

王晨迪,朱占云,王敬凯,等,2025.基于多模式最优集成的浙江省水库流域面雨量预报精度评估[J].气象,51(3):324-336.
Wang C D, Zhu Z Y, Wang J K, et al, 2025. Accuracy evaluation of the areal rainfall forecasts for reservoir basin in Zhejiang Province based on objective consensus of multi-model forecasts[J]. Meteor Mon, 51(3):324-336 (in Chinese).

基于多模式最优集成的浙江省水库流域 面雨量预报精度评估*

王晨迪¹ 朱占云² 王敬凯³ 张加易² 张玮玮²

1 浙江省预警信息发布中心,杭州 310000

2 浙江省气象服务中心,杭州 310000

3 成都信息工程大学,成都 610225

提 要: 基于 2019—2023 年 5—10 月浙江省网格化观测和数值模式预报降水数据,以浙江省 32 座大型水库为研究对象,采用多种指标评估了多模式最优集成预报(OCF)模式对流域面雨量的预报精度,并与欧洲中期天气预报中心全球模式(EC 模式)预报结果进行了对比分析。结果表明:OCF 模式对水库流域面雨量的预报精度与水库集水面积、所在地理位置以及引发降水的天气过程相关。整体而言,OCF 模式对集水面积较大的一型水库面雨量预报精度高于大二型水库;模式的预报误差主要来源于漏报,通过降低漏报率,OCF 模式可以显著提升浙中东部地区大二型水库面雨量的预报质量,尤其在预报难度较大的大雨及以上等级面雨量预报中较 EC 模式有明显优势;OCF 模式的预报精度随着预报时效的延长逐渐降低,但其对中雨及以上等级面雨量的预报精度较 EC 模式有显著正调整。对于不同强降水过程而言,OCF 模式在梅汛期(台汛期)对主要受梅雨(台风)影响的水库流域预报能力更高且较 EC 模式表现更好;OCF 模式在梅汛期和台汛期整体上均表现出预报能力随着预报时效的临近逐渐提升的特征,但受台风路径预报精度影响,后者更显著、波动更大,较 EC 模式在 24~120 h 的大部分预报时效内均有明显优势。以上结果可为开展水文气象预报服务提供必要的参考。

关键词: 大型水库,面雨量,数值模式,最优集成,精度评估

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.120902

Accuracy Evaluation of the Areal Rainfall Forecasts for Reservoir Basin in Zhejiang Province Based on Objective Consensus of Multi-Model Forecasts

WANG Chendi¹ ZHU Zhanyun² WANG Jingkai³ ZHANG Jiayi² ZHANG Weiwei²

1 Zhejiang Early Warning Center, Hangzhou 310000

2 Zhejiang Meteorological Service Center, Hangzhou 310000

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: Based on the 2019—2023 grid rainfall observation and multi-model forecasts in Zhejiang Province during the flood season from May to October, the accuracy of the areal rainfall forecasts for 32 large-sized reservoirs within the basin of Zhejiang Province by multi-model objective consensus forecasting (OCF) is evaluated by means of various indicators and methods, and the results are further compared with those of the model of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (EC model). The results demonstrate

* 浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMY24D050004、LZJMY24D050007)和浙江省气象局科技计划项目(2023ZD12)共同资助

2024 年 6 月 16 日收稿; 2025 年 1 月 15 日收修定稿

第一作者:王晨迪,主要从事水文气象及数值模式研究. E-mail:314661342@qq.com

通讯作者:朱占云,主要从事行业气象服务及水文气象技术研究相关工作. E-mail:zhu_zhanyun@163.com

that the forecast accuracy of areal rainfall by OCF model is related to the catchment area of reservoir, the location of reservoir and the synoptic processes bringing precipitation. On the whole, the forecast accuracy of areal rainfall by OCF model for Type I large-sized reservoirs is higher than that for Type II. The forecast error of OCF model mainly comes from the missing alarm. By reducing the missing alarm rate, the forecast accuracy of areal rainfall by OCF model for Type II large-sized reservoirs located in eastern part of the Central Zhejiang can be significantly improved. Especially for the areal rainfall over 15 mm, it has obvious advantages compared to EC model. Although the forecasting accuracy of OCF model decreases gradually with the extension of forecast lead time, it has better effect than EC model in forecasting the areal rainfall over 6 mm. For different heavy precipitation processes in Zhejiang Province, OCF model has higher forecasting ability and better performance than EC model for the reservoir basins that are mainly affected by Meiyu (typhoon) during Meiyu period (typhoon period). The forecasting accuracy of OCF model improves with the approach of forecast lead time during both Meiyu and typhoon periods. However, owing to the influence of the forecasting accuracy of typhoon tracks, the latter fluctuates dramatically and has obvious advantages relative to EC model in most forecast lead time of 24–120 h. The above results could provide some necessary reference for the hydrometeorological service.

Key words: large-sized reservoir, areal rainfall, numerical model, objective consensus, accuracy evaluation

引言

面雨量是水文气象中的一个重要参量,定义为一个特定区域或流域内单位面积上的平均降水量(徐晶等,2001;徐晶和姚学祥,2007),可以反映整个区域的平均降水情况(邓国卫和王敏,2018;杨寅等,2022)。依据面雨量开展水利调度是实现防洪错峰、蓄水兴利的重要非工程措施(黄思琦等,2017)。因此,对流域面雨量的准确预报是水文气象服务的关键,是防汛抗旱决策的重要科学依据,是水旱灾害防御与水库兴利减灾的重要保障(翟盘茂等,2016;曹勇等,2022;杨寅等,2022)。

随着数值模式的稳步发展,其在客观化、量化降水预报中的优势逐渐突显(Reynolds,2003;赵声蓉等,2012;宗志平等,2012;金荣花等,2019;湛芸等,2021),已成为流域面雨量预报的主要参考依据之一(包红军等,2016;杨寅等,2022)。然而,由于不同模式在初始场、动力框架、分辨率、参数化方案、同化技术等方面的不同,各模式对面雨量的预报结果也具有明显差异(杜钧,2002;智协飞等,2013;危国飞等,2020;宋雯雯等,2021;曹勇等,2022)。在淮河流域(刘静等,2014;郝莹等,2019)、浙江省水库流域(朱占云等,2017)和长江流域(邱辉等,2017)的面雨量预报中,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)全球模式(EC模式)整体上优于其他模式。而在大渡河

流域(宋雯雯等,2021)和金沙江中下游(徐诚等,2020)面雨量预报中,中央气象台智能网格具有明显优势;EC模式和中央气象台智能网格在岷江上游面雨量预报中均表现较优(宋雯雯等,2023);EC模式和日本气象厅(JMA)对湖南省水库流域面雨量预报效果相对较好且稳定(廖春花等,2018)。

针对数值模式降水预报存在的干、湿偏差,通过对数值模式直接输出的降水进行客观订正是提升预报质量的有效途径(苏翔等,2021)。对于单一模式而言,频率匹配法和最优评分(OTS)法在降水量级订正方面已经表现出巨大的应用潜力(李俊等,2015;Zhu and Luo,2015;吴启树等,2017;智协飞和吕游,2019;苏翔等,2021)。而多模式集成技术可以合理利用各家模式预报结果以减小模式系统性偏差,避免“单一”确定性数值天气预报结果易存在的预报误区(Toth and Kalnay,1997;杨学胜,2001;杜钧,2002)。研究表明,多模式集成方法的预报效果优于单一模式预报(陈丽娟等,2005;Zhi et al,2011;智协飞等,2013),且在流域面雨量预报中表现较好(Ye et al,2014;杨寅等,2022)。因此,浙江省气象部门基于4个全球模式和一个区域模式发展了多模式最优集成预报(OCF)技术,并已稳定运行近6年,但仍未开展针对浙江省水库流域面雨量预报的系统性精度评估。本文将以前在面雨量预报中最具优势的EC模式(朱占云等,2017)为基准,从不同维度分析2019—2023年5—10月OCF模式对浙江省

