雨预报中的偏差原因。此次暴雨过程中,观测的暴雨呈带状分布在沿淮一带。而 NCEP-GFS 和 CMA-GFS 漏报了这次暴雨过程,与其存在较大的暴雨漏报率且暴雨预报面积明显偏小的统计结论相一致,这可能是由于这两个全球模式的分辨率较粗,

与降水相关的物理参数化方案不够准确。全球模式 ECMWF 的分辨率相对较高,对于稳定性暴雨雨带的强度和位置都把握较好,暴雨 TS 评分最高。本地客观预报在该个例中对于 ECMWF 模式的订正效果不理想,暴雨落区有所减小,暴雨 TS 评分相比于 ECMWF 为负技巧。区域模式由于分辨率较高,均报出了沿淮一带的暴雨雨带,但在强度和位置上仍存在一定的差异。PWAFS 预报的暴雨雨带偏窄

表 5 预报员和本地客观 2020 年 6 月 17 日 20 时起报的 24 h(对应模式 2020 年 6 月 17 日 08 时起报的 36 h)暴雨预报的 TS 评分、频率偏差、漏报率和空报面积比
Table 5 TS, frequency bias, miss rate and false alarm area rate for the 24 h torrential rain forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT 17 June 2020 (corresponding to the 36 h torrential rain forecast initialized at 08:00 BT June 17 2020)

产品类型	预报产品	TS 评分	频率偏差	漏报率	空报面积比
全球模式	ECMWF	0.581	0.790	0.342	0.132
	NCEP-GFS	0.026	0.026	0.974	0
	CMA-GFS	0	0.053	1.000	0.053
	CMA-MESO	0.222	1.895	0.474	1.368
区域模式	CMA-SH9	0.487	1.895	0.053	0.947
	PWAFS	0.275	0.711	0.632	0.342
客观订正	本地客观	0.465	0.658	0.474	0.132
主观预报	预报员	0.535	1.868	0	0.868

