

高星星,潘留杰,娄盼星,等,2023.一种改进的频率匹配法在网格降水预报订正中的应用[J].气象,49(11):1371-1383. Gao X X, Pan L J, Lou P X, et al, 2023. Application of an improved frequency matching method in grid precipitation forecast correction [J]. Meteor Mon, 49(11):1371-1383(in Chinese).

一种改进的频率匹配法在网格 降水预报订正中的应用*

高星星^{1,2} 潘留杰^{1,2} 娄盼星^{2,3} 杜莉丽¹

¹ 陕西省气象台, 西安 710014

² 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710014

³ 陕西省气象科学研究所, 西安 710014

提 要: 为提高精细化网格降水的实际预报能力, 评估了 2021 年汛期 ECMWF(EC)、CMA-MESO、SXWRF 和 SCMOC 降水预报产品在陕西的表现, 讨论了卡尔曼动态频率匹配方法对不同模式的订正效果, 然后针对该方法不足, 基于最优 TS 评分阈值法和 SCMOC 在天气过程判定中占优信息对小量级降水进行了二次订正, 最后利用分类降水过程建模和基于图像相似识别技术改进的卡尔曼动态频率匹配法对暴雨进行了订正研究。结果表明: SCMOC 晴雨预报准确率和暴雨 TS 评分均最高, 分别为 81.60% 和 0.30, 表现最好; 卡尔曼动态频率匹配法可明显提高 EC、CMA-MESO 和 SXWRF 模式降水预报产品晴雨预报准确率, 对暴雨预报的改善效果不稳定, 对 EC 晴雨预报准确率和暴雨 TS 评分提升幅度均最大, 分别为 6.35% 和 6.99%, 该订正方法更适用于 EC 模式; 经晴雨消空二次订正后的 EC 模式晴雨和小雨预报准确率较一次订正后的 EC 模式均有提高, 分别提高了 0.51% 和 0.64%; 分类降水过程建模订正可进一步提高 EC 暴雨 TS 评分, 较未分类过程订正后的暴雨 TS 评分提高了 1.05%, 且暴雨其他评分指标也均变好; 改进后的卡尔曼动态频率匹配法较改进前可进一步提高 EC 各量级降水 TS 评分, 尤其是暴雨 TS 评分提高了 2.79%。

关键词: 卡尔曼滤波, 频率匹配, 最优 TS 评分阈值法, 图像相似识别技术

中图分类号: P456, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.051603

Application of an Improved Frequency Matching Method in Grid Precipitation Forecast Correction

GAO Xingxing^{1,2} PAN Liujie^{1,2} LOU Panxing^{2,3} DU Lili¹

¹ Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

² Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014

³ Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710014

Abstract: In order to improve the practical prediction ability of refined grid precipitation, the performance of ECMWF (EC), CMA-MESO, SXWRF and SCMOC precipitation forecast products in Shaanxi Province during the rainy season of 2021 are compared and evaluated, and the correction effect of Kalman dynamic frequency matching method on different models is discussed. Then, for the shortcomings of this method, based on the optimal TS scoring threshold method and SCMOC's judgment of weather process, the small-magnitude

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J023, CXFZ2023J031)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-249、2023-JC-YB-283)、秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2023G-2)和中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-129)共同资助

2022 年 10 月 10 日收稿; 2023 年 6 月 20 日收修定稿

第一作者: 高星星, 主要从事环境气象和网格降水订正研究. E-mail: 1276015279@qq.com

通讯作者: 潘留杰, 主要从事天气预报研究. E-mail: pljmtgh57245@sina.com

precipitation is revised for the second time. Finally, the heavy precipitation is revised by using the precipitation sub process modeling and the improved Kalman dynamic frequency matching method which is based on image similarity recognition technology. The results show that SCMOC has the highest accuracy of sunny and rainy forecast and the highest TS score of heavy precipitation, which are 81.60% and 0.30 respectively. The Kalman dynamic frequency matching method can significantly improve the accuracy of sunny and rainy forecast of EC, CMA-MESO and SXWRF precipitation forecast products, but the improvement effect of heavy rainfall forecast is unstable. The improvement ranges of the EC model sunny and rainy forecast accuracy and the TS score of rainstorm forecast are the largest, 6.35% and 6.99% respectively. This correction method is more suitable for EC model. Compared with the EC model modified by Kalman dynamic frequency matching method, the accuracy of sunny rain and light rain prediction of EC model after the second correction of sunny rain spaced elimination is improved by 0.51% and 0.64%, respectively. The correction of the precipitation sub process modeling can further improve the TS score of EC model heavy precipitation, which is 1.05% higher than the TS score of heavy precipitation without sub process correction. Other scoring indicators of heavy precipitation are also better. The improved Kalman dynamic frequency matching method can significantly further improve the TS score of EC precipitation of all magnitudes, especially the TS score of heavy precipitation, improved by 2.79%.

Key words: Kalman filtering, frequency matching, optimal TS scoring threshold method, image similarity recognition technology

引 言

无缝隙精细化网格气象预报不仅是目前世界各国气象部门最核心的天气预报业务之一,而且是未来天气预报的发展方向(金荣花等,2019;郭丹妮等,2023)。数值预报是无缝隙精细化网格气象预报的基础,然而,受数值模式本身的近似误差和初值的不确定性、参数化方案的不完善、数值计算近似等一些无法避免因素的影响,数值预报仍存在较大的不确定性。为了消除这种不确定性带来的误差,充分发挥数值模式在预报业务中的指导作用,有必要发展数值模式的统计后处理客观订正技术(Wilks and Hamill,2007;张延彪等,2022)。

降水的非连续偏态分布,预报的不确定性随降水量级增大而增大,暴雨的发生频率低等特征,使得模式降水预报的统计后处理难度更大(Scheuerer and Hamill,2015;毕宝贵等,2016;代刊等,2018)。国内外学者已发展了一系列客观订正技术来消除模式输出结果的系统性误差,从而提高模式降水预报结果的可靠性。频率匹配法(frequency matching method,FMM)是近年来发展的最为有效的模式降水预报后处理技术之一,其中心思想是用观测降水量的频率匹配分布去校正预报降水量的频率匹配分

布。前期降水观测和预报频率统计是该方法的关键,常见的降水频率统计方法有递减平均法、标准正态分布法、卡尔曼滤波法、准对称滑动平均法、组合对称滑动窗口平均法(苏翔等,2021)。其中,卡尔曼滤波法是一种根据观测和预报数据自适应迭代权重系数来减小误差的有力工具,其迭代计算过程较为简单,既能获得最近的天气变化特征,又能抓住生命周期较短的天气系统对降水的影响,因此被广泛应用(吴柏莹等,2022)。Zhu and Luo(2015)首次将卡尔曼滤波应用到降水的频率统计上,然后进行 FMM 订正,提高了各降水量级的 ETS 评分,减小了模式误差;智协飞和吕游(2019)、高星星等(2021)、伍清和李英(2021)发现卡尔曼滤波和 FMM 结合可有效减小降水量预报的误差,消除大范围小雨空报区域,但是对暴雨预报改善效果不稳定;潘留杰等(2022)和包慧濛等(2022)进行了卡尔曼动态 FMM 分区试验,对暴雨的最终订正效果优于不分区试验,但对晴雨预报准确率提高不显著。上述研究表明,卡尔曼动态 FMM 在某些方面或一定程度上提高了模式降水的预报表现,但依然存在不足,且以往有关卡尔曼动态 FMM 的研究几乎都未对降水进行分天气过程订正,而降水偏差会随天气过程的不同而有所不同。