水库流域面雨量的预报精度及预报优势,以期将该模式更好地应用于水文气象服务中。

1 研究区域

浙江省地处我国东南沿海,山地和丘陵占全省土地面积的 70% 以上(朱占云等,2017),主要山脉呈西南—东北走向,西南山高坡陡,中部为低山丘陵,东北为冲击平原(图 1b),西高东低的地形特征有利于暴雨形成(叶勇,2008)。其中,春季以连阴雨天气为主;夏初进入梅雨季节,主要影响浙西和浙北地区;夏末秋初台风活动频繁,以台风降水为主,是浙东和浙南地区的主要雨季。降水的时空分布不均匀致使水旱灾害频发、多发、并发(叶勇,2008),为防汛抗旱带来极大的挑战。同时,浙江省水系发达,河流众多,水利资源极其丰富(朱占云等,2017),大型水库占全省流域总面积的 80% 以上(图 1a)。因此,针对大型水库进行 OCF 技术研究,对提升面雨量预报精度、减少洪涝灾害、保障水库自身安全、保障生态安全等意义重大。

本文选取浙江省 32 座大型水库作为研究对象,对 2019—2023 年 OCF 模式在浙江省水库流域面雨量的预报精度进行检验评估。其中,新安江、富春江等 6 座为大一型水库,主要分布在浙西北及浙西南部山区(图 1a,蓝色),山高坡陡,地形复杂,多为年调节或多年调节水库,流域集水面积、汇流面积大,多受梅汛期持续降雨和台风暴雨影响,存在明显的蓄水期、防汛期、放水期和供水期。其余 26 座为大二型水库,主要分布在浙北及浙中的东部低山区(图 1a,黄色),多为日调节或年调节水库,流域集水

面积、汇流面积小,多受台风暴雨影响。

2 资料和方法

2.1 资料

本研究采用的数据主要来源于浙江省气象部门的观测资料和数值模式预报资料。观测资料为 2019—2023 年 5—10 月浙江省气象信息中心整编的 24 h(08—08 时,北京时,下同)累计降水量格点数据(空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$),用于验证预报结果的准确性;预报资料为相同时段 EC 全球模式(空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$)和 OCF 区域模式(空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$)08 时起报的 24~168 h 逐 24 h 累计降水量格点数据。

在开展面雨量预报精度评估之前,需利用网格化降水观测及模式预报数据分别计算 32 座大型水库流域的面雨量观测及预报数据。面雨量的计算方法主要有泰森多边形法、三角形法、算数平均法等,其中算数平均法简便易行,适用于观测站多且分布较为均匀的流域(徐晶等,2001)。本文利用算数平均法计算流域面雨量观测及预报数据。文后开展的工作都是基于水库流域面雨量进行的。

2.2 模式简介

EC 全球数值模式产品是气象业务重点参考的数值模式产品之一,在众多的业务预报模式中表现最好,在实际预报业务中也受到了广大预报员的认可(徐焱等,2019)。2011 年 9 月,中央气象台开始下发 EC 全球模式 0~72 h 逐 3 h、72~240 h 逐 6 h

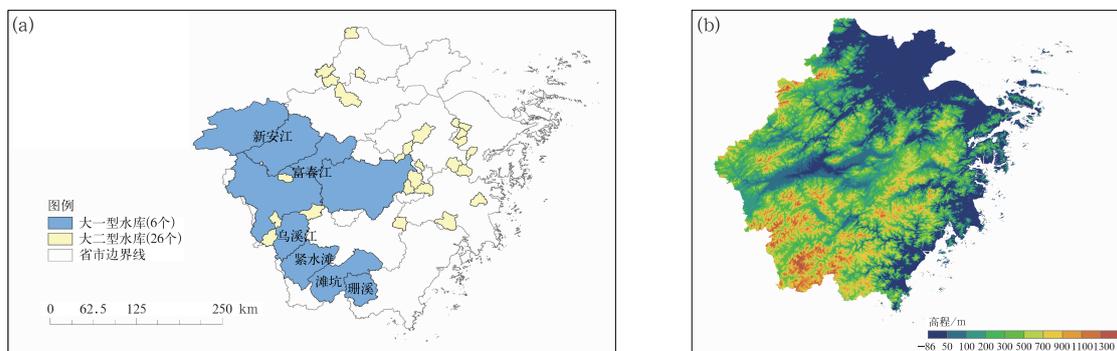


图 1 浙江省(a)32 座大型水库和(b)地形分布

Fig. 1 Distribution of (a) 32 large-sized reservoirs and (b) topography in Zhejiang Province

预报产品,其空间分辨率自 2015 年 1 月起由 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 调整至 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ (吕劲文等, 2023)。

OCF 区域数值模式产品集成了 EC、JMA、美国国家环境预报中心(NCEP)和中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)4 个全球模式以及中国气象局上海区域数值预报模式(CMA-SH9)的优势。具体做法为:对所有模式产品,取每日 08 时起报的 24~168 h 逐 24 h 降水预报序列(其中,EC 模式的 24~72 h 时效降水预报产品为经 OTS 方法订正后的降水预报序列),通过评估各模式在过去 10 d 的预报效果,将归一化的准确率评估结果作为权重系数(24~72 h 时效直接取预报精度最高的模式降水预报序列;96~168 h 时效取预报精度前三名的模式降水预报序列分别乘以对应的权重系数),建立自适应动态权重加权集成方案,从而将不同尺度数值模式的预报结果进行优势集成,获得 24~168 h 逐 24 h、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的最优降水预报场。

2.3 面雨量精度评估方法

本文采用绝对误差检验和模糊评分检验两种方法,对浙江省 32 座大型水库流域 2019—2023 年 5—10 月数值模式面雨量预报精度进行评估。其中,绝对误差(AE)计算如式(1)所示:

$$AE = |R_f - R_o| \quad (1)$$

式中: R_f 为面雨量预报值, R_o 为面雨量实况值。绝对误差可以直观反映预报与实况的实际差异,误差越小,预报效果越好。然而面雨量的预报可以是一个等级范围,定量预报无法判断面雨量等级预报的准确程度(王静等, 2024),因此本文还使用了与等级预报有关的模糊评分方法。

参考我国《江河流域面雨量等级》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2017)划分标准,将 24 h 面雨量划分为小雨($0.1 \sim 5.9$ mm)、中雨($6.0 \sim 14.9$ mm)、大雨($15.0 \sim 29.9$ mm)、暴雨($30.0 \sim 59.9$ mm)、大暴雨($60.0 \sim 149.9$ mm)和特大暴雨(≥ 150.0 mm)6 个等级。其中,特大暴雨等级在本文研究时段内的出现次数仅为千分之一,样本量极少,因此在精度评估中将其忽略,只评估前 5 个等级。当出现空报和漏报时,模糊评分为 0;当预报等级与观测等级一致时,模糊评分(MP_k)的数值与面雨量预报等级 k 、预报与观测误差及该等级的最大等级误差 $MAX(k)$ 相关:

$$MP_k = 60 + 40 \times \left[1 - \frac{|R_f - R_o|}{MAX(k)} \right] \quad (2)$$

式中:第一项是预报基础分,规定为 60 分;第二项为强度预报加权分。

由于模糊评分中并未包含空报和漏报的情况,对空报率(FAR_k)和漏报率(MAR_k)进行了计算评估:

$$FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \times 100\% \quad (3)$$

$$MAR_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \times 100\% \quad (4)$$