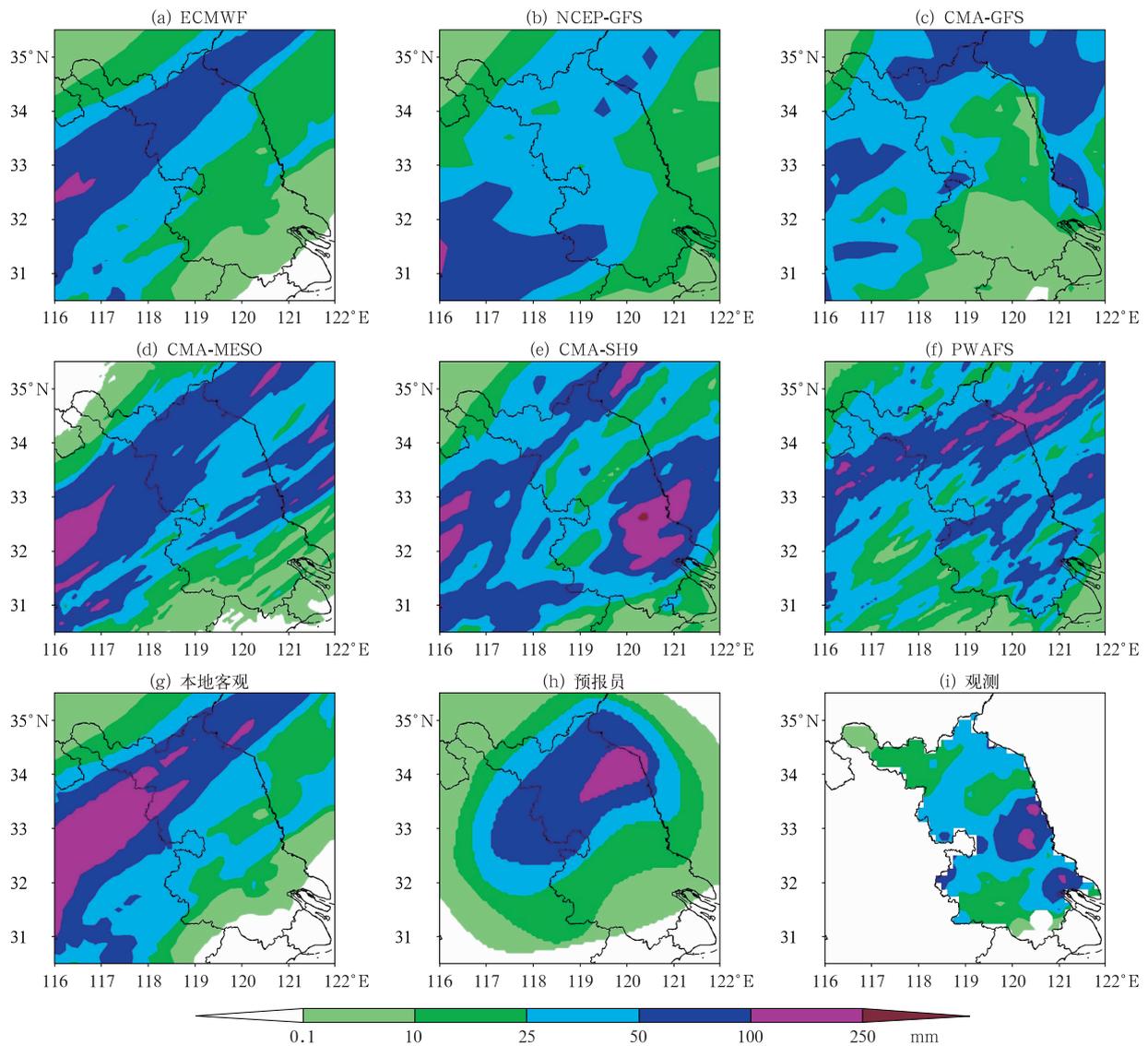


图 8 同图 7, 但为 2020 年 7 月 18 日 08 时对流性暴雨个例
(a-f) 08 时起报, (g, h) 20 时起报, (i) 18 日 20 时至 19 日 20 时观测

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the case on 18 July 2020

(a-f) 12–36 h precipitation forecast initialized at 08:00 BT 18, (g, h) 0–24 h precipitation forecast initialized at 20:00 BT 18, (i) observation from 20:00 BT 18 to 20:00 BT 19

且略偏北,CMA-MESO 模式预报的暴雨雨带偏宽偏南,因此两者暴雨预报的 TS 评分均较低。CMA-SH9 模式预报的暴雨雨带的位置预报较好,暴雨 TS 评分相对较高。这可能是由于 PWFAS 和 CMA-MESO 在 3 km 分辨率上对于对流过程的解析不够准确,而分辨率为 9 km 的 CMA-SH9 采用优化的对流参数化方案和微物理过程,获得了较好的预报效果。预报员对 ECMWF 的暴雨进行了增强和落区扩展,出现了较多的空报,因此暴雨 TS 评分略低于 ECMWF。

3.3.2 对流性暴雨两个例检验

图 8 为不同模式 2020 年 7 月 18 日 08 时起报的 36 h 降水预报、预报员和本地客观预报 18 日 20 时起报的 24 h 降水预报以及对应的 18 日 20 时至 19 日 20 时降水观测,表 6 为该对流性降水个例中不同预报产品暴雨等级的不同评分。以该个例为例探讨不同类型模式在对流性暴雨预报中的偏差原因。此次暴雨过程的雨带主体分为两块,分别位于

江淮之间东南部和沿江东部地区。三个全球模式都没能报出这次对流性暴雨过程的雨带主体部分,其中 ECMWF 的暴雨雨带位于沿淮和淮北地区,而 NCEP-GFS 和 CMA-GFS 暴雨预报面积明显偏小,没有明显的暴雨雨带,这可能是由于全球模式分辨率较粗,对于中小尺度天气系统的预报能力有限所致。区域模式均在不同程度上报出了观测的暴雨雨带,其中 CMA-SH9 模式的暴雨落区与实况最为接近,PWFAS 也在一定程度上报出了两块暴雨主体,但雨带较为分散,CMA-MESO 模式仅报出了江淮之间东部的暴雨主体。CMA-SH9 模式预报好于 PWFAS 和 CMA-MESO 的原因可能也是前者采用了积云对流参数化方案,虽然预报的雨带相对平滑但位置较为准确,后两者采用了 3 km 高分辨率的对流解析取代了积云对流参数化方案,虽然预报的雨带结构较为精细,但暴雨落区的准确度不如 CMA-SH9 模式。本地客观预报和预报员均参考了 ECMWF 模式预报的雨带,落区偏差较大,暴雨 TS 评分较低。

