

沈文强, 钱浩, 马昊, 等, 2023. 浙江梅汛期暴雨预报的客观订正方案对比分析[J]. 气象, 49(6):697-707. Shen W Q, Qian H, Ma H, et al, 2023. Objective correction schemes on the forecast of torrential rain during the Meiyu period in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 49(6):697-707(in Chinese).

浙江梅汛期暴雨预报的客观订正方案对比分析*

沈文强¹ 钱浩¹ 马昊¹ 孙长¹ 叶延君²

¹ 浙江省气象台, 杭州 310051

² 浙江省兰溪市气象台, 金华 321100

提 要: 基于 2019—2021 年浙江省自动站观测资料和多模式预报数据, 分析了各模式对梅汛期暴雨预报的综合表现, 并采用 12 组降水订正方案开展了 2020 年和 2021 年浙江省梅汛期降水预报的客观订正, 对比了各订正方案对模式暴雨预报的改进效果。结果表明: ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 梅汛期暴雨预报表现优于 NCEP-GFS 和 CMA-GFS, 且频率偏差关系稳定, 可联合用于开展多模式预报客观订正; 由于逐年梅汛期暴雨特征差异大, 频率匹配算法无法对预报进行有效订正; 最优评分法(OTS)能显著提升 ECMWF 模式暴雨预报 TS 评分, 但空报率有所增加; 对 ECMWF 降水预报经 OTS 量级订正后再开展基于集合平均的概率匹配订正, 能明显改善以大雨带稳定性降水为主的梅汛期暴雨预报质量, 但对于对流性较强的梅汛期暴雨过程订正效果不佳; 优选预报成员的各类多模式融合算法均能够有效改进对流性较强的梅汛期暴雨过程预报质量, 包括多模式平均、自适应集成和时滞集合预报在 2020 年和 2021 年均有明显正技巧; 对各模式降水预报经 OTS 订正后再开展集成预报能够进一步提高梅汛期暴雨预报质量, 且对稳定性暴雨和对流性暴雨过程均有较好的订正能力, 其中经多模式时滞集合分级订正算法集成 OTS 量级订正预报表现最优。

关键词: 客观订正, 梅雨, 暴雨, 频率匹配, 概率匹配, 最优评分法, 多模式集成, 时滞集合预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.040901

Objective Correction Schemes on the Forecast of Torrential Rain During the Meiyu Period in Zhejiang

SHEN Wenqiang¹ QIAN Hao¹ MA Hao¹ SUN Zhang¹ YE Yanjun²

¹ Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310051

² Lanxi Meteorological Office of Zhejiang Province, Jinhua 321100

Abstract: Based on the 2019—2021 rainfall observation and forecasts from multiple NWP models in Zhejiang Province, the performances of five operational models in forecasting torrential rains during the Meiyu period are analyzed. The 12 objective correction schemes are used to hindcast forecasts for the 2020 and 2021 Meiyu periods in Zhejiang, and are comparatively analyzed through the compressive evaluation. The results demonstrate that the skills of ECMWF, CMA-SH9 and CMA-MESO models are better than NCEP-GFS and CMA-GFS models in forecasting the torrential rains in the Meiyu period, and they have stable frequency bias relationships, therefore picked out for objective correction. Frequency matching fails to improve torrential rain quality because of the significant interannual variation in characteristics of torrential rains in the Meiyu period. The optimal score method (OTS) can improve the TS score of ECMWF rainfall

* 浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMD23D050001)、国家自然科学基金青年项目(42105011)和浙江省气象科技计划重点项目(2022ZD01、2021ZD02)共同资助

2022 年 5 月 6 日收稿; 2023 年 4 月 23 日收修定稿

第一作者: 沈文强, 主要从事客观预报技术研究. E-mail: wqshen91@163.com

forecast obviously, but its false alarm ratio is raised. The probability matching correction based on ECMWF ensemble average and corrected forecast by OTS performs good skills in improving the forecast quality of the torrential rains in Meiyu period when steady torrential rain events with large rain bands are the dominant, but its correction is not effective for the convective-dominated torrential rain events. Various multi-model fusion schemes of preferred models, including multi-model averaging, adaptive integration and time-lagged ensemble forecast, can effectively improve the forecast quality of convective-dominated torrential rain events in the 2020 and 2021 Meiyu periods. Those schemes of multi-model fusion integrating OTS corrected models further improve the forecast skill for both steady and convective-dominated torrential rain events. Among them, the time-lagged ensemble algorithm integrating OTS corrected models has the best skill.

Key words: quantitative precipitation forecast, Meiyu, torrential rain, frequency matching, probability matching, optimal score method (OTS), multi-model fusion, time-lagged ensemble forecast

引 言

梅汛期降水是我国东部地区年降水的主要来源之一,梅汛期降水持续时间长,常产生较大范围的暴雨,如 2020 年梅汛期长时间的强降水给长江流域带来大范围的洪涝灾害(张芳华等,2020;刘芸芸和丁一汇,2020)。梅汛期主雨带一方面随着梅雨锋的摆动南北移动,呈现出大尺度降水特征,同时梅雨锋中也存在局地性强的对流,表现出对流性降水特征(陈涛等,2020;刘建勇等,2012)。数值模式对梅汛期雨带位置的预报效果并不稳定,当出现雨带位置预报偏差时,暴雨预报质量明显下降(苏翔等,2021a;马杰等,2021)。不同模式对梅汛期大尺度雨带和对流性降水的预报能力存在显著差异(苏翔等,2022),如何有效综合多种模式降水预报的有效信息,给出更加准确的梅汛期暴雨预报是当前定量降水预报业务中亟待解决的问题。

由于数值模式降水预报常存在干、湿偏差,使用客观方法对数值模式输出降水进行统计订正能够带来预报质量的提升(苏翔等,2021b)。目前业务中常用的统计订正方法可分为对降水量级、降水落区的订正以及二者相结合的方法,其中常用的量级订正方法有频率匹配法、最优评分法、分位数映射和基于集合预报的最优百分位法,此类方法在实践中能够显著改善模式的干、湿偏差(Cannon et al, 2015; 代刊等, 2018; 雷华锦等, 2020; Zhu and Luo, 2015)。比如 Zhu and Luo(2015)对 NCEP-GFS 预报开展频率匹配订正后显著改善了模式降水预报的系统性偏

差,对 ECMWF 应用频率匹配后同样能显著提高晴雨和暴雨预报质量(王丽芳等,2021)。但是,对降水量级开展订正仅能扩大或者缩小雨区,并不改变雨区的中心位置,当模式预报的雨带位置出现较大偏差时,量级订正方法的效果将明显变差。具有降水落区订正能力的方法有概率匹配法、集合平均、多模式动态集成、自适应集成和时滞集合预报等(陈博宇等,2015;代刊等,2018;Jie et al, 2014;唐文苑和郑永光,2019;危国飞等,2020)。如危国飞等(2020)将经过量级订正的两种模式降水在不同量级上按照同期的评分表现开展分级集成,算法在量级订正基础上再次提高了降水评分。