式中:下标 k 为面雨量等级, NA_k 为 k 等级面雨量预报正确的日数(即预报等级与观测等级相同), NB_k 为 k 等级面雨量空报日数(即预报等级大于观测等级), NC_k 为 k 等级面雨量漏报日数(即预报等级小于观测等级)。其中,模糊评分反映面雨量预报值与实况值的逼近程度,分值越高,预报效果越好;空报率和漏报率分别反映面雨量预报的空报和漏报程度,二者的分值越低,预报效果越好。

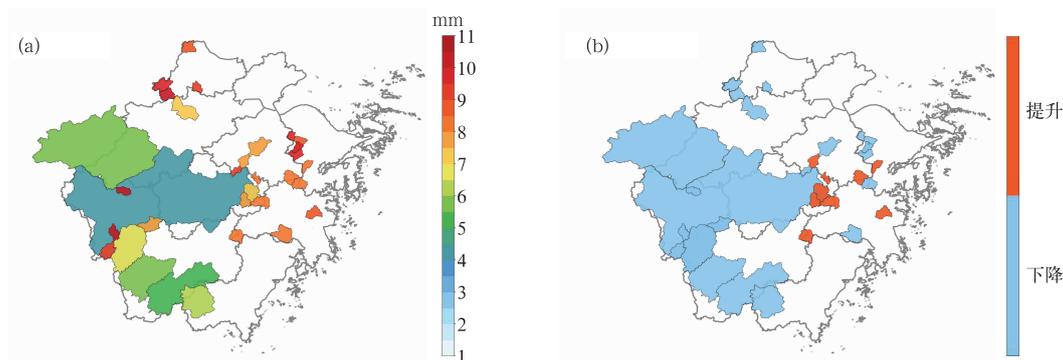
3 结果分析

3.1 整体预报精度评估

3.1.1 不同水库预报精度评估

图 2a 为 2019—2023 年 5—10 月 OCF 模式对 32 座大型水库 24 h 时效面雨量预报的平均绝对误差。由图可知,OCF 模式对大一型水库的面雨量预报误差整体小于大二型水库,大一型和大二型水库的平均绝对误差分别为 $4.2 \sim 6.6$ mm 和 $7.3 \sim 10.3$ mm。通过与 EC 模式的预报误差对比发现,OCF 模式对浙中东部地区半数以上大二型水库面雨量的预报误差更低,预报效果更好(图 2b)。

为进一步评估等级预报精准度,图 3a 给出 2019—2023 年 5—10 月 OCF 模式对 32 座大型水库 5 个等级平均的 24 h 时效面雨量预报模糊评分。与平均绝对误差结果一致(图 2a),OCF 模式对大一型水库的面雨量预报精度整体优于大二型水库,大一型和大二型水库的模糊评分分别为 $37.1 \sim 50.6$ 和 $29.2 \sim 47.7$,主要原因可能是由于面雨量反映的是整个区域的平均降水情况,集水面积大的水库流域对降水强度和相应落区的预报精准度要求更低。大一型水库中,集水面积最大的富春江水库模糊评



注:图 b 中红色代表 OCF 模式预报效果较 EC 模式有所提升,蓝色代表 OCF 模式预报效果不及 EC 模式,下同。

图 2 2019—2023 年 5—10 月浙江省 32 座大型水库 24 h 时效面雨量预报的
(a)OCF 模式的平均绝对误差,(b)基于平均绝对误差的 OCF 较 EC 模式的预报效果
Fig. 2 (a) The average absolute error by OCF model, (b) the forecasting performance of
OCF model compared with EC model based on average absolute error for the 24 h
areal rainfall forecast of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province
from May to October during 2019—2023

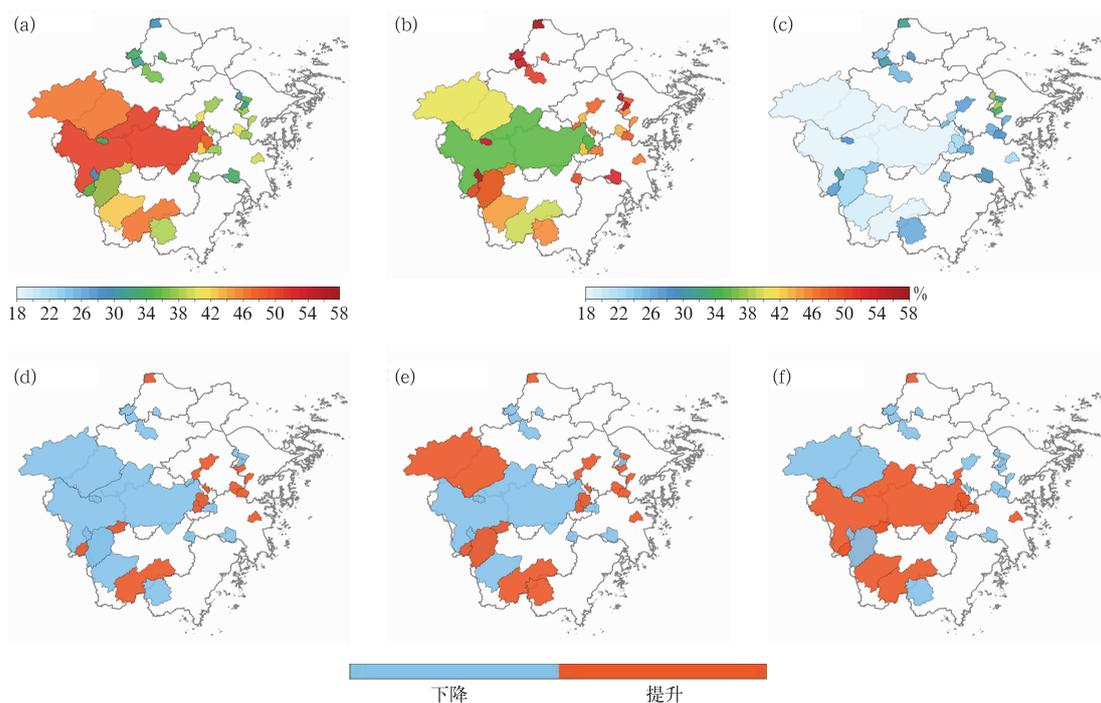


图 3 2019—2023 年 5—10 月浙江省 32 座大型水库 5 个等级平均的 24 h 时效面雨量预报
(a~c)OCF 模式的(a)模糊评分、(b)漏报率和(c)空报率,(d~f)基于
(d)模糊评分、(e)漏报率和(f)空报率的 OCF 较 EC 模式的预报效果

Fig. 3 (a) Fuzzy comprehensive score, (b) missing alarm rate and (c) false alarm rate by OCF model,
(d—f) the forecasting performance of OCF model compared with EC model based on (d) fuzzy comprehensive
score, (e) missing alarm rate and (f) false alarm rate for the 24 h areal rainfall forecast averaged by
5 levels of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province from May to October during 2019—2023