表 6 预报员和本地客观预报 2020 年 7 月 18 日 20 时起报的 24 h(对应模式 2020 年 7 月 18 日 08 时起报的 36 h)暴雨预报的 TS 评分、频率偏差、漏报率和空报面积比

Table 6 TS, frequency bias, miss rate and false alarm area rate for the 24 h torrential rain forecast of forecasters and local objective method initialized at 20:00 BT 18 July 2020 (corresponding to the 36 h torrential rain forecast initialized at 08:00 BT 18 July 2020)

产品类型	预报产品	TS 评分	频率偏差	漏报率	空报面积比
全球模式	ECMWF	0.021	1.133	0.956	1.089
	NCEP-GFS	0	0.333	1.000	0.333
	CMA-GFS	0.016	0.378	0.978	0.356
	CMA-MESO	0.152	1.867	0.622	1.489
区域模式	CMA-SH9	0.306	2.222	0.244	1.467
	PWFAS	0.109	2.156	0.689	1.844
客观订正	本地客观	0.019	1.378	0.956	1.333
主观预报	预报员	0.055	1.978	0.844	1.822

4 结论与讨论

本文对 2020 年主汛期暴雨预报中江苏预报业务常用的三个全球模式 (ECMWF、NCEP-GFS、CMA-GFS)、三个区域模式 (CMA-MESO、CMA-SH9、PWFAS)、本地客观预报、预报员主观预报进行了总体检验评估,并按降水性质分稳定性暴雨和对流性暴雨样本分别进行了预报性能检验,最后展示了典型的稳定性暴雨和对流性暴雨两个例的检验分析结果,得出以下结论:

(1)从总体检验来看,预报员的暴雨主观预报仅在 24 h 时效内相比于 ECMWF 有 TS 评分正技巧,本地客观预报和预报员暴雨预报的 TS 评分 > 区域模式 > 除 ECMWF 以外的全球模式,且无论是全球模式还是区域模式,并非分辨率越高预报性能越好。

(2)区域模式的暴雨预报大多面积偏大,空报率较高;全球模式除 ECMWF 以外的暴雨预报大多面积偏小,漏报率较高。

(3)20 时起报的 CMA-MESO 的预报性能明显好于 08 时起报的预报。

(4)对稳定性暴雨预报,应重点参考 ECMWF、48 h 时效内的本地客观预报和 20 时起报的区域模式 CMA-MESO。

(5)对于对流性暴雨预报,应重点参考区域模式 CMA-SH9、PWAFS 和 24 h 时效内的本地客观预报。

以上结论对于江苏主汛期的实际业务预报具有一定的指示意义。下面就暴雨预报检验中需要注意的几点问题进行讨论:

(1)本文的研究结论来源于江苏区域 2020 年主汛期(6—9 月)的统计结果,暴雨样本数量有限,尤其是稳定性暴雨的数量相对不足,在未来的工作中还需加入更多年份的暴雨样本进行检验分析。考虑到数值模式发展过程中存在不定期的系统升级,模式的预报偏差性能亦可能发生变化,还需要跟踪检验其预报性能的变化。此外,未来还可以考虑将检验区域由江苏拓展到更大的华东区域,有助于揭示江苏范围模式预报性能相对于周边地区的异同之处,亦可为华东区域的暴雨预报业务提供参考。

(2)虽然三个全球模式里面,分辨率较高的 ECMWF 性能明显优于分辨率相对较低的 NCEP-GFS 和 CMA-GFS,但在三个区域模式中,分辨率高达 3 km 的 CMA-MESO 和 PWAFS 总体上不如分辨率 9 km 的 CMA-SH9 模式。虽然 CMA-MESO 和 PWAFS 采用对流解析取代了积云对流参数化方案,但并未取得更准确的预报效果。此外,20 时和 08 时起报的 CMA-MESO 模式在预报性能上存在的较大差异,还需要模式研发人员根据模式的设计研究其中的具体原因。

