

赵瑞霞,代刊,金荣花,等,2020. OTS、MOS 和 OMOS 方法及其优化组合应用于 72 h 内逐 3 h 降水预报的试验分析研究[J]. 气象,46(3):420-428. Zhao R X,Dai K,Jin R H,et al,2020. Comparison of OTS, MOS, OMOS methods and their combinations applied in 3 h precipitation forecasting out to 72 h[J]. Meteor Mon,46(3):420-428(in Chinese).

OTS、MOS 和 OMOS 方法及其优化组合应用于 72 h 内逐 3 h 降水预报的试验分析研究^{*}

赵瑞霞¹ 代刊¹ 金荣花¹ 韦青¹ 张宏²
郭云谦¹ 林建¹ 王玉¹ 唐健¹

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 开展了夏半年 72 h 内逐 3 h 降水预报试验,针对 ECMWF 模式预报、基于 ECMWF 的模式输出统计(MOS)预报、纳入超前空间实况信息的 OMOS 预报,以及三种预报的最优 TS 评分订正(OTS)预报,对比分析预报效果,探讨一种多方法结合能够提供良好预报性能的 3 h 定量降水预报技术方案。结果表明:在短期预报中,MOS 预报与 OTS 订正相结合的 MOS-OTS 综合预报方法的预报性能最好,而且 MOS-OTS 方法的 3 h 强降水预报与业务运行的城镇指导预报中融合主客观预报的降水预报相比,也具有一定优势;而在临近 3 h 预报中,则 OMOS 预报与 OTS 订正相结合的 OMOS-OTS 综合预报方法最优,3 h 内 0.1、3 和 10 mm 以上降水的 TS 评分最高,比原始模式预报分别提高 73%、198%和 483%,Bias 评分接近于 1,在夏半年的逐日晴雨预报中,OMOS-OTS 方法在大部分日期都稳定优于 MOS-OTS 预报和城镇指导预报。

关键词: MOS 预报,OMOS 预报,OTS 订正预报,综合预报方法,精细降水预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.013

Comparison of OTS, MOS, OMOS Methods and Their Combinations Applied in 3 h Precipitation Forecasting out to 72 h

ZHAO Ruixia¹ DAI Kan¹ JIN Ronghua¹ WEI Qing¹ ZHANG Hong²
GUO Yunqian¹ LIN Jian¹ WANG Yu¹ TANG Jian¹

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: The performance of three statistical post-processing methods and their combinations for 3 h precipitation forecasts out to 72 h from May to September are compared in this paper. They are optimal threat score (OTS) correction, model output statistics (MOS) and MOS with prior-spatial observation predictors (OMOS). The 3 h precipitation forecasts of ECMWF model output (DMO), MOS, OMOS, and their OTS correction forecasts (DMO-OTS, MOS-OTS, OMOS-OTS) are evaluated. The results show that MOS-OTS method has the best performance in the short term forecast. At the same time, for the heavy precipitation forecast, MOS-OTS also obviously outperforms the operational guidance (GD) forecast which integrates subjective and objective predictions. In the first 3 h precipitation forecast, OMOS-OTS is the best method. For the first 3 h precipitation forecast, the TS scores of OMOS-OTS for thresholds of 0.1, 3

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-148)、国家科技支撑计划(2015BAC03B04)和国家自然科学基金项目(41575066)共同资助

2019 年 5 月 5 日收稿; 2020 年 2 月 21 日收修定稿

第一作者:赵瑞霞,主要从事数值预报模式统计后处理客观预报技术研究. Email:zhaorx@cma.gov.cn

and 10 mm per 3 h are improved about 73%, 198% and 483% than DMO respectively. And the bias score of OMOS-OTS is close to 1. In the daily variation during summer time, the first 3 h precipitation forecast from OMOS-OTS outperforms both MOS-OTS and GD forecast in most days evaluated by TS and Bias scores for the threshold of 0.1 mm per 3 h.