以上客观订正算法在业务中均表现出改善模式降水预报偏差的潜力,但由于梅汛期存在着多种类型的降水预报偏差,这些算法是否能明显改善梅汛期降水特别是暴雨的预报能力,需要进一步分析。此外,梅汛期暴雨过程既有稳定性的大尺度雨带暴雨,也有对流性主导的区域性暴雨过程,各类订正算法在这两类梅汛期暴雨过程中的适用性如何,以往的研究缺乏对此问题的细化讨论,值得深入分析。本文利用多种业务模式的降水预报数据,通过分析对比多种算法对梅汛期暴雨预报的改进效果,探讨适用于浙江省梅汛期暴雨预报的客观订正方案。

1 资料与方法

1.1 研究资料

使用 2019—2021 年 4—8 月浙江省的 1728 个

自动观测站点的逐小时降水观测数据,并累加形成逐3 h和24 h累计雨量。数值模式数据包括 0.125° 分辨率的ECMWF模式、 0.25° 分辨率的CMA全球模式(CMA-GFS)和NCEP-GFS模式、上海9 km模式(CMA-SH9)、3 km分辨率的CMA-MESO区域模式预报的降水数据,预报起报时间包括00时和12时(世界时,下同),预报时效为12~36 h。

1.2 检验方法

对数值模式和各订正方案预报的浙江省梅汛期暴雨($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)开展检验,检验指标包括暴雨TS评分、暴雨预报频率偏差FB、空报率和漏报率,检验评估采用综合性能评分图,各项检验指标的计算公式和综合性能评分图的介绍参见苏翔等(2021b)。

1.3 降水客观订正算法

在降水量级订正算法中,频率匹配法(FM)和最优评分法(OTS)在业务中应用广泛,二者的区别在于优化目标的不同,FM优化模式降水预报的频率偏差,能够明显改善模式的干、湿偏差状况,缓解不同模式对于暴雨的过报或漏报问题(Zhu and Luo, 2015; 苏翔等, 2021b; 李俊等, 2015; 王丽芳等, 2021; 智协飞和吕游, 2019);OTS方法则直接优化模式降水预报的TS评分,在实际使用中发现该方法倾向于适当扩大暴雨区从而减少漏报,以此提高TS评分。

对于模式的降水落区调整,业务中常采用概率匹配的方法,将强度调整后的格点降水场根据大小排序映射到落区预报较好的格点降水场上,从而实现雨带空间上的移动(毕宝贵等, 2016; 代刊等, 2018; 唐健等, 2018; Clark, 2017)。除此之外,多模式集成方法同样具有较好的暴雨落区调整能力,多模式等权重平均(AVG)作为最基础的集成方法,有着悠久的历史。近几年一些新的降水集成算法被提出并进行了业务化的应用。国家气象中心通过在集成权重中引入实时评分和独立性评价,研发了自适应集成算法(ADP),在业务中取得了较好的应用效果(曹勇等, 2022);福建省气象台通过在不同降水量级上应用评分最优化方法计算集成权重,提出

了分级最优集成订正算法(OW),获得了比单模式订正更好的订正效果(危国飞等, 2020)。除了集成不同模式的预报来提高降水订正质量,时滞集合预报通过集成同一模式不同时间起报的对未来同一时间的预报能有效提高降水预报的稳定性,以往使用快速更新同化模式来开展时滞集合预报的研究表明,该方法能有效提高降水预报质量(Jie et al, 2014; 唐文苑和郑永光, 2019)。

本研究将采用以上各种订正算法,同时设计多种算法组合方案,开展浙江省梅汛期暴雨预报的多方案对比评估。

1.4 训练期样本采样方法

以上介绍的统计订正算法均需要使用历史样本构造训练期,在训练期中采样建模,最后进行预报。常用的训练期包括滑动训练期、准对称滑动训练期,本研究中使用准对称滑动训练期进行建模,具体而言,使用预报日前30 d和上一年同日后30 d,共60 d样本进行建模。准对称滑动训练期在业务中应用广泛,效果较好,吴启树等(2016)、苏翔等(2021b)等不少研究对此都有讨论,具体不再赘述。因订正方案的训练需要采用上一年的预报数据,而部分模式仅有2019年以来的数据,因此本文仅对2020年和2021年梅汛期暴雨预报开展订正方案的应用效果评估。

2 检验评估

2.1 不同模式梅汛期预报质量检验

浙江省不同年份的梅汛期暴雨特征差异大。2019年梅汛期从6月17日入梅至7月17日出梅,梅期为一个月;2020年梅汛期从5月29日入梅到7月18日出梅,梅汛期长达50 d,过程中共受9轮强降雨影响,17个站点雨量破历史纪录,累计雨量位列历史第三位;2021年梅汛期从6月10日入梅到7月5日出梅,梅汛期为25 d,低于往年平均值,且暴雨过程多对流性降水,与2020年梅汛期降水特征有明显区别。

为了解不同模式对不同年份梅汛期暴雨预报的性能,首先对业务常用的数值模式在近三年梅汛期

中的 24 h 暴雨预报质量进行评分,结果如图 1。在三年的整体评估中(图 1a),CMA-GFS 预报质量明显低于其他四家模式,空报率和漏报率均较高,表明该模式对暴雨带的位置把握较差,而 NCEP-GFS 则以漏报偏多为主要问题,表明其预报的降水强度偏弱,两个模式的频率偏差明显偏低,预报的暴雨站点数仅为观测的一半。对比 ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 可以发现,中尺度模式均表现出明显的暴雨过报问题,频率偏差超过 1.70,而 ECMWF 全球模式则表现更好。

分析各模式在不同年份的暴雨预报质量可以发现,尽管各年梅汛期暴雨情况不同(图 1b~1d),但 ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 的暴雨预报有着基本相似的关系,即 ECMWF 的暴雨 TS 评分介于 CMA-SH9 和 CMA-MESO 之间,同时频率偏差最低,而 CMA-MESO 和 CMA-SH9 则空报较多,频率偏差明显偏大。NCEP-GFS 的暴雨预报与前三者相比,逐年评分波动大,特别是对 2020 年超长梅汛期的暴雨漏报率过高,TS 评分明显低于前三家模式。CMA-GFS 模式在 2020—2021 年出现明显的漏报和空报,使得其 TS 评分明显下降。

从各模式的逐年评分表现来看,ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 表现优于 NCEP-GFS 和 CMA-GFS,且暴雨评分较为接近,可用于开展多模式集成预报,提高梅汛期暴雨客观预报质量。