(3)基于频率匹配的本地客观订正在江苏区域内效果有时并不理想。主要原因包括:首先,模型训练期与检验期的频率偏差不可避免地存在一定的差异;其次,江苏地区的空间训练样本数较小导致模型并不稳定;此外,当原始模式的暴雨频率偏差接近 1 时,频率匹配的订正效果也会受到影响。因此,未来还需要进一步加强客观预报技术的研发,增加多模式集成与人工智能等先进的暴雨订正技术方法的研究。

(4)在一些暴雨过程中,稳定性降水和对流性降水同时存在,如何科学合理地这两类降水类型进行划分以及不同的划分标准是否会对研究结论产生影响也是需要进一步研究的问题。此外,本文基于观测的逐小时降水对稳定性暴雨和对流性暴雨进行

划分,而在实际业务中预报员还需考虑如何根据模式预报资料对暴雨降水性质进行预判以选择合适的预报策略。

(5)在暴雨误差分类检验中,仅仅根据降水性质对暴雨样本进行划分还不够细致。若对暴雨样本分类太粗,可能无法准确刻画不同天气背景引发的暴雨预报的偏差特征;若分类太细,又可能导致检验样本量不足而失去了统计意义。未来可考虑增加更多年份的暴雨样本,并根据不同环流背景对不同暴雨预报产品进行分类检验。

参考文献

- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 党英娜,2018. ECMWF 和华东 WARMS 模式对山东半岛汛期暴雨的预报能力检验[J]. 海洋气象学报,38(4):136-144. Dang Y N, 2018. Verification of the rainstorm forecast by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season in Shandong Peninsula[J]. J Mar Meteor, 38(4):136-144(in Chinese).
- 杜小玲,吴磊,杨秀庄,等,2016. 梅雨锋西段持续性暴雨的环境场特征及贵阳极端降水成因[J]. 暴雨灾害,35(5):415-426. Du X L, Wu L, Yang X Z, et al, 2016. Analysis of environment conditions of a sustained heavy rain event occurred in western Meiyu front and cause of extreme precipitation in Guiyang[J]. Torr Rain Dis, 35(5):415-426(in Chinese).
- 傅云飞,罗晶,王东勇,等,2020. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. 暴雨灾害,39(4):317-324. Fu Y F, Luo J, Wang D Y, et al, 2020. A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai Region[J]. Torr Rain Dis, 39(4):317-324(in Chinese).
- 官宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象,44(9):1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast [J]. Meteor Mon, 44(9):1148-1159(in Chinese).
- 蒋骏,黄文彦,吴建秋,等,2016. 2015 年梅雨期长江下游地区两次暴雨天气过程的成因对比分析[J]. 气象与减灾研究,39(4):260-268. Jiang J, Huang W Y, Wu J Q, et al, 2016. Causes of two heavy rains along the Yangtze River in Jiangsu during Meiyu period in 2015[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 39(4):260-268 (in Chinese).
- 金琼,戴竹君,李聪,等,2020. 2018 年南京梅雨异常特征及环流分析[J]. 大气科学学报,43(3):557-567. Jin Q, Dai Z J, Li C, et al, 2020. Characteristics and associated circulation analysis of Meiyu anomalies in 2018 in Nanjing[J]. Trans Atmos Sci, 43(3):557-567(in Chinese).