Key words: MOS forecast, OMOS forecast, OTS correction, integrated forecast method, fine precipitation forecast

引言

精细化定量降水预报,是公众气象服务和防灾减灾决策服务中关注的重点内容。精准到逐3 h甚至逐1 h的降水量预报,是对天气可预报性和主客观预报能力的挑战。得益于不断丰富的观测资料和稳步发展的大气数值预报模式,天气预报水平不断提升(代刊等,2016;金荣花等,2019),但即使是国际上十分先进的ECMWF模式,其用户指南中也指出预报性能的种种局限性(<https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/9+Physical+Considerations+when+Interpreting+Model+Output>;Buizza et al,2018)。

因此,结合多源实况信息对数值模式进行统计后处理以提高预报技巧,是十分重要且有效的。自20世纪70年代开始,发展了数值模式输出统计(MOS)客观预报方法(Glahn and Lowry,1972;Carter et al,1989;Vislocky and Fritsch,1995)。多年来,世界各国客观预报业务中广泛使用基于确定性模式的MOS预报或者集合MOS预报方法(刘还珠等,2004;Wilks and Hamill,2007;Charba and Samplatsky,2011;赵声蓉等,2012;白永清等,2013;Stauffer et al,2017;代刊等,2018),显著提高了临近和短期预报效果。在当前网格预报成为各国业务主流产品形式的大背景下(Glahn and Ruth,2003;Glahn et al,2009;Engel and Ebert,2012),MOS预报、集合MOS预报方法仍然是客观指导预报业务中的有效手段(Ruth et al,2009;金荣花等,2019)。

传统意义上的MOS预报,预报因子主要来源于数值模式预报产品。但是,鉴于零场实况的重要性,国际上有些研究尤其是在短时临近预报中,将实况信息作为预报因子引入MOS预报中(Schmeits et al,2008;Chen et al,2017;Trepte et al,2018),主要纳入当前站点或者附近几个站点的实况信息。本文研发了一种提取时间上超前、空间上相关的实况信息作为预报因子的方法,利用空间上的距离实现

时间上的滞后预报信息,延长对预报效果改进的时间。当然,滞后预报时效的长短与影响预报要素的天气系统的生命周期长短有关。由于纳入了起报时次之前的实况信息,本方法可以成为高频滚动预报的有效技术途径。

在降水客观预报业务中,目标评分阈值订正方法也十分常用(李俊等,2014;毕宝贵等,2016;唐文苑和郑永光,2019)。这类方法消耗计算资源少,易于业务稳定运行。NCEP业务中使用的频率匹配拟合方法(FM)(Zhu and Luo,2015),以降水预报偏差达到最优为算法核心,明显改善了NCEP全球预报模式和集合预报模式降水预报的系统性偏差,降水模态也更加真实。吴启树等(2017)分别设计了最优TS(OTS)和最优ETS评分订正法,并与FM进行对比,针对ECMWF等多个模式的24 h累积降水的订正预报试验结果表明,不论TS、ETS评分,还是概率空间的稳定公平误差评分,OTS方法在所有时效均能提高模式降水预报质量,是三者中最优的。

本文针对5—9月,开展72 h内逐3 h降水预报试验,对比了ECMWF模式插值的原始预报DMO、基于ECMWF模式的MOS预报、进一步纳入超前空间实况信息后的OMOS预报,以及分别对三种预报进行OTS订正的预报效果,分析几种方法的优劣,探讨一种将多类方法结合、能够提供良好预报性能的3 h定量降水预报方案。

1 资料

本文使用2014—2018年全国2050个自动站的逐1 h降水观测资料,合并生成逐3 h实况降水作为降水预报建模的预报真值。使用全国均匀分布的930个自动观测站的逐1 h降水观测,提取超前空间实况预报因子。另外,使用了2015—2018年ECMWF模式的细网格预报产品,高空变量空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,地面变量为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$,时间分辨率:72 h内为3 h间隔,240 h内为6 h间隔。需要说明的是,考虑存储空间限制等因素,地面变量