晴雨和暴雨预报是目前降水预报业务考核的主要内容,为进一步提高这两类业务的预报质量,本文

以陕西省为例,针对卡尔曼动态 FMM 对晴雨预报改善效果还有可提升空间和对暴雨预报改善效果不稳定的不足之处,基于最优 TS 评分的阈值法和中国气象局下发的降水指导产品(system of central meteorological observatory correction forecast, SCMOC),根据有无降水天气过程的判定结果,对卡尔曼动态 FMM 订正结果中的小量级降水进行二次订正,并基于分类降水过程建模,利用基于图像相似识别技术改进的卡尔曼动态 FMM 对暴雨进行单独订正研究,以进一步提高精细化网格降水的预报能力。

1 数据与方法

1.1 数据

选取 ECMWF 细网格(以下简称 EC)、CMA-MESO(原 GRAPES_3km)和陕西区域降水模式(SXWRF)模式每日 00 时和 12 时(世界时,下同)起报的未来 12~36 h 时效的 24 h 累计降水资料,时间范围分别为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 9 月 30 日、2021 年 1 月 8 日至 9 月 30 日和 2020 年 10 月 1 日至 2021 年 9 月 30 日,水平分辨率分别为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 、 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$ 和 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$ 。为了方便运算,所有模式资料利用双线性插值方法统一插值到与 SCMOC 分辨率一致的 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格上。2021 年 4 月 1 日之前的各模式 24 h 累计降水资料用于计算卡尔曼动态 FMM 中初始累积分布函数(cumulative distribution function, CDF),2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日所有模式 24 h 累计降水资料用于订正、评估和 CDF 实时更新。

SCMOC 为中国气象局下发的降水指导产品,已经过客观订正等一系列后处理,因此本研究未对其进行卡尔曼动态 FMM 订正,只用于模式综合性能评估和 EC 晴雨消空。SCMOC 选取 2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日每日 00 时和 12 时起报的未来 0~24 h 时效的 24 h 累计降水资料,水平分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。

观测资料选取 2019 年 1 月 2 日至 2021 年 10 月 1 日陕西省 1546 个气象观测站(98 个国家站和 1448 个区域站)的每日 00 时和 12 时的 24 h 累计降水量,来源于气象大数据云平台“天擎”。

1.2 订正方法

卡尔曼动态 FMM:按照升序给出一系列降水阈值,0.1、1.0、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0、35.0、40.0、45.0、50.0、60.0 和 100.0 mm,分别计算出对应的一系列观测降水频率和预报降水频率,并由此构建观测和预报降水频率随降水强度变化的曲线,两条曲线均呈单调递减趋势。对任意一个格点预报降水量,在观测曲线上均存在某一个点的频率值与其频率值相等,这个点对应的观测降水量为该格点订正后的预报降水量。从求任一格点预报降水量对应的降水频率到完成其订正需经两次线性内插,CDF 为某一给定空间内降水量超过某一阈值的站点数,降水频率为 CDF 与总站点数的比值,观测与预报的 CDF 通过卡尔曼滤波方法迭代更新,表达式为(Cui et al, 2012; Zhu and Luo, 2015):

$$\overline{\text{CDF}}_{i,j} = (1 - W) \overline{\text{CDF}}_{i,j-1} + W(\text{CDF}_{i,j}) \quad (1)$$

式中: $\text{CDF}_{i,j}$ 为第 j 天阈值为 i 的 CDF, $\overline{\text{CDF}}_{i,j}$ 为第 j 天阈值为 i 的递减平均 CDF, $\overline{\text{CDF}}_{i,j-1}$ 为前一天的递减平均 CDF, $\overline{\text{CDF}}_{i,0}$ 为第 0 天阈值为 i 的递减平均 CDF,该初值取气候态平均值,并随实况实时更新,如 2021 年 4 月 1 日 00 时需订正的预报样本对应的该值为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 3 月 31 日 00 时所有预报样本与其对应实况的统计值,2021 年 4 月 2 日 00 时需订正的预报样本对应的该值为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 4 月 1 日 00 时所有预报样本与其对应实况的统计值。智协飞和吕游(2019)取滑动训练期内的平均 CDF 作为其迭代初值 $\overline{\text{CDF}}_{i,0}$ 。需要注意的是,非汛期陕北和关中地区所有区域气象观测站由于气温较低、维护难度大而关闭,降水观测数值为 0 mm,因此在计算初始态 CDF 时,需要剔除此类样本,否则会导致更多漏报。 W 是递减权重系数,变化范围为 0~1,表达式为:

$$W = \frac{1}{n_d} \quad (2)$$

式中 n_d 为训练期长度,本文中为 30 d。常见取样方法有持续滑动窗口取样方法、历史对称窗口取样方法、组合对称滑动窗口取样方法。敏感性试验表明,这 3 种取样方法对 FMM 订正结果影响不大,这和苏翔等(2021)的研究结论一致。为节省运算资源,本文选取持续滑动窗口取样方法。

1.3 检验方法

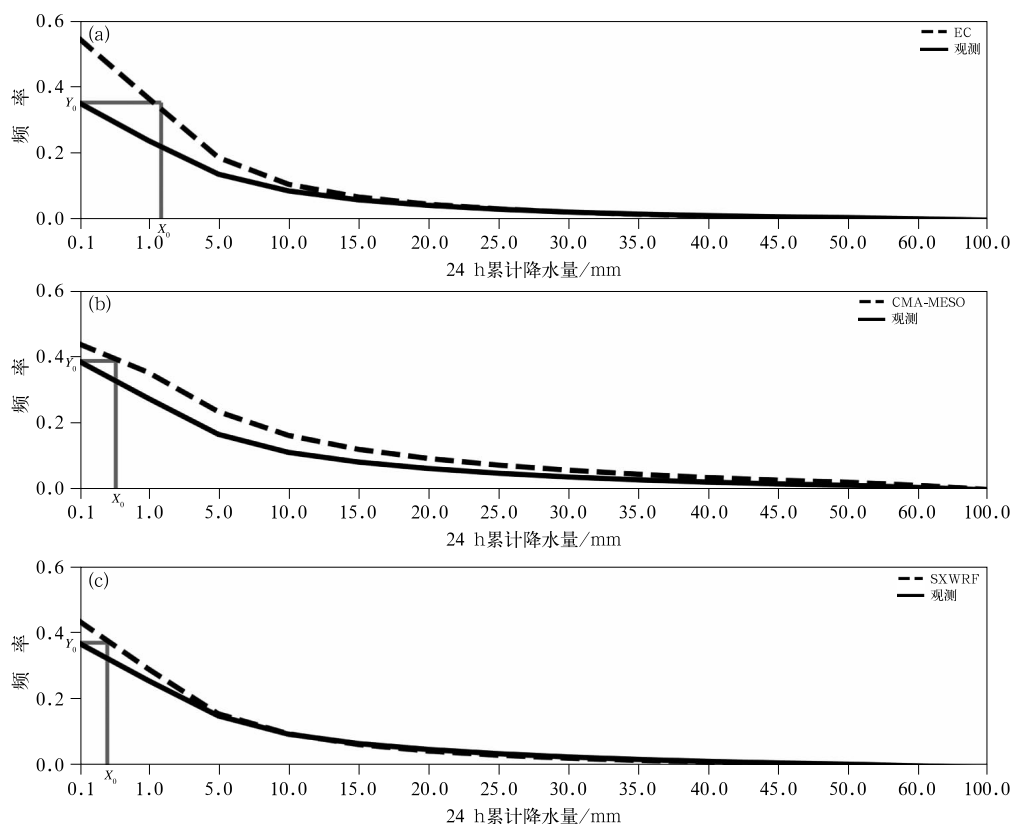
模式表现评价主要依据的检验指标为预报准确率和 TS 评分。其他辅助检验指标包括命中率、成功率、空报率、漏报率以及偏差 (Bias)。其中, 预报准确率反映被正确预报的样本占比, 空报率反映预报的正样本中多少未发生, 漏报率反映观测的正样本被漏报的比例, 命中率反映观测的正样本中多少被预报, 成功率反映预报的正样本中实际发生的比例。预报准确率、空报率、漏报率、命中率和成功率数值范围为 $0 \sim 1$, 其中, 预报准确率、命中率和成功率数值越大, 表示预报效果越好, 空报率和漏报率则相反。Bias 和 TS 评分理想值均为 1, Bias 表示模式预报是倾向于发生欠预测 (Bias < 1) 还是发生过预测 (Bias > 1) 事件 (杨璐等, 2022; 张祖莲等, 2022)。晴雨和 24 h 暴雨阈值分别为 0.1 mm 和 50.0 mm,