2.2 不同订正方案在 2020 年和 2021 年梅汛期中的应用评估

对 ECMWF、CMA-SH9、CMA-MESO 分别应用频率匹配(FM)、最优评分法(OTS)、频率匹配和集合平均概率匹配的融合算法(FM-PM)、最优评分法和集合平均概率匹配的融合算法(OTS-PM)、多模式平均算法(AVG)、多模式分级最优集成算法(OW)和自适应集成算法(ADP)、基于三家模式三个起报时次的多模式时滞集合分级订正算法(LAF)、对单模式 FM 结果进行 AVG 订正(AVG-FM)、对单模式 OTS 结果分别应用 AVG 订正(AVG-OTS)和 OW 订正(OW-OTS)以及 LAF 订正(LAF-OTS),共 12 组订正方案开展 2020 年和 2021 年梅汛期降水预报订正,分析对比各订正方案对于模式梅汛期暴雨预报的改进。各订正方案所使用的数值模式和方案描述详见表 1。

图 2 给出了 2020 年和 2021 年两年梅汛期以及分年梅汛期的暴雨预报订正检验结果。从图 2a 中两年平均的订正评估结果来看,由于 ECMWF 频率偏差不明显,在应用 FM 方案订正后,其暴雨评分略有下降,FM-PM 方案暴雨评分高于 FM 方案,但仍低于 ECMWF 预报。从分年的结果看(图 2b,2c),由于不同年份梅汛期暴雨特征差异大,如 2021 年的梅汛期由对流性暴雨主导,ECMWF 模式出现了明显的漏报(不同于 2020 年),这导致基于历史训练期的 FM 和 FM-PM 方案订正效果不佳。

OTS 算法通过优化模式预报的 TS 评分,大幅提高暴雨预报 TS 评分(达 2.2%),但频率偏差也上升到中尺度模式的水平。OTS-PM 方案进一步提高了暴雨预报 TS 评分,从逐年分析看,2020 年该方案在 OTS 基础上提升了 2.6%,但在 2021 年下降了 0.9%,这是由 ECMWF 集合预报空间分辨率低,对于 2021 年的对流性暴雨预报效果不佳所致。可见对于以大雨带稳定性降水较多的 2020 年梅汛期暴雨,OTS-PM 方案能够非常有效地提高暴雨预报质量。

使用优选的数值预报进行 AVG 和 ADP 算法订正均能够有效提高梅汛期暴雨预报水平,由于优选模式间相对接近的性能表现,使用三个模式进行 AVG 订正后,TS 评分较最优的 CMA-MESO 提高了 4.1%,且频率偏差更加合理,ADP 订正与 AVG 订正效果相当。AVG-FM 方案由于中尺度模式频率匹配后频率偏差明显下降且各模式落区不一致,使得平均后漏报率明显增加,未能有效提高暴雨预报效果。AVG-OTS 方案在两年的梅汛期暴雨预报中均取得较好订正效果,由于 OTS 算法倾向于扩大大雨区而提高 TS 评分,这使得再进行多模式平均时,强降雨重合度将更高,频率偏差下降不明显,而梅汛期暴雨 TS 评分显著提升,较 CMA-MESO 提高了 5.9%,较 OTS 预报提高了 4.9%。

与 AVG 算法订正结果类似,OW 算法订正预报优于三个模式的单独预报,但评分的提升不及 AVG 算法订正;并且,由于在各量级分别应用权重融合,虽然能够使得融合后强降雨量级衰减效应减弱,但由于所使用的中尺度模式暴雨空报偏高,导致订正后的频率偏差高于 AVG 订正。OW-OTS 方案同样不及 AVG-OTS 方案。