分最高,为 50.6;其次为新安江水库和滩坑水库,评分分别为 46.5 和 46.2,二者的评分相近但集水面

积相差 3 倍以上(图 1a),说明水库流域的集水面积并不是影响面雨量预报精度的唯一因素。26 座集

水面积相当的大二型水库中,浙中东部地区水库的预报精度整体上高于浙北和浙西地区,说明水库流域所在的地理位置也是影响面雨量预报精度的一个可能因素。图 3d 进一步将 OCF 与 EC 模式进行对比,给出了二者对 32 座大型水库面雨量预报模糊评分的偏差。相较于 EC 模式,OCF 模式对浙中东部地区半数以上大二型水库面雨量的预报精度有明显提升,其中 10 座水库的模糊评分为正偏差。

为分析预报误差的来源,图 3b, 3c 给出了 2019—2023 年 5—10 月 OCF 模式对 32 座大型水库 5 个等级平均的 24 h 时效面雨量预报漏报率和空报率。从图中可以看出,预报的各水库的漏报率(35.1%~57.1%)显著高于空报率(18.3%~38.6%),说明 OCF 模式的面雨量预报误差主要来源于漏报;大二型水库的漏报率(35.1%~57.1%)整体较大一型水库(35.5%~48.4%)略高,导致大二型水库的模糊评分较低(图 3a)。图 3e 进一步对比了 OCF 模式相较于 EC 模式的漏报率偏差,发现 OCF 模式对浙中东部地区 11 座大二型水库的漏报率低于 EC 模式,与模糊评分较优的 10 座水库近乎

对应(图 3d),说明 OCF 模式通过降低漏报率进而提升了预报精度。

3.1.2 不同等级预报精度评估

除不同水库外,OCF 模式在不同等级面雨量的预报中也有不同特点,图 4 给出了 2019—2023 年 5—10 月 OCF 模式相较于 ECF 模式对浙江 32 座大型水库 5 个等级 24 h 时效面雨量预报的模糊评分偏差分布。在小雨和中雨预报中,OCF 模式预报精度总体较 EC 模式低,仅在个别水库上有微弱优势(图 4a, 4b)。但随着预报等级的增大,OCF 模式的优势逐渐突显(图 4c~4e),在 1 座大一型水库和 13 座大二型水库的大雨等级(图 4c)、4 座大一型水库和 19 座大二型水库的暴雨等级(图 4d)以及 3 座大一型水库和 17 座大二型水库的大暴雨等级(图 4e)面雨量预报中较 EC 模式具有显著正偏差。上述结果表明,OCF 模式对原本预报难度较大的高等级面雨量预报精度提升显著。主要原因可能是由于参与多模式最优集成的 24 h 时效 EC 模式降水预报数据已经过 OTS 方法进行订正,该方法倾向于适当扩大暴雨区从而减少漏报(沈文强等,2023)。

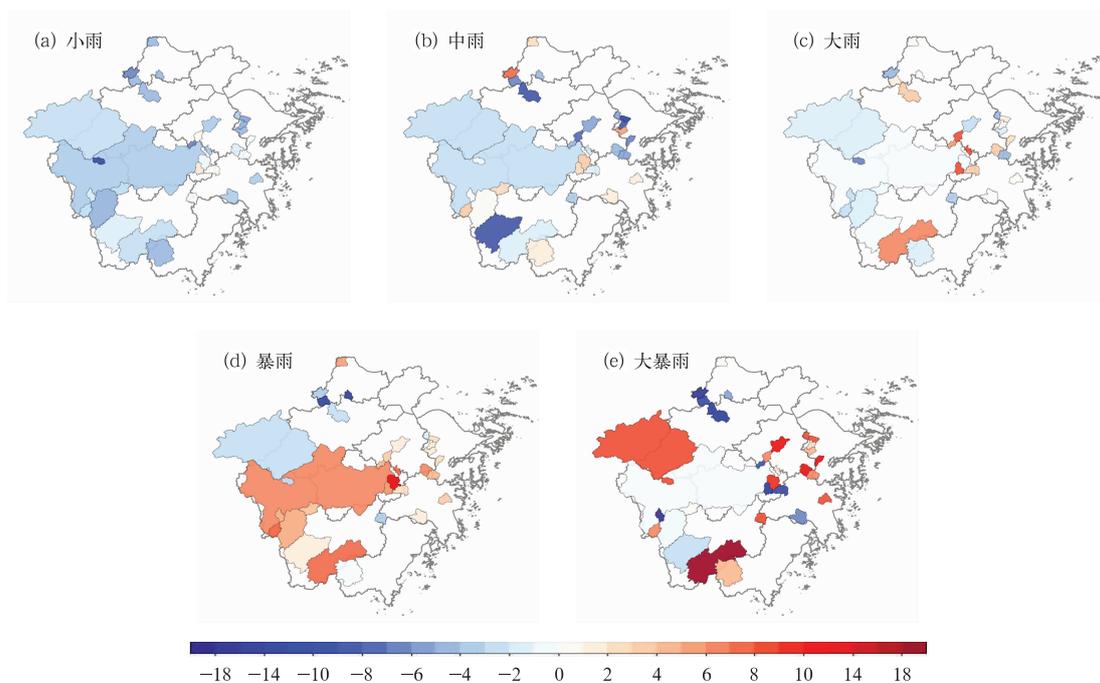


图 4 2019—2023 年 5—10 月 OCF 较 EC 模式对浙江省 32 座大型水库平均的 24 h 时效面雨量预报 5 个等级的模糊评分偏差

Fig. 4 The difference of 5-level fuzzy comprehensive scores between OCF and EC models for 24 h areal rainfall forecast of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province from May to October during 2019—2023

3.1.3 不同时效预报精度评估

将 32 座大型水库的评估结果进行平均,图 5 为 OCF 模式(实线)对不同时效(24~168 h)面雨量预报精度的演变情况。与前人研究一致,随着预报时效延长,OCF 模式的绝对误差逐渐增大(图 5a),模糊评分逐渐降低(图 5b),模式的预报能力逐渐下降(宋雯雯等,2021)。此外,与 24 h 时效评估结果一致(图 3b,3c),48~168 h 预报时效的漏报率显著高于空报率,是预报偏差的主要来源(图 5c,5d)。通过对比模糊评分(图 5b)与漏报率(图 5c)的演变趋势,发现二者呈现显著的负相关,这也说明漏报率对浙江省大型水库面雨量的预报精度起着决定性的作用。

进一步对比 OCF 和 EC 模式的预报效果,发现 OCF 模式的绝对误差在 72~168 h 预报时效小于 EC 模式,但在 48 h 和 24 h 时效与 EC 模式相当甚

至大于 EC 模式(图 5a)。然而,等级预报精度的表现与误差预报完全相反(图 5b~5d):OCF 模式的漏报率在 72~168 h 预报时效高于 EC 模式(图 5c),导致 OCF 模式的模糊评分较低(图 5b);但随着预报时效的临近,OCF 模式的漏报率在 48 h 以及 24 h 时效迅速减小至与 EC 模式相当(图 5c),使得 OCF 模式的模糊评分逐渐趋近于甚至超过 EC 模式(图 5b),主要原因可能是由于 72 h 时效以内,参与多模式最优集成的 EC 模式降水预报数据已经过 OTS 方法进行订正。上述现象说明,虽然 OCF 模式对面雨量预报与实况的实际差异随着预报时效的临近调整优势不明显,但其对面雨量等级预报的精度逐渐调整变好。在水文气象预报服务中,可以联合水库调度部门共同建立渐进式预报服务模式,逐步修正预报内容以辅助水库调整调度计划。