24 h 小雨、中雨、大雨和暴雨分别指 24 h 内累计降水量在 0.1~10.0、10.1~25.0、25.1~50.0 mm 和 50.1~100.0 mm 范围内。本文还利用综合图评估模式降水产品的预报评分, 其可以多角度呈现降水的传统预报评分表现 (潘留杰等, 2022)。

2 结果与分析

2.1 模式预报偏差分析

EC 和 SXWRF 模式小量级降水预报频率大于观测, 大量级降水预报频率小于观测, 且 EC 模式小量级降水预报与观测频率之差较 SXWRF 模式大, 大量级降水预报与观测频率之差较 SXWRF 模式小 (图 2a, 2c), 表明 EC 和 SXWRF 模式对小量级降水存在空报, 大量级降水存在漏报, 且 EC 模式小量级



注: X_0 为观测降水为 0.1 mm 时的观测频率 Y_0 在预报频率曲线上对应的预报值。

图 2 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 9 月 30 日 (a) EC, (b) CMA-MESO 和 (c) SXWRF 模式 00 时和 12 时起报的 24 h 累计降水量及对应实况降水量累计分布函数曲线

Fig. 2 Cumulative distribution function curves of 24 h accumulated precipitation and corresponding observed precipitation of (a) EC, (b) CMA-MESO and (c) SXWRF starting respectively from 00 UTC and 12 UTC during the period from 1 January 2019 to 30 September 2021

降水空报率高于 SXWRF 模式,大量级降水漏报率低于 SXWRF 模式。统计结果发现,EC 模式晴雨和小雨空报率较 SXWRF 模式分别高 9.09% 和 1.68%,大雨和暴雨漏报率较 SXWRF 模式分别低 5.42% 和 4.77%。CMA-MESO 模式各量级降水频率预报均大于观测(图 2b),存在不同程度湿偏差。针对不同量级降水模式预报与观测频率的关系,不同研究结论稍有差异(Zhu and Luo, 2015; 智协飞和吕游, 2019; 张海鹏等, 2020; 罗聪等, 2021),这可能与研究所选模式、时段、区域等有关。随着降水阈值的增加,预报频率和观测频率的差异会越来越小,这主要与样本数随降水阈值增大而大幅减少有关。空报率和漏报率均随降水阈值的增加呈上升趋势。在晴雨预报上,3 个模式(EC、CMA-MESO 和 SXWRF)中 CMA-MESO 晴雨预报准确率最高,为 79.05%,其在 TS 与其他 2 个模式大体相当(0.60 左右)的情况下,Bias 最接近 1,表明 3 个模式中其晴雨预报质量相对最好。EC、CMA-MESO、SXWRF 和 SCMOC 降水预报产品中,SCMOC 的晴雨预报准确率和暴雨 TS 评分最高,分别为 81.60% 和 0.30,暴雨预报 Bias 大于 1,空报率大于漏报率,暴雨预报 Bias 偏差幅度仅小于 CMA-MESO 模式,EC 的晴雨预报准确率和 CMA-MESO 暴雨 TS 评分最低,分别为 77.04% 和 0.16。

2.2 卡尔曼动态 FMM 订正效果分析

为了综合评估比较卡尔曼动态 FMM 对不同模式的订正效果,绘制了二分类预报综合检验图(图 3),并绘制了等 Bias 和等 TS 曲线辅助线,检验结果以圆点和小三角方式显示在图中,可直观比较成功率、命中率、Bias 和 TS 等检验指标。

00 时和 12 时 2 个不同起报时次综合检验总样本数为 322 个。经卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC、CMA-MESO 和 SXWRF 模式 24 h 晴雨预报准确率分别提高了 6.35%、0.11% 和 1.36%,其中 EC 模式提高幅度最为显著,且其订正后的晴雨预报准确率高于订正前后的其他预报产品;订正后 3 个模式晴雨预报空报率均减小,漏报率均增大,EC 和 SXWRF 模式 Bias 更接近 1, CMA-MESO Bias 略小于 1。仅经卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 和 SXWRF 模式 24 h 暴雨 TS 评分分别提高了 6.99% 和 3.08%(图 3a),相应的空报率和 Bias 偏差幅度

也都有所增大,表明 EC 和 SXWRF 模式 24 h 暴雨 TS 评分提高是以牺牲其空报率为代价的,且订正后的 EC 模式 24 h 暴雨 TS 评分高于订正前后的其他模式产品,但依然低于 SCMOC。由此可见,卡尔曼动态 FMM 可明显提高 EC、CMA-MESO 和 SXWRF 模式 24 h 降水预报产品的晴雨预报准确率,尤其是 EC 模式;同时,还可减少上述降水预报产品小雨空报现象。此外,该订正技术还可提高 EC 和 SXWRF 模式 24 h 暴雨 TS 评分,并对 CMA-MESO 模式暴雨预报 Bias 有改进作用。但卡尔曼动态 FMM 对暴雨预报的改善效果不稳定,这主要与该方法无法订正降水落区有关,当降水落区错报时,订正后的效果变化不大甚至变差,而现有的模式降水预报产品对暴雨落区的预报水平要远差于晴雨预报,因而卡尔曼 FMM 对暴雨的改善效果差于晴雨预报。

EC、CMA-MESO 和 SXWRF 模式 00 时起报的 24 h 晴雨预报准确率和暴雨 TS 评分均高于 12 时起报的(图 3b, 3c), 24 h 暴雨 TS 评分则相反,经卡尔曼动态 FMM 订正后,对 3 个模式 12 时起报的 24 h 暴雨 TS 评分改善效果较 00 时起报的更明显。此外,00 时和 12 时单独起报时次检验评估效果与其综合检验评估效果基本一致。鉴于卡尔曼动态 FMM 对 EC 晴雨预报准确率提升幅度和暴雨 TS 评分提升幅度均最大(分别为 6.35% 和 6.99%),因此,后文以 EC 模式为主要订正对象。