在最初入库时,采取了跳格点存储,与高空要素一致,采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间分辨率。

2 方法介绍

2.1 最优 TS 评分订正(OTS)预报方法

OTS 预报方法是一种以 TS 评分最优化为目标的偏差订正方案(吴启树等,2017)。订正匹配公式如下:

$$y = \begin{cases} 0 & x < F_1 \\ O_k + (O_{k+1} - O_k) \frac{(x - F_k)}{(F_{k+1} - F_k)} & F_k < x < F_{k+1} \\ x \frac{O_M}{F_M} & x \geq F_M \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为模式降水的预报值和订正值; O_k 为第 k 量级降水阈值($k=1,2,\dots,M$),共分为 M 级降水量级; F_k 为预报降水量订正到 O_k 时,该量级对应模式降水量阈值。当预报值小于最小量级降水的阈值 F_1 时,订正预报 y 为 0,称作消空订正。训练过程中调整 F_k ,使第 k 量级以上累积降水的 TS 评分达到最高时求得。

与吴启树等(2017)研究中最优 TS 阈值训练期的选取方法不同,本研究针对每个站点做了单独的最优 TS 阈值训练,考虑到训练样本量问题,选取 2015—2017 年 5—9 月作为训练样本期,统计出最大 TS 评分对应的量级阈值,统一应用于该站点 5—9 月的降水订正。

2.2 模式输出统计(MOS)预报方法

MOS 预报的建模采用双重 F 检验因子筛选的最优逐步回归方法,生成如式(2)所示的多元线性回归预报方程。

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (2)$$

式中: y 为 MOS 预报值; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为模式预报因子或者其他预报因子; b_0 为回归常量, $b_1, b_2, \dots, b_n$ 为回归系数。

为提高建模和预报效率,对预报因子进行了初选,选取 ECMWF 模式的低云量、总云量、3 h 累积降水量、总水汽含量、850、700 和 500 hPa 等压面层的相对湿度、垂直速度、散度、涡度、纬向风、经向风,以及三个等压面层的衍生物理变量温度平流和风垂直切变,作为备选预报因子。

需要指出的是,本研究中并没有如 Glahn and

Lowry(1972)研究中以及后来大部分 MOS 降水预报中一样(赵声蓉等,2009),将各等级的降水预报处理为发生与否的 0、1 事件,而是直接对降水预报值进行建模。

2.3 纳入超前空间实况信息的 OMOS 预报方法

本文设计研发的 OMOS 预报方法与 MOS 预报方法的关键区别,在于增加了时间上超前、空间上相关的“超前空间实况因子”,以下简称 OPTOR 因子,主要用于提取和表征前期上游天气系统的移动影响效应。具体是指,针对某预报要素,检索起报时间之前的一段时间内与预报要素具有显著相关性的某些区域的实况信息,通过客观方法提取生成该信息的表征量,作为 OPTOR 因子。

OPTOR 因子的提取,首先需要根据历史实况数据进行超前空间相关信息统计。本研究利用 2014—2016 年的实况资料样本统计了相关信息,以起报时间 08 时为准,针对每个预报站点,求取每个预报时效对应时间如 11 时、14 时、17 时等的 3 h 实况降水量,与全国 930 个实况因子备选站群(图略)“超前”1~12 h 的逐 1 h 实况降水的相关系数,对应于前一日 20 时至当日早上 07 时。实况因子站群的选取原则为到报率高且尽量均匀分布。其中,第 m 个预报站点、第 n 个预报时效的预报要素 $Y(m, n)$ 与第 i 个超前时刻、第 j 个因子站点的实况要素 $X(i, j)$ 的相关系数的求取如下:

$$r[Y(m, n), X(i, j)] = \frac{\text{cov}[X(i, j), Y(m, n)]}{\sqrt{\text{var}[X(i, j)]\text{var}[Y(m, n)]}} \quad (3)$$