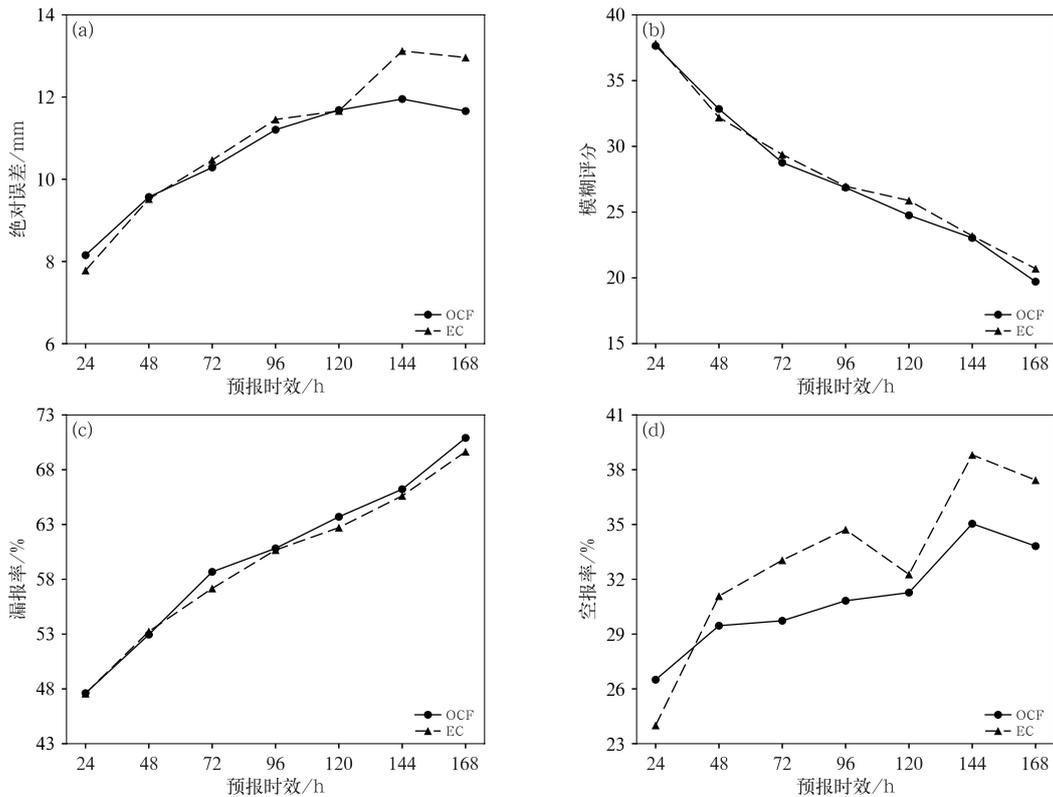


图 5 2019—2023 年 5—10 月 OCF 和 EC 模式对浙江省 32 座大型水库 5 个等级平均的 24~168 h 时效面雨量预报的 (a) 绝对误差、(b) 模糊评分、(c) 漏报率和 (d) 空报率
 Fig. 5 (a) Absolute error, (b) fuzzy comprehensive score, (c) missing alarm rate and (d) false alarm rate by OCF and EC models for 24—168 h areal rainfall forecast averaged by 5 levels of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province from May to October during 2019—2023

图 6 给出 OCF 和 EC 模式在不同时效对不同等级面雨量预报的模糊评分演变。与等级平均的模糊评分表现一致(图 5b),两个模式对各等级面雨量的预报精度随预报时效的延长总体呈下降趋势(图 6)。对比 OCF 模式在不同等级面雨量预报中的模糊评分发现,小雨最优(图 6a)、中雨次之(图 6b)、大雨再次(图 6c)、暴雨最差(图 6d),其中暴雨(图 6d)在 24~72 h 预报时效的模糊评分与大雨(图 6c)相当;而大暴雨(图 6e)在 24~48 h 预报时效优于暴雨(图 6d),甚至在 24 h 预报时效的模糊评分超过大雨(图 6c)。对比 OCF 和 EC 两个模式的预报精度,发现 OCF 模式对小雨等级的面雨量预报精度不及 EC 模式(图 6a),但在中雨及以上等级面雨量预报中表现较优(图 6b~6e):中雨在 48~168 h、大雨在 24~144 h、暴雨和大暴雨在 24~72 h 预报时效的模糊评分高于 EC 模式,说明 OCF 模式对高等级面雨量的预报效果较 EC 模式有显著提升,尤其对预报难度较大的暴雨和大暴雨等级,在临近预报时效有明显的订正能力。

3.2 不同降水过程预报精度评估

由于引发降水的天气系统不同,需要在整体预报精度评估的基础上,进一步评估 OCF 模式对不同降水过程的预报能力。梅汛期降水和台汛期降水是浙江省年降水量的主要来源,梅汛期降水历时长、总量大,常产生较大范围的暴雨;台汛期降水历时短,降水落区和强度与台风路径和强度密切相关,台风影响区域内常出现暴雨(叶勇,2008)。表 1 列出了 2019—2023 年浙江省的梅汛期和台汛期,其中不同年份的梅汛期暴雨特征差异大,如 2020 年表现出大尺度降水特征,而 2021 年则表现为对流性降水特征。沈文强等(2023)通过评估多家数值模式对不同年份梅汛期暴雨的预报质量,发现尽管各年梅汛期暴雨特征不同,但各模式的暴雨预报有着基本相似的特点,因此本文将综合评估 OCF 模式对 2019—2023 年的梅汛期面雨量预报精度。此外,虽然浙江省的台汛期历时较长,一般为 7—10 月,但本文仅评估 2019—2023 年台风影响期间(表 1)的面雨量预

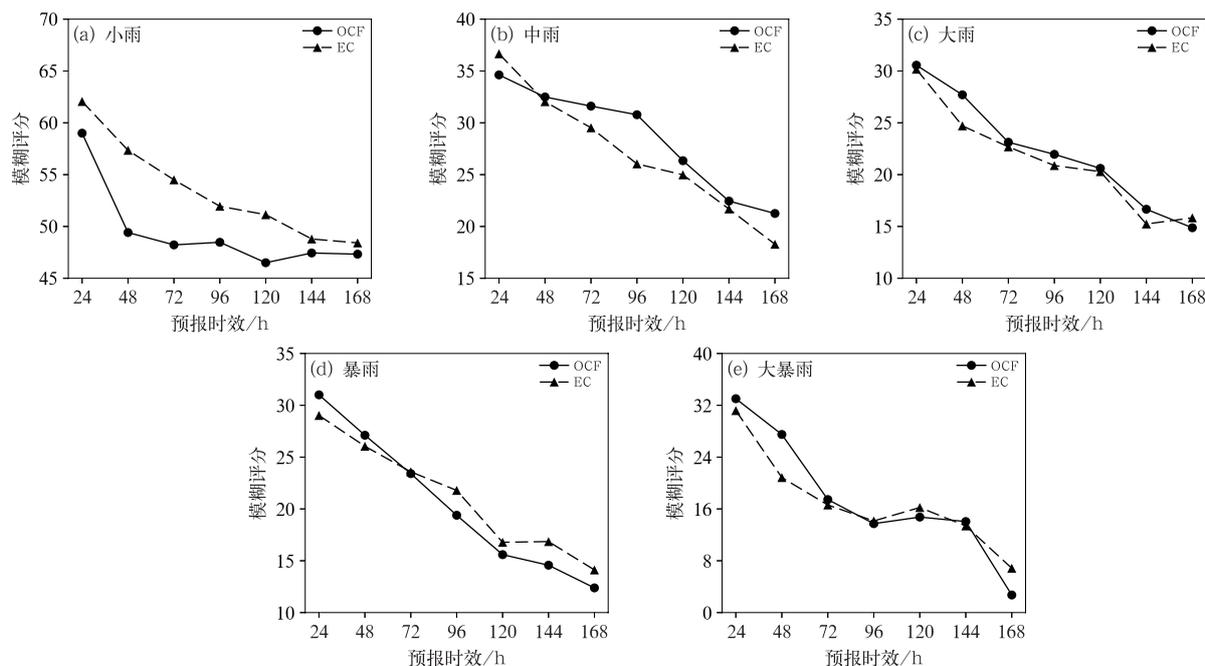


图 6 2019—2023 年 5—10 月 OCF 和 EC 模式对浙江省 32 座大型水库平均的 24~168 h 时效面雨量预报 5 个等级的模糊评分

Fig. 6 The 5-level fuzzy comprehensive scores by OCF and EC models for 24—168 h areal rainfall forecast of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province from May to October during 2019—2023