2.3 晴雨消空二次订正效果分析

对于小量级降水,模式预报频率大于观测频率,即 $0 \sim X_0$ (X_0 为观测降水为 0.1 mm 时的观测频率 Y_0 在预报频率曲线上对应的预报值,图 2)范围内的模式预报降水量对应的预报频率在观测曲线上无对应的降水频率,从而使得 $0 \sim X_0$ 范围内的模式预报降水量无法按照卡尔曼动态 FMM 严格订正,而是全部按照 0.1~1.0 mm 这段观测曲线延长线被订正成小于 0.1 mm 的数值,即全部处理为 0.0 mm,这是影响经卡尔曼动态 FMM 订正后模式降水预报准确率的一个重要因素。为了进一步提高模式晴雨预报准确率,采用基于最优 TS 评分的阈值法和基于 SCMOC 在有无天气过程判定中占优的信息,对卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式降水预报进行晴雨消空二次订正。基于最优 TS 评分的阈值法主要是根据模式在不同消空临界值下的近期表现来

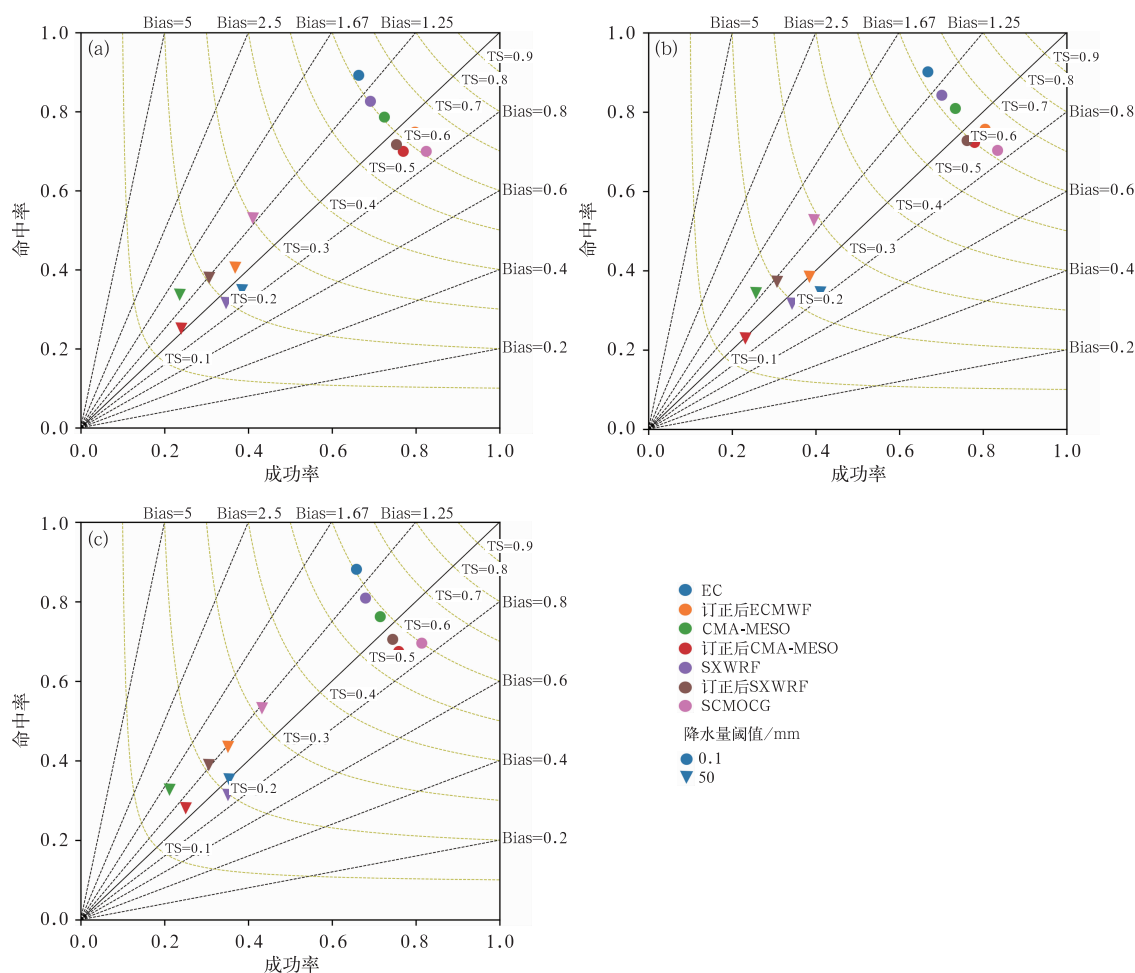


图 3 2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日 EC、CMA-MESO、SXWRF 模式和 SCMOG

(a)00 时和 12 时,(b)00 时和(c)12 时起报的 24 h 累计降水量订正前后二分类预报的综合检验图

Fig. 3 Comprehensive test charts of the two-category forecast before and after the correction of 24 h accumulated precipitation by EC, CMA-MESO, SXWRF and SCMOG models at different start times of (a) 00 UTC and 12 UTC, (b) 00 UTC, (c) 12 UTC from 1 April to 30 September 2021

确定最优临界值进而达到消空目的,基于 SCMOG 产品对有无天气过程的判定来进行二次消空主要是考虑到 SCMOG 产品晴雨预报表现明显优于其他模式产品(图 3)。

经晴雨消空二次订正后的 00 时和 12 时、00 时、12 时起报的 EC 模式晴雨预报准确率较仅经卡尔曼动态 FMM 一次订正后均有明显提高(图 4),分别提高了 0.51%、0.30%和 0.76%。但空报率降低,漏报率提高,因此,晴雨预报准确率的提高是通过降低空报率和牺牲漏报率来实现的。此外,晴雨消空二次订正技术还能提高 EC 模式小雨预报准确率(图 4),二次订正后的 00 时和 12 时、00 时、12 时起报的 EC 模式小雨预报准确率较一次订正后分别提高了 0.64%、0.36%和 0.97%,提高幅度均大于

相应起报时次的晴雨预报准确率提高幅度。参与晴雨和小雨消空二次订正样本数为 52 个,正订正效果样本数(41 个)明显多于负订正效果样本数(11 个),且这种正订正效果在某些个例中表现是比较明显的,如:2021 年 8 月 1 日 12 时和 9 月 11 日 00 时起报的未来 24 h EC 模式降水产品,二次订正结果晴雨预报准确率较一次订正结果分别提高了 5.30%和 6.61%。