式中: $\text{cov}[X(i, j), Y(m, n)]$ 为 $X(i, j)$ 与 $Y(m, n)$ 的协方差, $\text{var}[X(i, j)]$ 为 $X(i, j)$ 的方差, $\text{var}[Y(m, n)]$ 为 $Y(m, n)$ 的方差。只保留通过显著性水平检验的相关信息。

然后,根据相关信息进行区域组合,检索同一超前时间点属于相同天气系统的多个超过显著性水平检验的相关站点群。针对每个超前时刻,分象限挑选最大相关系数站点,给定半径搜索邻近相关站,反复循环搜索选入站点群中所有站点的邻近站点群,最终将它们整合为空间上相近具备区域代表性的区域组合。多次循环上面过程直到将所有站点实现相近站点群的区域组合。

最后,基于区域组合信息设计特征因子方案,计算 OPTOR 因子。针对每个区域提取特征量,本文选取了相关系数权重降水量(V_r)、最大相关系数站点降水量和区域最大降水量等 3 个指标,提取计算

了2015—2017年的OPTOR因子纳入MOS建模过程。 V_r 的计算如下:

$$V_r = \sum_{j=1}^{ns} r_j V_j \quad (4)$$

式中: ns 为某组合区域内的站点总数; r_j 为区域内第 j 个站点观测值与预报要素3 h降水量的历史统计相关系数; V_j 为该站点的1 h降水量观测值。

2.4 试验方案

从国家级城镇指导预报站点中,挑选出空间上均匀分布的2050个站点(站点分布图略),针对“夏季类”样本期5—9月(车钦等,2011),开展08时起报的72 h内逐3 h降水预报试验。考虑模式预报产品的实际生成时间滞后于起报时间,ECMWF模式资料使用的是前一天20时起报的预报产品。以2015—2017年作为OTS、MOS及OMOS方法的阈值统计训练或建模期,2018年作为独立预报检验样本期,对比开展了六种方案的预报试验,分别为:ECMWF模式双线性插值得到的DMO预报,基于ECMWF模式因子的MOS预报,在ECMWF模式因子基础上进一步纳入OPTOR因子的OMOS预报,以下分别简称ED、EM、EO预报;以及分别基于上述三种预报的OTS订正预报,简称ED_OTS、EM_OTS和EO_OTS预报。采用TS评分、预报偏差(Bias)、空报率和漏报率等参数,将3 h降水分为0.1、3和10 mm以上累积降水量3个等级进行检验。

3 短期3 h精细降水预报对比结果分析

3.1 逐3 h有无降水预报效果对比

由图1a可见,对3 h有无降水预报,ED和ED_OTS预报的TS评分比较接近,很多时效ED_OTS评分甚至略低于ED;但是ED_OTS预报明显减小了ED预报过分偏大的Bias评分(图1b)。说明直接进行OTS订正对TS评分改进并不明显,但对Bias评分的改进比较明显,只是仍然偏大,绝大部分时效大于2。这与吴启树等(2017)24 h降水OTS预报结果有所不同,可能和累积降水量时段不同有关。

EM和EO预报的TS评分大部分时效接近或者低于ED和ED_OTS预报,四种预报有无降水的TS评分都在0.17~0.21附近波动;同时EM和EO预报的Bias评分整体而言比ED预报偏大更加严重。可见,仅仅进行MOS或者OMOS预报订正,对于有无降水的预报效果较差。

进一步对EM和EO结果进行OTS订正,TS评分明显提高,最大比ED提高0.125左右,预报时效越短提高量越多,改进效果直至72 h都十分明显;Bias评分的偏大程度也大幅减小,接近于1。EM_OTS与EO_OTS的预报效果比较接近,绝大部分时效EM_OTS预报略好,但临近预报时效EO_OTS的预报效果更好。