表 1 2019—2023 年浙江省梅汛期和台汛期

Table 1 The Meiyu and typhoon periods in Zhejiang Province during 2019—2023

年份	梅汛期时段	台汛期时段(台风名称)
2019	6月17日至7月17日	8月7—12日(利奇马)、9月3—7日(玲玲)、9月20—22日(塔巴)、9月29日至10月2日(米娜)
2020	5月29日至7月18日	8月2—5日(黑格比)
2021	6月10日至7月5日	7月21—30日(烟花)、9月11—17日(灿都)
2022	6月10—26日	9月1—6日(轩岚诺)、9月10—15日(梅花)
2023	6月17日至7月11日	7月26—30日(杜苏芮)

报精度。

由于梅雨和台风影响期间多出现强降水,且 OCF 模式在大雨及以上等级强降水预报中有显著优势(图 4),这里仅使用模糊评分进一步评估 OCF 模式对不同强降水过程的等级预报精度。图 7a,7b 分别给出 OCF 模式对 32 座大型水库 2019—2023 年 5 个等级平均的 24 h 时效梅汛期和台汛期面雨量预报的模糊评分。由图可知,OCF 模式对台汛期(图 7b)面雨量的预报精度整体优于梅汛期(图 7a)。在梅汛期(图 7a),OCF 模式对主要受梅雨影响的新安江和富春江水库预报精度更高;而在台汛期

(图 7b),OCF 模式对主要受台风影响的浙东和浙南地区水库预报精度更高。通过与 EC 模式对比进一步发现(图 7c,7d),虽然整体上 OCF 模式对新安江、富春江、乌溪江、紧水滩、珊溪 5 座大一型水库预报精度为负调整(图 3d),但在梅汛期(图 7c),其对位于梅雨影响关键区的新安江、富春江、乌溪江水库的预报精度为正调整,而在台汛期(图 7d),对位于台风影响关键区的滩坑水库预报精度为正调整;对于大二型水库而言,与 2019—2023 年 5—10 月整体预报结果一致(图 3d),OCF 模式在梅汛期和台汛期对浙中东部地区大部分水库的预报精度均为正调整

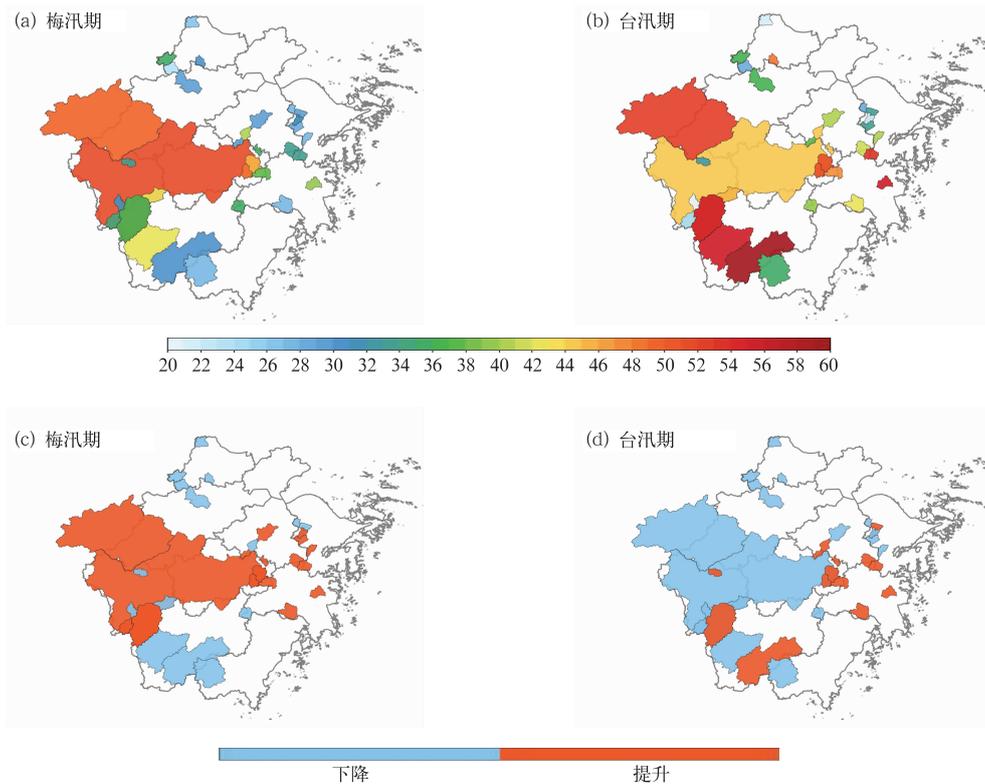


图 7 2019—2023 年(a,c)梅汛期和(b,d)台汛期浙江省 32 座大型水库 5 个等级平均的 24 h 时效面雨量预报(a,b)OCF 模式模糊评分,(c,d)基于模糊评分的 OCF 较 EC 模式的预报效果

Fig. 7 (a, b) The fuzzy comprehensive score by OCF model, (c, d) the forecasting performance of OCF model compared with EC model based on fuzzy comprehensive score for the 24 h areal rainfall forecast averaged by 5 levels of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province during (a, c) Meiyu period and (b, d) typhoon period of 2019—2023

(图 7c,7d),并且后者恰好位于台风影响关键区(图 7d)。上述现象说明,OCF 模式可以针对不同强降水过程进行预报订正,极大提升了对不同降水过程影响下的水库流域预报服务能力。

图 8 进一步给出了 2019—2023 年梅汛期和台汛期 OCF 模式对 32 座大型水库 5 个等级平均的不同时效面雨量预报精度评估结果。虽然 OCF 模式在梅汛期和台汛期整体上均表现出预报能力随着预报时效的临近逐渐提升的特征,但模糊评分在梅汛期的增加幅度较为平缓(图 8a),而在台汛期波动较大,即 120~168 h 迅速增加,72~120 h 增加基本停滞,24~72 h 继续迅速增加(图 8d)。主要原因可能是由于梅汛期的降水主要受西风带天气系统影响(滕卫平等,2010),特点是历时长、范围大(叶勇,2008),OCF 模式的漏报率和空报率随着预报时效的临近缓慢减小(图 8b,8c),预报性能缓慢提升(图 8a);而台汛期的降水主要受台风路径和强度影响,虽然近几十年强度预报精度提升缓慢,但路径预报已有大幅提升(Emanuel,2018;端义宏等,2020),自 2015 年起,全球和区域数值模式的台风路径预报能力已较为稳定(陈国民,2023),OCF 模式对水库