LAF 算法与 AVG 算法订正评分接近,但频率

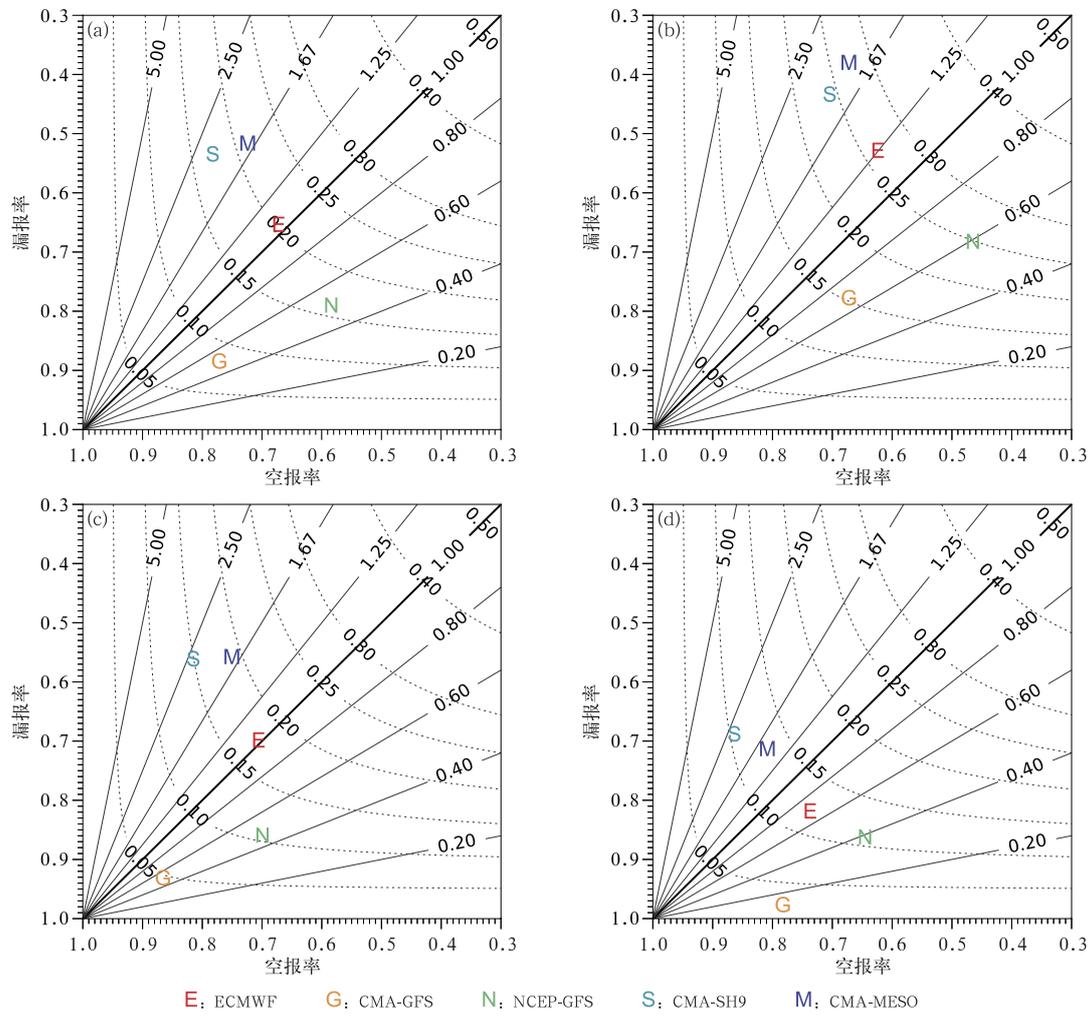


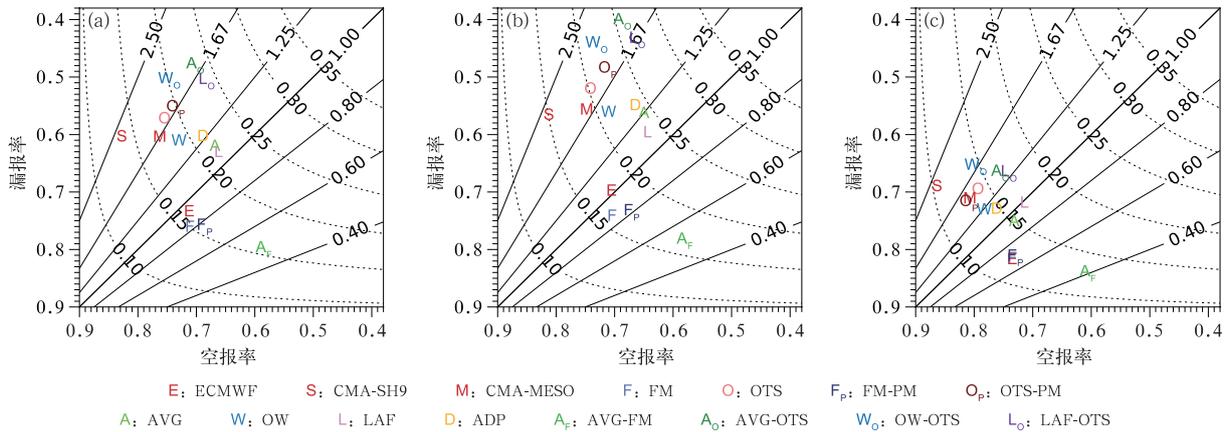
图 1 (a)2019—2021 年三年梅汛期以及(b)2019 年,(c)2020 年,
(d)2021 年梅汛期各模式 24 h 暴雨预报综合评分

Fig. 1 Comprehensive score diagram of 24 h torrential rain ($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) from five models' forecasts during the Meiyu period of (a) 2019—2021, (b) 2019, (c) 2020 and (d) 2021

表 1 各订正方案使用的数值模式与算法描述

Table 1 Descriptions for 12 correction schemes and NWP models used in each scheme

方案名称	数值模式	方案描述
FM	ECMWF	FM 算法订正
OTS	ECMWF	OTS 算法订正
FM-PM	ECMWF, ECMWF 集合平均	FM 算法订正后, 使用 PM 算法调整空间分布
OTS-PM	ECMWF, ECMWF 集合平均	OTS 算法订正后, 使用 PM 算法调整空间分布
AVG	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报使用等权重平均算法进行集成
OW	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报使用 OW 算法进行集成
LAF	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式过去 3 个起报时次预报使用 LAF 算法进行集成
ADP	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报使用 ADP 算法进行集成
AVG-FM	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报分别开展 FM 算法订正后, 进行等权重平均集成
AVG-OTS	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报分别开展 OTS 算法订正后, 进行等权重平均集成
OW-OTS	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式预报分别开展 OTS 算法订正后, 使用 OW 算法集成
LAF-OTS	ECMWF, CMA-SH9, CMA-MESO	对各模式过去 3 个起报时次预报分别开展 OTS 算法订正后, 使用 LAF 算法集成



注:曲线和射线分别代表 TS 评分和频率偏差 FB。

图 2 (a)2020—2021 年两年梅汛期以及(b)2020 年,(c)2021 年梅汛期 ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 数值模式与 12 组订正方案暴雨预报的综合性能对比

Fig. 2 Performance comparison of torrential rain forecasts for 3 NWP models and 12 correction schemes during the Meiyu period of (a) 2020—2021, (b) 2020 and (c) 2021

偏差优于 AVG 算法,从不同年份看,LAF 算法在 2020 年梅汛期暴雨评分略低于 AVG 算法,而在 2021 年明显优于后者,整体表现较好。LAF-OTS 方案的梅汛期暴雨预报效果优于 AVG-OTS 预报,在各类单模式订正算法和多模式融合算法中表现最佳。