可见,对ECMWF有无3 h累积降水预报,单独使用OTS或者MOS统计后处理方法,订正效果都不太理想,但是如果将两种方法结合,开展MOS-OTS及OMOS-OTS组合订正方法预报,则能够显著提高预报技巧。说明通过历史时期与实况的拟合建模,MOS和OMOS方法使得降水预报分布更加合理,但是由于建模中直接对原值进行拟合,会出现例如负值等不符合降水量特性的预报数据,利用OTS方法将EM和EO预报重新与实况进行量级拟合后,有效规范了降水阈值,明显提高TS评分,并且克服了小雨偏多特征。除临近预报时效外,EM_OTS的预报效果略好于EO_OTS预报。

3.2 逐3 h累积3 mm以上降水预报效果对比

图1c和1d表明,与有无降水预报不同,逐3 h累积3 mm以上降水预报的检验评分中,ED_OTS在绝大部分时效明显改进了TS评分,最大提高幅度约0.028,但是Bias评分由原来小于2大幅增加为3.3~4.1;EM和EO的TS评分在所有时效都高于ED和ED_OTS,预报时效越短提高幅度越大,例如临近3 h的TS评分由ED的0.063提高至EM的0.172和EO的0.188,而且Bias评分也接近于1,整体预报性能显著优于ED和ED_OTS;EM和EO相比,除临近3 h外,其他时效EM的TS评分优于EO,Bias评分两者几乎一样;在EM和EO基础上进一步进行OTS订正,TS评分提高不明显,但是Bias评分更接近于1,改善了3 mm以上降水预报略偏多的问题,优化了无偏性能。

可以看到,在3 mm以上降水预报中,OTS订正方法在略微提高TS评分的同时会大幅增加Bias评分,说明OTS方法主要通过调小阈值增加3 mm以上降水量来提高TS评分;MOS和OMOS方法十分有效,大幅提高TS评分的同时,还使得Bias评分接近于1,可以有效优化ECMWF中3 mm以上降水预报分布;在MOS和OMOS预报基础上再进行OTS订正,可以进一步优化预报的无偏性能;EO和EO_OTS显著改进了临近降水预报性能,其他时

效 EM 和 EM_OTTS 预报效果更好。

3.3 逐 3 h 累积 10 mm 以上降水预报效果对比

逐 3 h 累积 10 mm 以上降水预报检验结果表明(图 1e、1f), OTS 方法在所有时效都显著提高了 TS 评分,但同时预报偏差大幅增加。ED 的 Bias 评分小于 1, ED_OTTS 的 Bias 评分则增加至 6~8 左右, 10 mm 以上降水预报严重偏多。

EM 和 EO 均显著提高了 10 mm 以上降水预报的 TS 评分,时效越短提高越明显,第一个预报时效由 ED 的 0.018, 提高为 EM 的 0.081 和 EO 的 0.094, 最大提高了 0.076, 随着预报时效的增长, 提高幅度逐渐减小; Bias 评分与 ED 比较接近且整体略微减小; EM 与 EO 相比, 除临近 3 h 预报外, EM 的 TS 评分更高, EO 的 Bias 更接近于 1。

在 MOS 预报基础上进一步进行 OTS 订正, 得到了更好的预报效果, 一方面 TS 评分进一步显著提高, 最大比 ED 提高达 0.087, 另一方面 Bias 评分由 ED 的明显小于 1 改进为接近 1, 显著提高预报的无偏性。EM_OTTS 与 EO_OTTS 相比, 前者的 TS 评分大部分时效明显高于后者, Bias 评分两者接近, 部分时效 EM_OTTS 的 Bias 评分更接近 1。

由上可知, 对 ECMWF 模式 3 h 累积 10 mm 以上降水预报进行 OTS 订正, 可以适当提高 TS 评分, 但代价是严重增大 Bias 评分, 说明 OTS 方法主要通过大幅增加 10 mm 以上降水来提高 TS 评分; 而 MOS 和 OMOS 方法, 则通过合理优化 ECMWF 的 10 mm 以上降水预报分布显著提高 TS 评分, 进一步通过 OTS 订正适度增加 10 mm 以上降水预报, 再次提高了 TS 评分并且改善了预报偏小属性, 可见当 OTS 订正方法基于降水分布更加合理的 MOS 或者 OMOS 预报时, 比基于原始 ECMWF 模式预报更加有效。除临近预报时效外, EM_OTTS 比 EO_OTTS 订正效果更好。