流域面雨量的预报能力受台风路径预报能力影响,在 120 h 以及 48 h、24 h 有大幅提升(图 8d)。这也是上文提到的 OCF 模式对台汛期 24 h 时效面雨量的预报精度整体优于梅汛期的原因(图 7a,7b)。通过与 EC 模式对比进一步发现,OCF 模式的正调整在梅汛期并不显著,仅在 24~48 h 预报时效表现出微弱优势(图 8a,8b);而在台汛期,OCF 模式较 EC 模式在 24~120 h 的大部分预报时效内均有明显优势(图 8d,8e)。

4 结 论

本文从满足水文气象服务的需求出发,对 2019—2023 年 5—10 月 OCF 模式对浙江 32 座大型水库的面雨量预报精度进行多维度评估,并与单一模式中预报效果最好的 EC 模式进行对比,主要结论如下:

- (1)OCF 模式对水库流域面雨量的预报精度与水库集水面积、所在地理位置以及引发降水的天气过程相关。
- (2)对于不同水库流域和面雨量等级,以 24 h

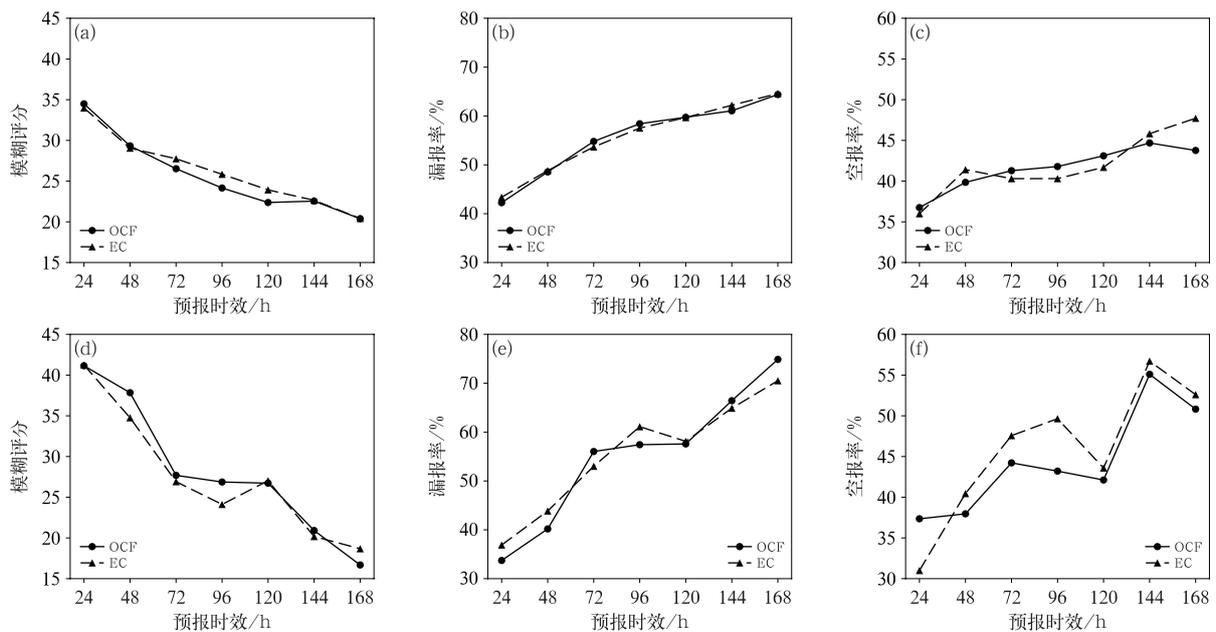


图 8 2019—2023 年(a~c)梅汛期和(d~f)台汛期 OCF 和 EC 模式对浙江 32 座大型水库 5 个等级平均的 24~168 h 时效面雨量预报(a,d)模糊评分、(b,e)漏报率和(c,f)空报率
 Fig. 8 (a, d) The fuzzy comprehensive score, (b, e) missing alarm rate and (c, f) false alarm rate by OCF and EC models for 24—168 h areal rainfall forecast averaged by 5 levels of 32 large-sized reservoirs in Zhejiang Province during (a—c) Meiyu period and (d—f) typhoon period of 2019—2023

预报时效为例,整体而言,OCF 模式对集水面积较大的大一型水库面雨量预报精度高于大二型水库,大一型水库的绝对误差更小,模糊评分更高;OCF 模式的预报误差主要来源于漏报,通过降低漏报率,其对浙中东部地区大二型水库流域面雨量预报精度较 EC 模式有所提升;OCF 模式在预报难度较大的大雨及以上高等级面雨量预报中较 EC 模式有显著优势。

(3) 对于不同预报时效和面雨量等级,虽然 OCF 模式的预报精度整体随着预报时效的延长逐渐降低,具体表现为绝对误差逐渐增大、模糊评分逐渐降低,但其对中雨及以上等级面雨量的预报效果较 EC 模式有显著正调整,尤其对预报难度较大的暴雨和大暴雨等级,在 24~48 h 预报时效有明显的订正能力。

(4) 对于不同强降水过程,OCF 模式不仅在梅汛期(台汛期)对主要受梅雨(台风)影响的水库流域预报能力更高,而且对这些水库流域面雨量的预报精度较 EC 模式有所提升。另外,虽然 OCF 模式在梅汛期和台汛期整体上均表现出预报能力随着预报时效的临近逐渐提升的特征,但受西风带天气系统和台风路径预报精度影响,前者提升缓慢且较 EC 模式没有明显优势,后者提升更显著、波动更大,且较 EC 模式在 24~120 h 的大部分预报时效内均有显著优势。

参考文献

- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象,42(9):1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9): 1045-1057(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).
- 陈国民,2023. 西北太平洋台风路径预报性能研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Chen G M, 2023. Study on the predictability of typhoon tracks in the Northwest Pacific[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 陈丽娟,许力,王永光,2005. 超级集合思想在汛期降水预测集成中的应用[J]. 气象,31(5):52-54. Chen L J, Xu L, Wang Y G, 2005. Application of superensemble to precipitation prediction in China during flood season[J]. Meteor Mon, 31(5): 52-54 (in Chinese).
- 谌芸,曹勇,孙健,等,2021. 中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J]. 气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J, et al, 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6): 655-670(in Chinese).
- 邓国卫,王敏,2018. 都江堰特大暴雨过程中 GIS 的多种面雨量计算方法对比[J]. 高原山地气象研究,38(1):81-86,95. Deng G W, Wang M, 2018. Comparison of multi surface rainfall calculation methods for GIS during the heavy rain process in Dujiangyan [J]. Plateau Mt Meteor Res, 38(1): 81-86, 95(in Chinese).
- 杜钧,2002. 集合预报的现状和前景[J]. 应用气象学报,13(1):16-28. Du J, 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 13(1): 16-28(in Chinese).
- 端义宏,方娟,程正泉,等,2020. 热带气旋研究和业务预报进展—第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会(IWTC-9)综述[J]. 气象学报,78(3):537-550. Duan Y H, Fang J, Cheng Z Q, et al, 2020. Advances and trends in tropical cyclone research and forecasting: an overview of the Ninth World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-9) [J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 537-550(in Chinese).
- 郝莹,王皓,刘杰,等,2019. 多模式多分辨率面雨量预报在淮河流域的性能评估[J]. 气象研究与应用,40(1):24-28. Hao Y, Wang H, Liu J, et al, 2019. Performance evaluation of multi-model and multi-resolution area rainfall forecast in Huaihe River Basin[J]. J Meteor Res Appl, 40(1): 24-28(in Chinese).
- 黄思琦,谢敏,莫建飞,等,2017. 基于 GIS 的洛清江流域洪涝致灾面雨量计算方法研究[J]. 气象研究与应用,38(1):36-39. Huang S Q, Xie M, Mo J F, et al, 2017. The method of critical rainfall calculation in Luoqingjiang River Basin based on GIS[J]. J Meteor Res Appl, 38(1): 36-39(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China [J]. Meteor Mon, 45(4): 445-457(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).
- 廖春花,刘红武,张永锋,等,2018. 多种细网格模式对湖南水库流域面雨量的预报检验[J]. 气象科技,46(4):724-728. Liao C H, Liu H W, Zhang Y F, et al, 2018. Verification of various fine mesh models on areal rainfall prediction[J]. Meteor Sci Technol, 46(4): 724-728(in Chinese).
- 刘静,叶金印,张晓红,等,2014. 淮河流域汛期面雨量多模式预报检验评估[J]. 暴雨灾害,33(1):58-64. Liu J, Ye J Y, Zhang X H, et al, 2014. The performance evaluation of the multi-model forecasting of areal rainfall for Huaihe River Basin during flood season[J]. Torr Rain Dis, 33(1): 58-64(in Chinese).