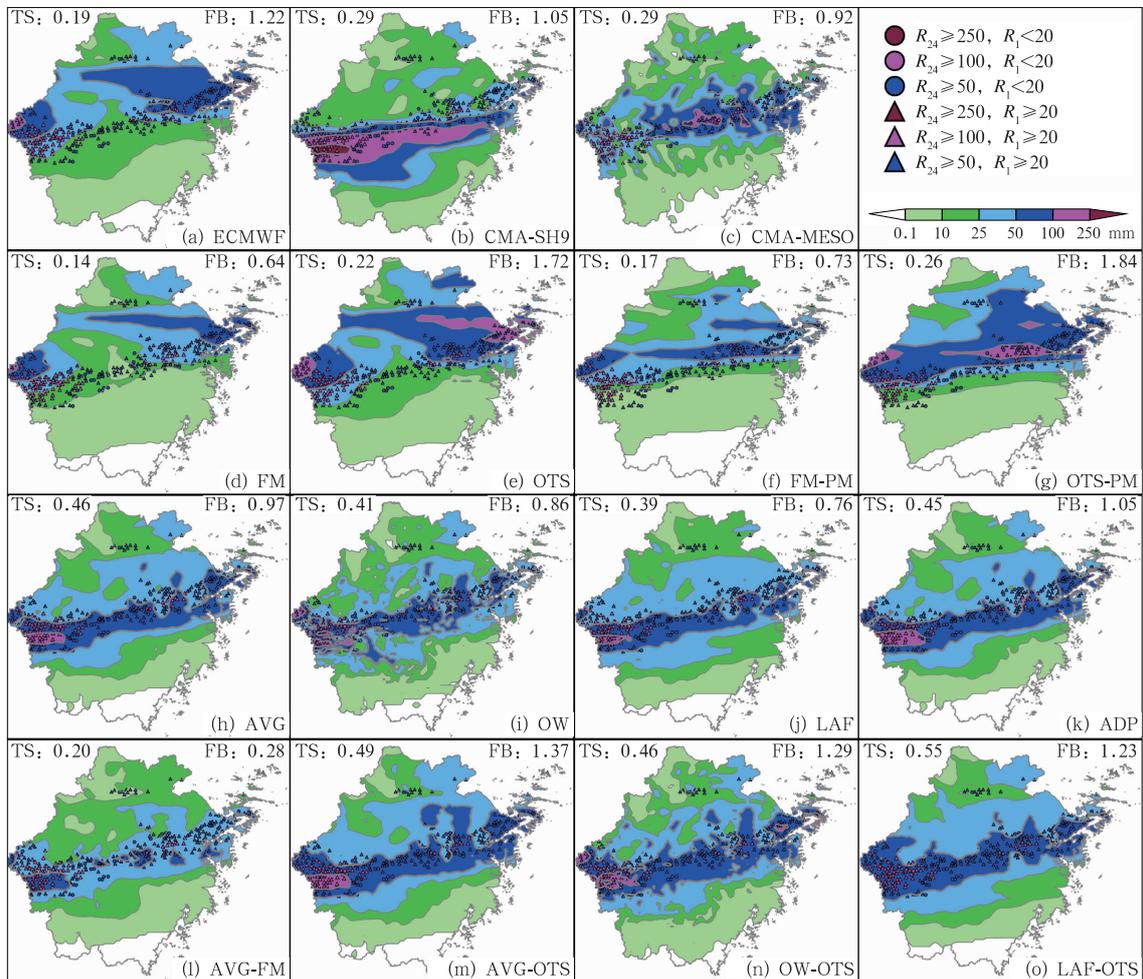
2.3 各订正方案对不同类型梅汛期暴雨过程订正技巧的对比分析

为进一步分析不同订正方案的优缺点,利用最大小时雨量超过 20 mm 的暴雨站点比例区分稳定性暴雨和对流性暴雨,在两类暴雨过程中选取典型暴雨个例进行不同订正算法的订正效果对比。两个个例分别为 2020 年 6 月 29—30 日浙中地区对流性大暴雨过程和 2020 年 6 月 21—22 日浙北地区稳定性暴雨过程。

2020 年 6 月 29—30 日的暴雨过程为高空冷槽和低层冷切变型暴雨过程。本次过程对流性强,雨带中对流性暴雨站点占比达 87%。实际业务中发现,对此类过程 ECMWF 预报雨带位置常偏北,预报员通常基于个人经验将其预报的雨带向南订正,分析客观订正算法对此类过程的适用性有助于提高业务预报质量。图 3 给出了各数值模式和客观订正方案预报以及站点观测的降水,实况暴雨主体位于切变南侧暖区低空急流区内,ECMWF 将暴雨落区报在低层切变线附近,雨带较实况偏北 50~100 km,CMA-SH9 和 CMA-MESO 均较好地预报

了雨带位置(图 3a~3c)。FM 订正减弱了 ECMWF 的降水量级使得暴雨范围缩小,进一步放大了雨带位置偏差,TS 评分下降,FM-PM 方案调整落区使得雨带整体向南移动了 50~70 km,但由于 FM 订正后的暴雨雨带范围小,移动后评分提升有限(图 3d,3f)。OTS 订正明显扩大了 ECMWF 的暴雨区范围,在雨带东西两端部分抵消了位置偏差引起的漏报问题,TS 评分有所提升,但频率偏差明显上升,空报严重(图 3e)。与 FM-PM 方案类似,OTS-PM 方案对雨带位置调整后相对于 OTS 有正技巧(图 3g)。四种多模式集成算法(AVG、OW、LAF 和 ADP,图 3h~3k)均明显改善雨带的位置偏差,TS 评分大幅提高到 0.4 左右,由于 OW 和 LAF 暴雨区范围偏小,其评分略低于 AVG 和 ADP 订正。在对单模式进行量级订正后再开展集成的方案中(图 3l~3o),AVG-FM 方案预报的暴雨范围明显缩小,漏报明显,而 AVG-OTS、OW-OTS 方案预报的雨带位置和暴雨中心的降水强度均更合理,但频率偏差稍高于不进行量级订正的 AVG 和 OW 预报,而 LAF-OTS 方案预报的暴雨雨带位置与实况最为接近,TS 评分最高,但对雨带西段暴雨中心降水强度有所低估,实况发生的大暴雨未能得到较好体现。

图 4 给出了浙北地区 2020 年 6 月 21—22 日的暴雨过程,本次暴雨过程发生在高空脊前西北气流下的低层暖切变线中,以稳定性降水为主,暴雨站点



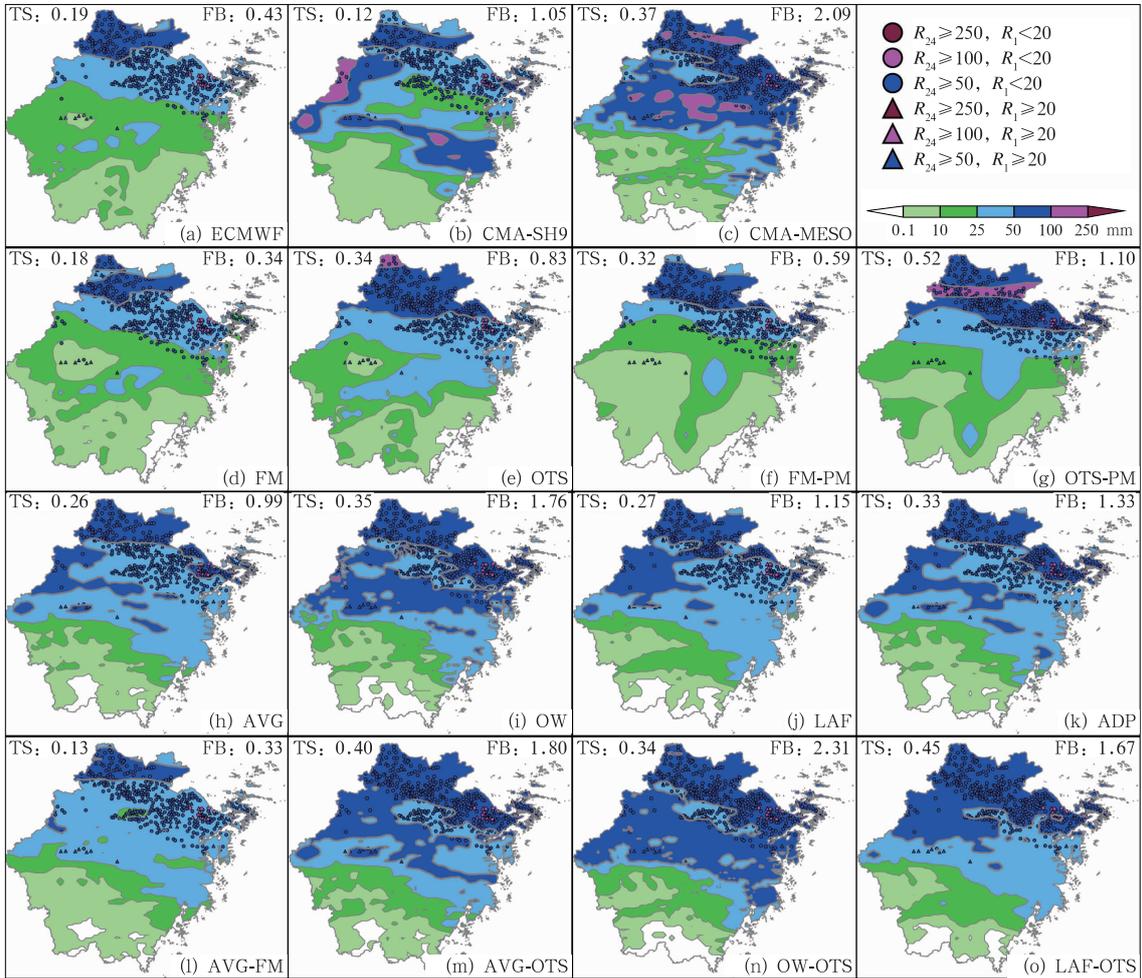
注:根据最大 1 h 累计降水量 R_1 是否达到 20 mm 划分为对流性(三角)和稳定性降水(离散圆点);根据 24 h 累计降水 R_{24} 阈值划分为暴雨(蓝色)、大暴雨(粉色)和特大暴雨(紫色),以不同颜色区分标注。各分图中,左上角和右上角分别为暴雨 TS 评分和预报频率偏差 FB,右下角为各模式或订正方案名称。