2.4 暴雨空间订正效果分析

2.4.1 基于分类降水过程的卡尔曼动态 FMM 订正效果分析

系统性降水是由高空槽、低涡、地面锋面等天气尺度系统所带来的降水,其降水量较大;非系统性降

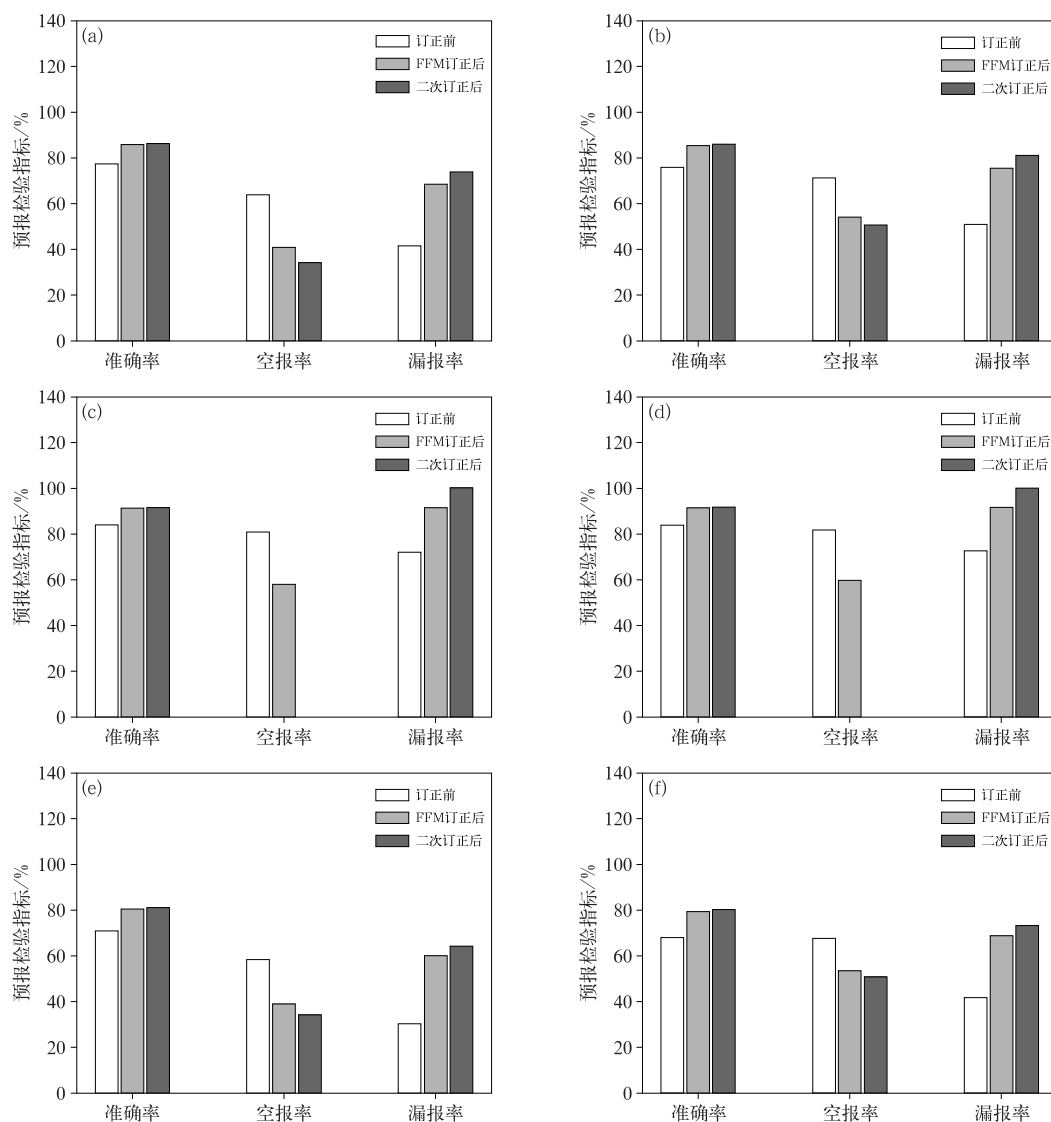


图 4 2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日 EC 模式不同起报时间 24 h 累计降水

二次订正前后(a,c,e)晴雨和(b,d,f)小雨预报检验对比

(a,b)00 时和 12 时,(c,d)00 时,(e,f)12 时

Fig. 4 Comparison of the accuracy of (a, c, e) sunny rain and (b, d, f) light rain forecasts before and after the second correction of 24 h accumulated precipitation by EC model

at different start times from 1 April to 30 September 2021

(a, b) 00 UTC and 12 UTC, (c, d) 00 UTC, (e, f) 12 UTC

水发生频率高,但降水量小(罗聪等,2021)。考虑到系统性和非系统性降水的特征及区别,尝试按照降水范围和强度分别达到一定规模和量级的思路对系统性降水单独建模订正,从而期望进一步提高卡尔曼动态 FMM 对暴雨的订正效果。试验表明,当研究区域有不少于 1/8 的站点预报了降水,且有暴雨点出现时,则认为是系统性降水,那么搜寻过去实况至少 1/8 的站点有降水且有暴雨点出现的最近 30 d 样本进行卡尔曼动态 FMM 订正,此时订正效果相

对最好。00 时和 12 时、00 时及 12 时起报的 EC 模式订正后暴雨 TS 评分较未分类过程订正后的均有所提高(图 5),分别提高了 1.05%、0.84% 和 1.25%,且分过程订正后的暴雨评分其他指标均向好的方向发展,这表明分过程订正后暴雨 TS 评分的提高并不是以牺牲其他指标为代价的。同样,00 时和 12 时、00 时及 12 时起报的 EC 模式大雨订正 TS 评分较未分类过程订正后的大雨 TS 评分也均有所提高,分别提高了 3.82%、4.50% 和 3.17%,且