- 吕劲文,申华羽,涂小萍,等,2023. ECMWF 细网格模式降水在浙江省行政区划面雨量预报中的释用[J]. 气象与环境科学,46(5):75-85. Lü J W, Shen H Y, Tu X P, et al, 2023. Verification and interpretation of ECMWF fine-grid model in areal precipitation forecast in Zhejiang Province[J]. Meteor Environ Sci, 46(5):75-85(in Chinese).
- 邱辉,李春龙,张方伟,2017. 长江流域多模式降雨预报效果检验[J]. 水利水电快报,38(6):39-42,46. Qiu H, Li C L, Zhang F W, 2017. The performance evaluation of the multi-model forecasting of rainfall in the Yangtze River Basin[J]. Express Water Resour Hydropower Inform, 38(6):39-42,46(in Chinese).
- 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).
- 宋雯雯,淡嘉,龙柯吉,等,2023. 岷江上游面雨量多模式预报检验与集成研究[J]. 高原山地气象研究,43(4):84-90. Song W W, Dan J, Long K J, et al, 2023. Multimodel forecast verification and integration of area rainfall in the upper reaches of Minjiang River[J]. Plateau Mt Meteor Res, 43(4):84-90(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).
- 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).
- 滕卫平,俞善贤,胡波,等,2010. 浙江省汛期降水量的区域特征分析[J]. 科技通报,26(1):32-38. Teng W P, Yu S X, Hu B, et al, 2010. The regional characteristics of rainfall in flood seasons in Zhejiang[J]. Bull Sci Technol, 26(1):32-38(in Chinese).
- 王静,陈宏,徐威,等,2024. 基于CMA区域集合预报的海河流域面雨量预报评估与应用[J]. 大气科学学报,47(4):653-668. Wang J, Chen H, Xu W, et al, 2024. Evaluation and application of area rainfall forecast based on CMA regional ensemble forecast in the Haihe River Basin[J]. Trans Atmos Sci, 47(4):653-668(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,刘铭,等,2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报,28(3):306-317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al, 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3):306-317(in Chinese).
- 徐诚,淡嘉,宋雯雯,等,2020. 金沙江中下游面雨量分布特征及预报检验[J]. 高原山地气象研究,40(2):38-42. Xu C, Dan J, Song W W, et al, 2020. The distribution characteristics of areal rainfall and performance evaluation in the middle and lower reaches of Jinsha River[J]. Plateau Mt Meteor Res, 40(2):38-42(in Chinese).
- 徐晶,林建,姚学祥,等,2001. 七大江河流域面雨量计算方法及应用[J]. 气象,27(11):13-16,51. Xu J, Lin J, Yao X X, et al, 2001. Calculating method of area rainfall over seven river valleys and its application[J]. Meteor Mon, 27(11):13-16,51(in Chinese).
- 徐晶,姚学祥,2007. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象,33(7):15-21. Xu J, Yao X X, 2007. Watershed areal precipitation estimation technology: a review[J]. Meteor Mon, 33(7):15-21(in Chinese).
- 徐焱,钱浩,罗玲,等,2019. 基于ECMWF模式预报的台风降水地形订正方法[J]. 气象学报,77(4):674-685. Xu Y, Qian H, Luo L, et al, 2019. A study of terrain correction method on typhoon precipitation based on ECMWF forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):674-685(in Chinese).
- 杨学胜,2001. 业务集合预报系统的现状及展望[J]. 气象,27(6):3-9. Yang X S, 2001. The new development and the outlook of the operational ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 27(6):3-9(in Chinese).
- 杨寅,林建,包红军,2022. 基于集合降水预报的长江流域面雨量预报与应用[J]. 暴雨灾害,41(5):571-579. Yang Y, Lin J, Bao H J, 2022. Prediction and application of area rainfall in the Yangtze River Basin based on ensemble precipitation forecasting[J]. Torr Rain Dis, 41(5):571-579(in Chinese).
- 叶勇,2008. 浙江省小流域山洪灾害与预警技术研究[D]. 杭州:浙江大学. Ye Y, 2008. Study on small watershed mountain torrents disasters prevention division and early-warning technology of Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese).
- 翟盘茂,李蕾,周佰铨,等,2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报,27(5):631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):631-640(in Chinese).
- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012. 我国精细化客观气象要素预报进展[J]. 气象科技进展,2(5):12-21. Zhao S R, Zhao C G, Zhao R X, et al, 2012. The development of objective meteorological element forecast in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(5):12-21(in Chinese).
- 智协飞,季晓东,张璟,等,2013. 基于TIGGE资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报,36(3):257-266. Zhi X F, Ji X D, Zhang J, et al, 2013. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets[J]. Trans Atmos Sci, 36(3):257-266(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, Lü 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).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. GB/T 20486—2017 江河流域面雨量等级[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. GB/T 20486—2017 Grade of valley area precipitation[S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- 朱占云, 潘娅英, 骆月珍, 等, 2017. 浙江省水库流域面雨量的多模式预报效果分析与检验[J]. *气象与环境科学*, 40(3):93-100. Zhu Z Y, Pan Y Y, Luo Y Z, et al, 2017. Analysis and test on multimodel prediction of reservoir basin area rainfall in Zhejiang Province[J]. *Meteor Environ Sci*, 40(3):93-100(in Chinese).
- 宗志平, 代刊, 蒋星, 2012. 定量降水预报技术研究进展[J]. *气象科技进展*, 2(5):29-35. Zong Z P, Dai K, Jiang X, 2012. The research progress of quantitative precipitation forecast[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 2(5):29-35(in Chinese).
- Emanuel K, 2018. 100 years of progress in tropical cyclone research[J]. *Meteor Monogr*, 59(1):15. 1-15. 68.
- Reynolds D, 2003. Value-added quantitative precipitation forecasts: how valuable is the forecaster? [J]. *Bull Am Meteor Soc*, 84(7):876-878.
- Toth Z, Kalnay E, 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. *Mon Wea Rev*, 125(12):3297-3319.
- Ye J, He Y, Pappenberger F, et al, 2014. Evaluation of ECMWF medium-range ensemble forecasts of precipitation for river basins[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(682):1615-1628.
- Zhi X F, Zhang L, Bai Y Q, 2011. Application of the multi-model ensemble forecast in the QPF[C]// *Proceedings of International Conference on Information Science and Technology*. Nanjing, China: IEEE:657-660.
- 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:张芳)