图 3 2020 年 6 月 28 日 12 时起报的(a~c)各模式和(d~o)各客观订正方案预报的 12~36 h 时效累计降水(填色)与对应的站点降水实况

Fig. 3 The 12–36 h accumulated rainfall forecast (colored) of (a–c) 3 NWP models and (d–o) 12 correction schemes initialized at 12 UTC 28 June 2020 and the corresponding rainfall observations

中仅有 17% 的站点最大小时雨量超过 20 mm。三家数值模式中(图 4a~4c),ECMWF 和 CMA-SH9 均较好地预报了浙北北部的暴雨区,但都漏报了杭州东部到舟山一带的暴雨,此外 CMA-SH9 对杭州西部的分散性暴雨和浙中一带局地对流性暴雨也出现了非常明显的空报,CMA-MESO 对本次暴雨过程基本无漏报,但在浙北南部出现了明显的空报,虽然其 TS 评分明显高于 ECMWF 和 CMA-SH9,但频率偏差也明显偏高、空报严重。FM 订正略减弱了降水量级,使得暴雨区进一步缩小,评分相较于

ECMWF 略有下降,而 OTS 订正明显增强了暴雨强度,暴雨区范围明显扩大,使得漏报问题缓解,TS 评分明显上升(图 4d,4e)。由于集合平均场对本次稳定性暴雨过程雨带位置预报较好,FM-PM 方案和 OTS-PM 方案预报的暴雨位置和范围均优于 FM 和 OTS 预报,TS 评分相较于未经 PM 订正的预报提升了 15% 以上(图 4f,4g)。四种多模式集成算法(AVG、OW、LAF 和 ADP,图 4h~4k)预报的暴雨评分均优于 ECMWF 和 CMA-SH9,低于 CMA-MESO。对比 AVG-FM 和 AVG-OTS 方案



注:根据最大 1 h 累计降水量 R_1 是否达到 20 mm 划分为对流性(三角)和稳定性降水(离散圆点);
根据 24 h 累计降水 R_{24} 阈值划分为暴雨(蓝色)、大暴雨(粉色)和特大暴雨(紫色),以不同颜色区分标注。
各分图中,左上角和右上角分别为暴雨 TS 评分和预报频率偏差 FB,右下角为各模式或订正方案名称。

图 4 2020 年 6 月 20 日 12 时起报的(a~c)各模式和(d~o)各客观订正方案预报的
12~36 h 时效累计降水(填色)与对应的站点降水实况

Fig. 4 The 12–36 h accumulated rainfall forecast (colored) of
(a–c) 3 NWP models and (d–o) 12 correction schemes initialized at
12 UTC 20 June 2020 and the corresponding rainfall observations

(图 4l, 4m), 后者明显优于前者, 且 AVG-OTS 方案也优于各模式和 OTS 订正。对比三种算法集成各模式经 OTS 订正的预报 (AVG-OTS、OW-OTS 和 LAF-OTS, 图 4m~4o), LAF-OTS 方案明显优于 AVG-OTS 和 OW-OTS 方案集成, 这主要得益于其暴雨空报率低于后两者。

为进一步对比分析各订正方案在不同对流性强度暴雨过程中的优劣, 统计了逐日暴雨过程中各方案评分, 并计算暴雨站点中最大小时雨量超过 20 mm 的站点比例用以指示暴雨过程的对流性程度(图 5)。从图中可以看出, FM、FM-PM 以及

AVG-FM 方案整体表现不佳。OTS 算法明显优于 FM 算法, 且该方法在稳定性为主的暴雨过程 ($R < 0.42$) 中表现优秀, 表明 ECMWF 对此类暴雨过程雨带位置具有较好的预报能力, OTS-PM 方案能够进一步改进暴雨 TS 评分, 对于稳定性暴雨过程该方案整体表现十分出色, 在多次大过程中为最优方案, 但对于对流性较强的暴雨过程表现一般, 这表明 ECMWF 集合平均的强降水落区对于对流性较强的暴雨雨带位置预报能力较差。多模式集成算法整体优于单模式订正算法, 而对各模式开展 OTS 订正降水量级后再进行多模式集成订正 (AVG-OTS、