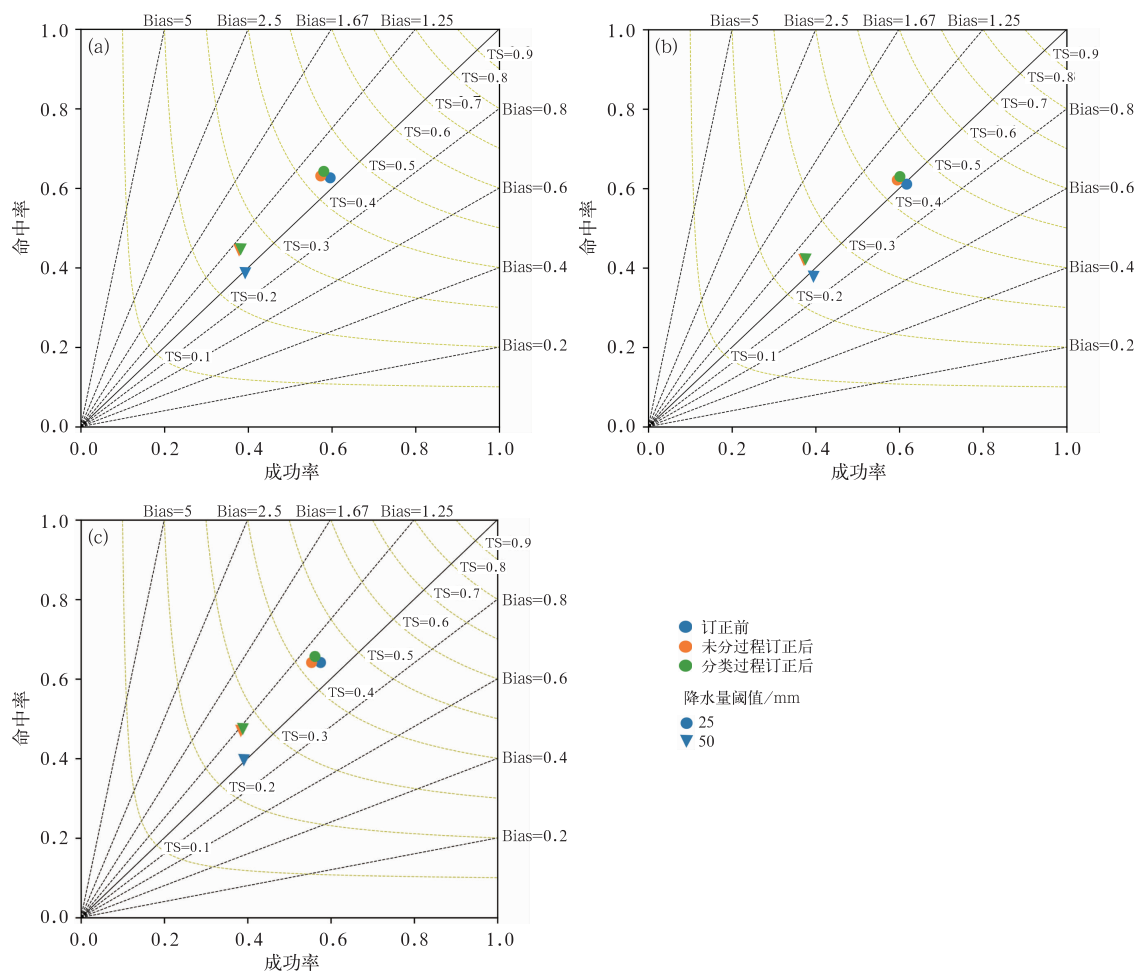


图 5 2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日 EC 模式(a)00 时和 12 时,(b)00 时,

(c)12 时起报的 24 h 累计降水量分类降水过程订正前后二分类预报的综合检验图

Fig. 5 Comparison of the two-category forecast before and after the correction of 24 h accumulated precipitation in the sub processes of EC model at different start times of (a) 00 UTC and 12 UTC, (b) 00 UTC, (c) 12 UTC from 1 April to 30 September 2021

分类过程订正后除 Bias 评分指标外,其余评分指标也均向好的方向发展。

2.4.2 基于空间相似识别技术改进的卡尔曼动态 FMM 订正效果分析

在利用卡尔曼滤波法统计降水频率时,为了既保留最近天气变化特征和模式近期预报表现情况,又选取与当前模式预报天气形势差不多的样本,同时考虑天气形势分类的多样性及高低层天气系统之间相互作用的复杂性,而模式预报降水场是高低层天气系统相互作用的综合结果,降水预报场的空间分布和强度在一定程度反映了当天的环流形势(钱磊等,2022),因此选取近 30 d 样本中空间相似度较高的前 10 个样本,按相似度从低到高依次参与卡尔曼滤波法降水频率的统计及 FMM 订正。基于空间相似识别技术改进的卡尔曼动态 FMM 可显著提高

所有量级降水的 TS 评分,尤其是暴雨 TS 评分(图 6),58.57%的暴雨样本 TS 评分都得到了进一步提高,00 时和 12 时、00 时、12 时起报的 EC 暴雨 TS 评分分别提高了 2.79%、1.60%和 3.94%,但 Bias 偏离 1 幅度更大,分别增加了 0.14、0.13 和 0.15,各量级降水 TS 评分的提高是通过减小漏报率同时增大空报率实现的。基于空间相似识别技术改进的卡尔曼动态 FMM 虽可进一步改善模式暴雨 TS 评分,但却无法进一步提高模式晴雨预报准确率,这可能与晴雨存在于每天的样本中,而暴雨只存在于少量样本中有关。需要注意的是,本文通过敏感性试验研究挑选了近 30 d 样本中相似度较高的前 10 个样本参与了卡尔曼动态 FMM 订正,那么此时迭代式(1)中的权重系数中的 n_d 也需要相应修改为 10。

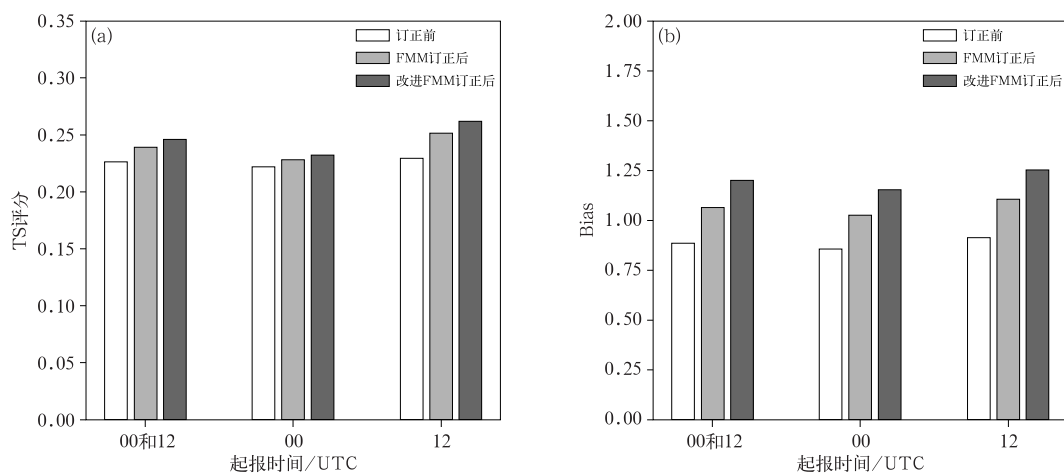


图 6 2021 年 4 月 1 日至 9 月 30 日 EC 模式不同起报时间 24 h 累计降水经

卡尔曼动态 FMM 和改进后卡尔曼动态 FMM 订正后的暴雨(a)TS 和(b)Bias 评分对比

Fig. 6 Comparison of (a) TS and (b) Bias of rainstorm forecast before and after the improvement of Kalman dynamic FMM of 24 h accumulated precipitation by EC model at different start times from 1 April to 30 September 2021