- 刘建勇,谈哲敏,顾思南,2011.梅雨期暴雨系统的流依赖中尺度可预报性[J].大气科学,35(5):912-926. Liu J Y, Tan Z M, Gu S N, 2011. Flow-dependent mesoscale predictability of Meiyu heavy rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 35(5):912-926(in Chinese).
- 陆汉城,2019.江淮以南地区暴雨和强降水的中尺度天气动力学研究进展[J].暴雨灾害,38(5):440-449. Lu H C, 2019. The major research advance of rainstorm and heavy precipitation regarding the mesoscale weather dynamics in south of Yangtze-Huaihe River Basin[J]. Torr Rain Dis, 38(5):440-449(in Chinese).
- 吕林宜,王新敏,栗哈,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]. Meteor Environ Sci, 42(1):101-109(in Chinese).
- 毛程燕,李浩文,龚理卿,等,2019.2018年一次非典型梅雨锋暴雨过程诊断分析[J].气象与环境学报,35(6):8-13. Mao C Y, Li H W, Gong L Q, et al, 2019. Diagnostic analysis of a non-typical rainstorm event due to Meiyu fronts in 2018[J]. J Meteor Environ, 35(6):8-13(in Chinese).
- 梅疏影,闵锦忠,2018.不同同化方案在一次梅雨锋暴雨预报中的应用研究[J].气象科学,38(4):432-441. Mei S Y, Min J Z, 2018. The application of different data assimilation systems in the Meiyu front rainstorm forecast[J]. J Meteor Sci, 38(4):432-441(in Chinese).
- 闵锦忠,张申奕,杨婷,2018.一次梅雨锋暴雨发生发展机制的诊断与模拟[J].大气科学学报,41(2):155-166. Min J Z, Zhang S Y, Yang T, 2018. Diagnosing analysis and numerical simulation of formation and development mechanism of a rainstorm associated with Meiyu front[J]. Trans Atmos Sci, 41(2):155-166(in Chinese).
- 寿绍文,2019.中国暴雨的天气学研究进展[J].暴雨灾害,38(5):450-463. Shou S W, 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5):450-463(in Chinese).
- 苏翔,袁慧玲,2020.集合预报统计学后处理技术研究进展[J].气象科技进展,10(2):30-41. Su X, Yuan H L, 2020. The research progress of ensemble statistical postprocessing methods[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2):30-41(in Chinese).
- 苏翔,袁慧玲,朱跃建,2021.四种定量降水预报客观订正方法对比研究[J].气象学报,79(1):132-149. Su X, Yuan H L, Zhu Y J, 2021. A comparative study of four objective quantitative precipitation forecast calibration methods[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):132-149(in Chinese).
- 孙素琴,郑婧,金米娜,等,2017.基于多模式2015年江西省汛期区域性暴雨的检验[J].气象与环境学报,33(2):1-7. Sun S Q, Zheng J, Jin M N, et al, 2017. Validation of forecasting regional rainstorms from multi-models over Jiangxi Province during the flood season in 2015[J]. J Meteor Environ, 33(2):1-7(in Chinese).
- 唐健,代刊,宗志平,等,2018.主客观融合定量降水预报方法及平台实现[J].气象,44(8):1020-1032. Tang J, Dai K, Zong Z P, et al, 2018. Methods and platform realization of the national QPF master blender[J]. Meteor Mon, 44(8):1020-1032(in Chinese).
- 许晨璐,王捷捷,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 C L, Wang J J, Huang L P, 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution[J]. Acta Meteor Sin, 75(6):851-876(in Chinese).
- 张舒阳,闵锦忠,2018.2013年6月23日江淮地区梅雨锋暴雨的发展和维持机制[J].气象科学,38(6):707-718. Zhang S Y, Min J Z, 2018. Development and maintenance mechanism of Meiyu front rainstorm in Jianghuai Area on 23 June 2013[J]. J Meteor Sci, 38(6):707-718(in Chinese).
- 张小雯,唐文苑,郑永光,等,2020. GRAPES_3 km数值模式对流风暴雨预报能力的多方法综合评估[J].气象,46(3):367-380. Zhang X W, Tang W Y, Zheng Y G, et al, 2020. Comprehensive evaluation of GRAPES_3 km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods[J]. Meteor Mon, 46(3):367-380(in Chinese).
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2003. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science[M]. Chichester: John Wiley & Sons.
- Li X, Zeng M J, Wang Y, et al, 2016. Evaluation of two momentum control variable schemes and their impact on the variational assimilation of radarwind data: case study of a squall line[J]. Adv Atmos Sci, 33(10):1143-1157.
- Li X, Zou X L, Zhuge X Y, et al, 2020. Improved Himawari-8/AHI radiance data assimilation with a double cloud detection scheme[J]. J Geophys Res: Atmos, 125(13):e2020JD032631.
- Zhu Y J, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. Wea Forecasting, 30(5):1109-1124.

(本文责编:戴洋)