OW-OTS 和 LAF-OTS 方案)预报的暴雨 TS 评分整体优于其他算法,且对稳定性暴雨和对流性暴雨

过程均有较好的订正能力,三者中 LAF-OTS 方案订正的暴雨 TS 评分更优。

起报时间 (年月日时) /UTC	观测 暴雨 站数 /个	R	各方案TS评分											
			FM	OTS	FM- PM	OTS- PM	AVG	OW	LAF	ADP	AVG- FM	AVG- OTS	OW- OTS	LAF- OTS
2021061012	127	0.96	0	0	0	0	0.06	0.04	0.06	0.07	0	0.07	0.1	0.06
2021061000	151	0.95	0	0	0	0	0.07	0.12	0.09	0.11	0	0.07	0.13	0.1
2020062812	311	0.87	0.14	0.22	0.17	0.26	0.46	0.41	0.39	0.45	0.2	0.49	0.46	0.55
2020070112	397	0.83	0	0	0	0	0.23	0.24	0.14	0.21	0.07	0.23	0.27	0.12
2021061112	187	0.82	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
2020062912	139	0.81	0.19	0.19	0.23	0.22	0.2	0.23	0.29	0.17	0.15	0.25	0.22	0.31
2021062600	137	0.79	0	0.19	0.03	0.05	0.09	0.1	0.09	0.1	0.06	0.1	0.11	0.09
2020062900	446	0.76	0.12	0.27	0.23	0.38	0.43	0.45	0.59	0.45	0.41	0.45	0.39	0.59
2020070200	378	0.75	0.11	0.18	0.13	0.18	0.26	0.24	0.2	0.24	0.06	0.33	0.3	0.19
2020060412	134	0.75	0.03	0.04	0.02	0.06	0.09	0.08	0.08	0.09	0.06	0.07	0.11	0.12
2021062712	115	0.73	0.04	0.05	0.09	0.08	0	0.03	0	0	0	0.01	0.04	0.03
2020070800	203	0.72	0.3	0.18	0.11	0.24	0.29	0.29	0.37	0.29	0.36	0.25	0.24	0.36
2021062612	196	0.7	0.01	0.08	0.01	0.04	0.07	0.09	0.17	0.09	0.06	0.09	0.09	0.16
2021062812	190	0.69	0.15	0.25	0.17	0.29	0.18	0.2	0.34	0.22	0.09	0.29	0.22	0.33
2020060400	169	0.64	0.11	0.1	0.2	0.24	0.14	0.11	0.11	0.13	0.08	0.13	0.09	0.15
2021062700	136	0.64	0.41	0.2	0.17	0.18	0.26	0.24	0.28	0.25	0.34	0.24	0.21	0.25
2020062400	172	0.62	0.11	0.25	0.42	0.29	0.24	0.21	0.26	0.23	0.27	0.21	0.2	0.23
2021062800	104	0.59	0.23	0.23	0.17	0.16	0.16	0.11	0.08	0.15	0.09	0.19	0.17	0.14
2020070712	291	0.57	0.39	0.3	0.36	0.32	0.38	0.25	0.25	0.35	0.36	0.33	0.27	0.23
2021061200	235	0.57	0	0	0	0	0.05	0.05	0.02	0.06	0.01	0.07	0.09	0
2020060112	144	0.55	0	0.03	0	0.01	0.23	0.29	0.11	0.27	0.01	0.31	0.39	0.27
2020070600	327	0.53	0.05	0.08	0	0.03	0.62	0.49	0.58	0.54	0.49	0.56	0.49	0.53
2021062900	373	0.51	0.29	0.33	0.33	0.36	0.35	0.31	0.38	0.33	0.28	0.33	0.35	0.4
2021062912	280	0.48	0.3	0.32	0.42	0.35	0.38	0.37	0.37	0.37	0.4	0.33	0.31	0.3
2020060200	305	0.47	0.11	0.18	0.01	0.06	0.43	0.34	0.56	0.44	0.31	0.38	0.35	0.36
2021070100	159	0.47	0	0.01	0	0	0.08	0.25	0.14	0.13	0	0.28	0.36	0.27
2020070512	252	0.46	0.08	0.16	0.05	0.07	0.48	0.43	0.44	0.5	0.28	0.49	0.46	0.45
2020070300	119	0.46	0	0	0	0	0.09	0.11	0.11	0.09	0	0.1	0.13	0.02
2020070612	206	0.44	0.23	0.24	0.15	0.25	0.54	0.53	0.49	0.57	0.56	0.45	0.49	0.35
2021063012	158	0.42	0.47	0.34	0.51	0.42	0.25	0.27	0.29	0.3	0.26	0.38	0.29	0.26
2021063000	140	0.39	0.32	0.31	0.09	0.28	0.37	0.32	0.32	0.38	0.53	0.28	0.25	0.3
2020060212	213	0.38	0.22	0.26	0.23	0.26	0.27	0.24	0.32	0.26	0.16	0.3	0.24	0.39
2021061812	169	0.36	0.03	0.14	0.09	0.09	0	0	0.07	0	0	0	0.09	0.09
2020061712	208	0.34	0.3	0.6	0.36	0.58	0.5	0.33	0.43	0.47	0.04	0.56	0.43	0.48
2020060300	158	0.34	0.28	0.32	0.13	0.32	0.17	0.27	0.26	0.17	0.09	0.31	0.23	0.29
2020071500	107	0.31	0.03	0.28	0.07	0.22	0.13	0.13	0.11	0.12	0.09	0.16	0.11	0.1
2021061912	100	0.3	0.05	0.1	0.03	0.05	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02
2020070500	139	0.29	0.54	0.59	0.46	0.55	0.48	0.46	0.5	0.47	0.46	0.52	0.49	0.53
2020061812	149	0.26	0.09	0.19	0.22	0.23	0.01	0.04	0.07	0.05	0	0.25	0.12	0.26
2020061800	426	0.24	0.65	0.6	0.76	0.67	0.36	0.16	0.46	0.34	0.13	0.55	0.35	0.6
2020070700	152	0.24	0.03	0.18	0.11	0.25	0.19	0.21	0.2	0.2	0.18	0.18	0.18	0.21
2020071412	131	0.24	0.43	0.33	0.61	0.39	0.37	0.3	0.35	0.37	0.11	0.35	0.33	0.31
2020052900	594	0.23	0.28	0.29	0.16	0.23	0.28	0.28	0.25	0.28	0.2	0.32	0.28	0.35
2020052812	297	0.2	0.14	0.16	0.23	0.16	0.1	0.15	0.08	0.09	0.04	0.18	0.2	0.19
2020062012	413	0.17	0.18	0.34	0.32	0.52	0.26	0.35	0.27	0.33	0.13	0.4	0.34	0.45
2021061900	330	0.16	0	0.01	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01
2020061912	410	0.11	0.11	0.24	0.03	0.38	0.17	0.24	0.06	0.23	0	0.29	0.35	0.25
2020061900	466	0.1	0.18	0.5	0.3	0.59	0	0	0	0	0	0.24	0.2	0.25
2020062000	458	0.09	0.04	0.42	0.04	0.6	0.35	0.32	0.13	0.35	0.01	0.59	0.54	0.57

注:R为暴雨站点中最大小时雨量达 20 mm 以上的站点比例,表格中的暴雨过程按 R 降序排列,各方案评分按由高到低填深红到深蓝色。

图 5 超 100 个站出现暴雨的逐日暴雨过程中各客观订正方案的暴雨预报 TS 评分对比

Fig. 5 Comparison of the daily TS score of the torrential rain forecasted by 12 correction schemes