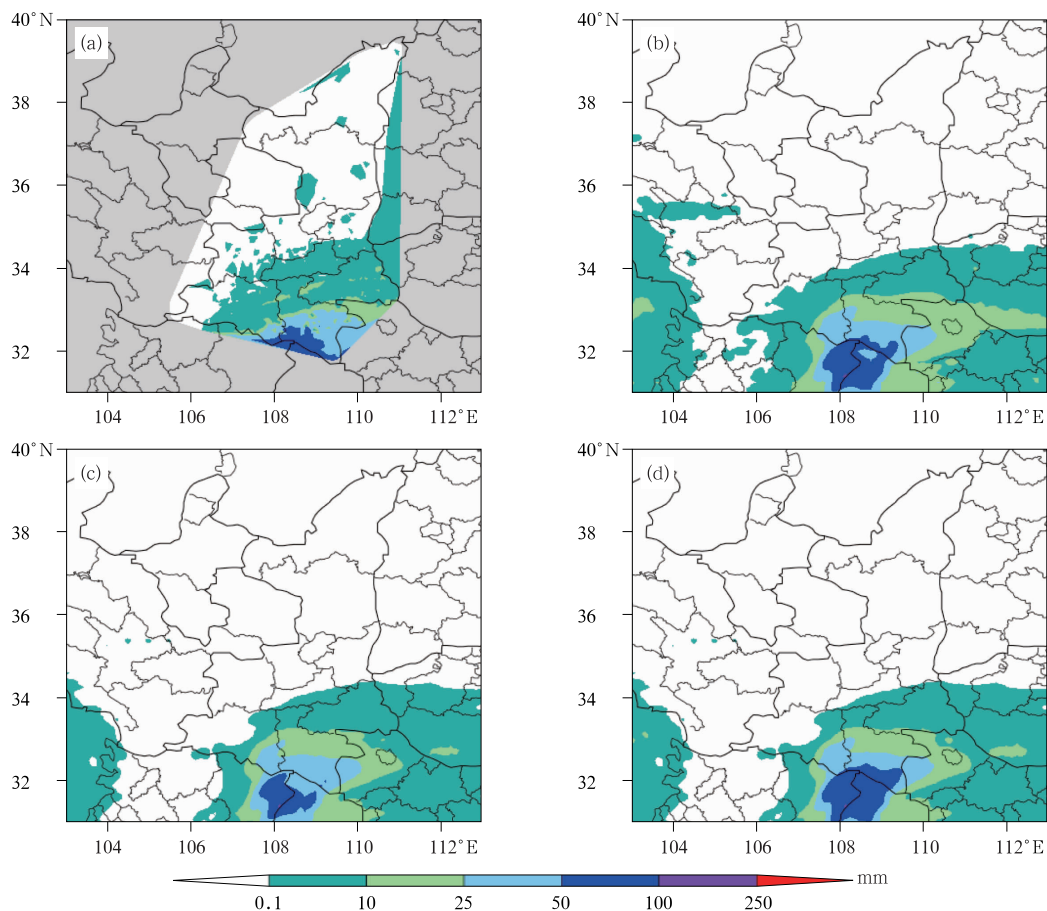


图 7 2021 年 6 月 17 日 12 时至 18 日 12 时暴雨过程不同降水预报产品及观测实况空间分布

(a) 实况观测, (b) EC 模式, (c) 卡尔曼动态 FMM 订正结果, (d) 改进后的卡尔曼动态 FMM 订正结果

Fig. 7 Spatial distribution of different precipitation prediction products and observation data of the rainstorm process from 12 UTC 17 to 12 UTC 18 June 2021

(a) observation, (b) EC model, (c) revised result of Kalman dynamic FMM,
(d) revised result of improved Kalman dynamic FMM

陕西省暴雨日数和年降水量呈现南多北少的特点,陕南南部米仓山和大巴山是陕西省内暴雨发生概率最高的区域。2021 年 6 月 17 日 12 时至 18 日 12 时和 2021 年 8 月 27 日 12 时至 28 日 12 时,陕西南部部分地区均出现暴雨,其中,前一次过程(图 7a)暴雨范围更大、强度更强,共计 43 个站累计降水量大于 50 mm,最大累计降水量出现在汉中镇巴山站,为 95.4 mm。EC 模式预报暴雨范围偏小(图 7b),经卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式暴雨范围偏小更多(图 7c),而经改进后的卡尔曼动态 FMM 订正后,暴雨预报范围最接近实况(图 7d)。统计结果表明,卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式暴雨各项评分指标较订正前均变差,而改进后的卡尔曼动态 FMM 订正后,各项评分指标较订正前

均变好,其中,命中率、晴雨准确率和 TS 评分较订正前分别提高了 14.29%、0.33% 和 90.48%,空报率、漏报率和 Bias 距 1 的偏差幅度分别降低了 20.00%、25.00% 和 39.13%。改进后的卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式晴雨预报各项指标与改进前卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式晴雨预报各项指标保持一致。后一次过程有 33 个站累计降水量超过 50 mm(图 8a),最大累计降水量为 72.5 mm(安康汉阴蒲溪站)。EC 模式和改进前卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式漏报率均为 100.00%,即全部漏报(图 8b,8c),而改进后的卡尔曼动态 FMM 订正后的 EC 模式(图 8d)漏报率大幅减少,仅为 44.44%,暴雨 TS 评分和命中率分别提高了 33.33% 和 45.45%。

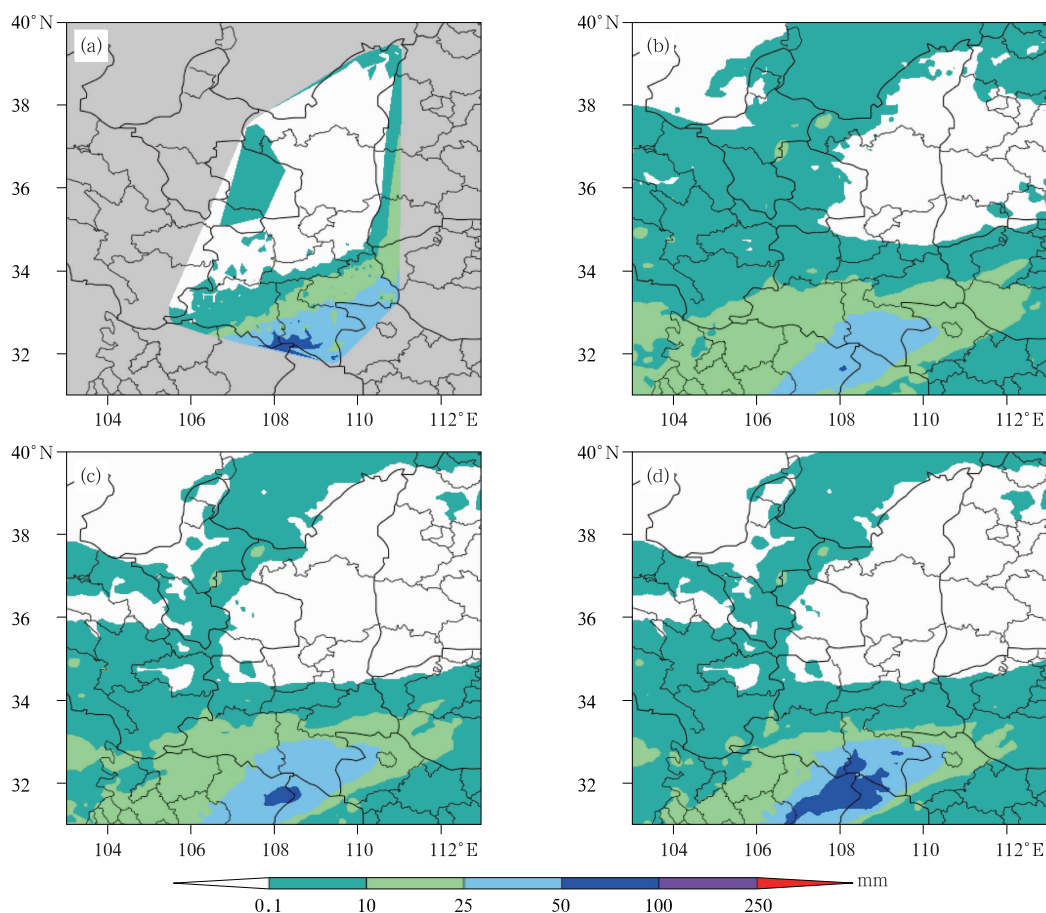


图 8 2021 年 8 月 27 日 12 时至 28 日 12 时暴雨过程不同降水预报产品及观测实况空间分布
(a) 实况观测, (b) EC 模式, (c) 卡尔曼动态 FMM 订正结果, (d) 改进后卡尔曼动态 FMM 订正结果

Fig. 8 Spatial distribution of different precipitation prediction products and observation data of the rainstorm process from 12 UTC 27 to 12 UTC 28 August 2021