3 结论和讨论

本文利用 2019—2021 年浙江省的自动站观测和多种业务模式降水预报资料,分析了各业务模式近几年对浙江梅汛期暴雨的预报性能,通过采用频率匹配、概率匹配、最优评分法、多模式分级最优集成、自适应集成、多模式时滞集合预报以及量级订正后再集成共 12 组客观订正方案开展了 2020 年和 2021 年浙江省梅汛期暴雨的客观订正预报,分析对比了各订正方案对模式暴雨预报的改进效果。主要得到以下结论:

(1) 五类常用数值模式梅汛期暴雨预报检验评估结果表明,ECMWF、CMA-SH9 和 CMA-MESO 表现整体较好且预报性能接近,但中尺度模式空报偏多,预报频率偏差较大,而全球模式中 NCEP-GFS 漏报问题突出,逐年预报质量波动大,CMA-GFS 由于漏报和空报问题均较严重,对梅汛期暴雨的预报质量明显低于其他模式;

(2) 由于不同年份梅汛期暴雨特征差异大,频率匹配算法无法对预报进行有效订正,而最优评分法能提升模式暴雨,特别是稳定性暴雨预报的 TS 评分,但空报率有所增加,预报频率偏差上升;

(3) OTS-PM 方案能够明显改善以大雨带稳定性降水为主的梅汛期暴雨预报质量,但对于对流性降水主导的梅汛期暴雨订正效果不佳;

(4) 优选成员的多模式融合算法均能够有效改进梅汛期对流性较强的暴雨过程预报质量,包括多模式平均、自适应集成和时滞集合预报在不同年份均有明显正技巧,但对于稳定性暴雨过程整体表现一般;

(5) 对各模式经 OTS 订正量级后再进行多模式集成能够进一步提高梅汛期暴雨预报质量,且对稳定性暴雨和对流性暴雨过程均有较好的订正能力,其中 LAF-OTS 方案表现最优,提升幅度最大。

本文通过对浙江省梅汛期暴雨开展数值模式和客观订正方案的预报效果检验,评估出适合浙江省梅汛期暴雨预报的客观订正方案,对梅汛期暴雨预报订正提供了有益的参考。由于对算法模型参数的调优可能进一步提升算法的暴雨预报质量,从而对评估结果产生影响,对这一问题还需要进行更深入的讨论。

参考文献

- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).
- 曹勇,张恒德,郭云谦,等,2022. 基于多模式预报优选融合技术的短时定量降水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),50(5):10-15. Cao Y, Zhang H D, Guo Y Q, et al, 2022. Short-term quantitative precipitation forecast based on optimization fusion technology of multi-model forecasts[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 50(5):10-15(in Chinese).
- 陈博宇,代刊,郭云谦,2015. 2013 年汛期 ECMWF 集合统计量产品的降水预报检验与分析[J]. 暴雨灾害,34(1):64-73. Chen B Y, Dai K, Guo Y Q, 2015. Precipitation verification and analysis of ECMWF ensemble statistic products in 2013 flooding season[J]. Torrent Rain Dis, 34(1):64-73(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).
- 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).
- 雷华锦,马佳培,李弘毅,等,2020. 基于分位数映射法的黑河上游气候模式降水误差订正[J]. 高原气象,39(2):266-279. Lei H J, Ma J P, Li H Y, et al, 2020. Bias correction of climate model precipitation in the upper Heihe River Basin based on quantile mapping method[J]. Plateau Meteor, 39(2):266-279(in Chinese).
- 李俊,杜钧,陈超君,2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究[J]. 气象,41(6):674-684. Li J, Du J, Chen C J, 2015. Applications of “frequency-matching” method to ensemble precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 41(6):674-684(in Chinese).
- 刘建勇,谈哲敏,张熠,2012. 梅雨期 3 类不同形成机制的暴雨[J]. 气象学报,70(3):452-466. Liu J Y, Tan Z M, Zhang Y, 2012. Study of the three types of torrential rains of different formation mechanism during the Meiyu period[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):452-466(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).
- 马杰,尹姗,金荣花,等,2021. 一次梅汛期极端降雨过程雨带位置模式预报性能对比分析[J]. 大气科学,45(3):487-498. Ma J, Yin S, Jin R H, et al, 2021. Comparative analysis of forecast evaluation for rain band position in an extreme Meiyu rainfall event[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):487-498(in Chinese).
- 苏翔,康志明,庄潇然,等,2021a. 2020 年梅雨期暴雨雨带预报不确

- 定性分析[J]. 气象, 47(11): 1336-1346. Su X, Kang Z M, Zhuang X R, et al, 2021a. Uncertainty analysis of heavy rain belt forecast during the 2020 Meiyu period[J]. Meteor Mon, 47(11): 1336-1346(in Chinese).
- 苏翔, 袁慧玲, 朱跃建, 2021b. 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, 2021b. A comparative study of four objective quantitative precipitation forecast calibration methods[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 132-149(in Chinese).
- 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).
- 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).
- 唐文苑, 郑永光, 2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J]. 气象, 45(3): 305-317. Tang W Y, Zheng Y G, 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time-lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and forecast[J]. Meteor Mon, 45(3): 305-317(in Chinese).
- 王丽芳, 漆梁波, 周伟, 等, 2021. 频率匹配技术在暴雨预报中的应用及改进分析[J]. 暴雨灾害, 40(4): 352-361. Wang L F, Qi L B, Zhou W, et al, 2021. On the application and improvement of the frequency matching method to rainstorm forecasts[J]. Torr Rain Dis, 40(4): 352-361(in Chinese).
- 危国飞, 刘会军, 吴启树, 等, 2020. 多模式降水分级最优权重集成预报技术[J]. 应用气象学报, 31(6): 668-680. Wei G F, Liu H J, Wu Q S, et al, 2020. Multi-model consensus forecasting technology with optimal weight for precipitation intensity levels[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6): 668-680(in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 郭弘, 等, 2016. MOS温度预报中最优训练期方案[J]. 应用气象学报, 27(4): 426-434. Wu Q S, Han M, Guo H, et al, 2016. The optimal training period scheme of MOS temperature forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(4): 426-434(in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1405-1414(in Chinese).
- 智协飞, 吕游, 2019. 基于频率匹配法的中国降水多模式预报订正研究[J]. 大气科学学报, 42(6): 814-823. Zhi X F, Lyu Y, 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method[J]. Trans Atmos Sci, 42(6): 814-823(in Chinese).
- Cannon A J, Sobie S R, Murdock T Q, 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? [J]. J Climate, 28(17): 6938-6959.
- Clark A J, 2017. Generation of ensemble mean precipitation forecasts from convection-allowing ensembles [J]. Wea Forecasting, 32(4): 1569-1583.
- Jie W H, Wu T W, Wang J, et al, 2014. Improvement of 6—15 day precipitation forecasts using a time-lagged ensemble method[J]. Adv Atmos Sci, 31(2): 293-304.
- 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 王蕾)