(a) observation, (b) EC model, (c) revised result of Kalman dynamic FMM,

(d) revised result of improved Kalman dynamic FMM

3 结论与讨论

(1)对比评估了2021年汛期EC、CMA-MESO、SXWRF模式和SCMOC降水预报产品在陕西省的表现,讨论了卡尔曼动态FMM对EC、CMA-MESO和SXWRF等不同模式的订正效果。结果发现,订正前SCMOC晴雨预报准确率和暴雨TS评分最高,分别为81.60%和0.30,EC晴雨预报准确率最低,为77.04%,卡尔曼动态FMM订正后的EC晴雨预报准确率最高,为81.93%,卡尔曼动态FMM对EC晴雨预报准确率和暴雨TS评分提升幅度均最大,分别为6.35%和6.99%,表明该方法更适合于EC模式。卡尔曼动态FMM还可提高其他2个模式降水预报产品有雨或无雨定性晴雨预报的准确率及SXWRF模式暴雨TS评分,说明FMM订正技术对暴雨预报改善效果不稳定。EC和SXWRF模式暴雨TS评分提高是以牺牲其空报率为代价的。

(2)由于模式对小量级降水无法严格按照FMM订正,导致模式对卡尔曼动态FMM订正后的小量级降水依然存在较高的空报率,基于最优TS评分的阈值法和基于SCMOC对有无天气过程的判定可以进一步通过降低空报率来提高晴雨预报准确率。经晴雨消空二次订正后的EC模式晴雨和小雨预报准确率较仅经卡尔曼动态FMM订正后的EC模式均有明显提高,分别提高了0.51%和0.64%,正订正效果样本数占总样本数78.85%。

(3)利用系统性降水的特征,对分类降水过程建模订正可进一步提高暴雨TS评分,EC暴雨TS评分较未分类过程订正后的暴雨TS评分提高了1.05%,且暴雨其他评分指标也均变好。

(4)为了既能体现模式最近预报水平,又能反映当前预报时刻环流形势状况尤其是转折性强天气的天气形势特征,利用基于图像相似识别技术的相似样本取样法对卡尔曼动态FMM进行了改进。研究表明,较卡尔曼动态FMM,改进后的卡尔曼动态FMM可进一步提高EC各量级降水TS评分,尤其是暴雨TS评分,提高了2.79%,虽然这是以牺牲其Bias为代价的,但改进后的EC暴雨Bias指标依然优于SCMOC。不足的是改进后的EC暴雨TS评分指标依然比SCMOC差,这将是我们在下一步工作中继续需要努力的方向之一。

致谢:感谢中国气象局提供的EC、CMA-MESO和SCMOC降水预报产品资料和地面降水观测资料,感谢陕西省气象科学研究所提供的SXWRF资料。

参考文献

- 包慧濛,郭达烽,李葳,2022.基于频率匹配法的江西省ECMWF降水预报订正研究[J].气象与环境学报,38(2):12-20. Bao H M, Guo D F, Li W, 2022. Correction tests of ECMWF modeling quantitative precipitation using frequency matching method in Jiangxi Province[J]. J Meteor Environ, 38(2): 12-20 (in Chinese).
- 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).
- 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).
- 高星星,潘留杰,王瑾,等,2021.基于频率匹配和融合法的多种网格降水预报产品订正[J].陕西气象,(6):9-14. Gao X X, Pan L J, Wang J, et al, 2021. Correction of multiple grid precipitation forecast products based on method of frequency matching and fusion[J]. J Shaanxi Meteor, (6): 9-14 (in Chinese).
- 郭丹妮,刘屹岷,吴国雄,等,2023.2021年7月河南极端暴雨事件的位涡诊断和精细化预报[J].大气科学,47(2):534-550. Guo D N, Liu Y M, Wu G X, et al, 2023. Potential vorticity analysis and fine forecast of extreme rainstorm event in Henan Province in July 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 47(2): 534-550 (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).
- 罗聪,张华龙,曾沁,等,2021.多模式融合的广东网格定量降水预报方法的研发与评估[J].气象,47(5):539-549. Luo C, Zhang H L, Zeng Q, et al, 2021. Development and verification of a gridded quantitative precipitation forecast method in Guangdong Province based on multi-model integration[J]. Meteor Mon, 47(5): 539-549 (in Chinese).
- 潘留杰,薛春芳,张宏芳,等,2022.基于卡尔曼动态频率的ECMWF降水预报订正[J].气象,48(1):73-83. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al, 2022. ECMWF precipitation calibration based on the Kalman dynamic frequency matching method[J]. Meteor Mon, 48(1): 73-83 (in Chinese).
- 钱磊,邱学兴,郑淋淋,等,2022.基于降水空间分布相似的最优集成降水预报及其检验[J].暴雨灾害,41(3):324-335. Qian L, Qiu X X, Zheng L L, et al, 2022. Prediction and test of optimal integrated precipitation based on similar spatial distribution of precipitation[J]. Torr Rain Dis, 41(3): 324-335 (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).
- 吴柏莹,智协飞,陈超辉,等,2022. 基于复卡尔曼滤波技术的华东区域风的多模式集成预报研究[J]. 气象,48(4):393-405. Wu B Y, Zhi X F, Chen C H, et al, 2022. Multi-model ensemble forecasts of wind over East China by using augmented complex extended Kalman filter[J]. Meteor Mon,48(4):393-405(in Chinese).
- 伍清,李英,2021. 基于频率匹配法的 SWC-WARMS 模式降水订正试验[J]. 高原山地气象研究,41(4):70-75. Wu Q, Li Y, 2021. Precipitation correction of SWC-WARMS model based on frequency matching method[J]. Plateau Mountain Meteor Res,41(4):70-75(in Chinese).
- 杨璐,宋林烨,荆浩,等,2022. 复杂地形下高精度风场融合预报订正技术在冬奥会赛区风速预报中的应用研究[J]. 气象,48(2):162-176. Yang L, Song L Y, Jing H, et al, 2022. Fusion prediction and correction technique for high-resolution wind field in Winter Olympic Games area under complex terrain[J]. Meteor Mon,48(2):162-176(in Chinese).
- 张海鹏,智协飞,吉璐莹,2020. 中国区域降水偏差订正的初步研究[J]. 气象科学,40(4):467-474. Zhang H P, Zhi X F, Ji L Y, 2020. A preliminary study on calibration in precipitation forecast over China[J]. J Meteor Sci,40(4):467-474(in Chinese).
- 张延彪,陈明轩,韩雷,等,2022. 数值天气预报多要素深度学习融合订正方法[J]. 气象学报,80(1):153-167. Zhang Y B, Chen M X, Han L, et al, 2022. Multi-element deep learning fusion correction method for numerical weather prediction[J]. Acta Meteor Sin,80(1):153-167(in Chinese).
- 张祖莲,毛炜峰,张山清,等,2022. 北疆春季气温和霜冻网格精细化预报订正及检验[J]. 气象,48(11):1460-1474. Zhang Z L, Mao W Y, Zhang S Q, et al, 2022. Correction and verification for grid refined forecast of temperature and frost in spring in Northern Xinjiang[J]. Meteor Mon,48(11):1460-1474(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).
- Cui B, Toth Z, Zhu Y J, et al, 2012. Bias correction for global ensemble forecast[J]. Wea Forecasting,27(2):396-410.
- Scheuerer M, Hamill T M, 2015. Statistical postprocessing of ensemble precipitation forecasts by fitting censored, shifted gamma distributions[J]. Mon Wea Rev,143(11):4578-4596.
- Wilks D S, Hamill T M, 2007. Comparison of ensemble-MOS methods using GFS reforecasts[J]. Mon Wea Rev,135(6):2379-2390.
- 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 王蕾)