3.4 MOS-OTS 组合方法与城镇指导预报对比分析

由 3.3 节分析可以看到, 采取 MOS-OTS 组合方法, 显著提高了 10 mm 以上降水的预报性能, 进一步将 EM_OTTS 预报结果与国家气象中心下发的城镇指导预报(以下简称 GD 预报)进行对比。GD 预报融合了客观预报和预报员的主观预报(赵声蓉等, 2012), 48 h 内提供逐 3 h 降水量预报。由图 2a 可以看到, 逐 3 h 累积 10 mm 以上降水预报中, 16 个预报时效中大部分都是 EM_OTTS 具有更高的

TS 评分, 只有 5 个时效 GD 预报的 TS 评分大于等于 EM_OTTS。Bias 评分方面(图 2b), EM_OTTS 远远优于 GD 预报, 前者基本为 0.8~1.1, 后者则在 0.5~1.8 波动。可见, MOS_OTTS 在短期 3 h 强降水预报中, 具有很好的订正性能, 不仅超过其他几种客观预报方法, 与 GD 预报相比也具有一定优势。

4 临近 3 h 降水预报中超前空间实况因子的作用

4.1 临近 3 h 降水预报整体统计评分

降水属于不连续变量, 夏季与之相关的天气系统生命周期较短, 因此已经出现的实况降水对后期降水的预报指示时效比较短。在 MOS 预报中引入 OPTOR 因子后, 在 6 h 以后的较长预报时效(图 1), 反而造成预报性能的下降, EO、EO_OTTS 的预报性能比相应的 EM 和 EM_OTTS 预报略差。

但是对于临近 3 h 预报时效内的精细降水预报, OPTOR 因子的纳入显著提高了预报性能。考虑到临近 3 h 预报时效 OTS 订正方法可以明显提高 ED、EM 和 EO 的预报性能(图表略), 选择 ED_OTTS、EM_OTTS、EO_OTTS 预报, 与 GD 预报一起进行对比。图 3 表明, EO_OTTS 预报是几种预报中 TS 评分最高的, 3 h 累积 0.1、3、10 mm 以上降水量的 TS 评分分别为 0.294、0.188 和 0.105, 与原始 ED 预报的 TS 评分 0.170、0.063 和 0.018 相比(图表略), 分别提高了 73%、198% 和 483%。EM_OTTS 的 0.1 和 3 mm 以上 3 h 降水量的 TS 评分仅次于 EO_OTTS, 高于 GD 预报; 10 mm 以上降水的 TS 评分略低于 GD 预报。

EO_OTTS 临近 3 h 的 0.1、3 和 10 mm 以上降水的 Bias 评分分别为 1.13、1.07 和 0.8(图 3), 明显优于 ED_OTTS 和 GD 预报。EM_OTTS 的 Bias 评分与 EO_OTTS 接近, 更加靠近 1。进一步对比 EO_OTTS 和 EM_OTTS 的空报率和漏报率(图 4), 不论是 0.1、3 mm 还是 10 mm 以上降水, 不论是空报率还是漏报率, EO_OTTS 的评分都更优于 EM_OTTS, 具有更小的空报率和漏报率, 只有 10 mm 以上降水的漏报率两者基本相同。

因此认为, EO_OTTS 临近 3 h 降水预报在不同量级的总体性能, 均明显优于 EM_OTTS、GD 和 ED_OTTS 预报。

4.2 临近3 h降水预报逐日评分

为进一步了解 OPTOR 因子对于逐日临近3 h

降水预报的影响效果,将 EO_OTS、EM_OTS 和 GD 预报的逐日预报性能进行比较(图5)。针对2018年5月5日至9月30日EO_OTS有无降水预报

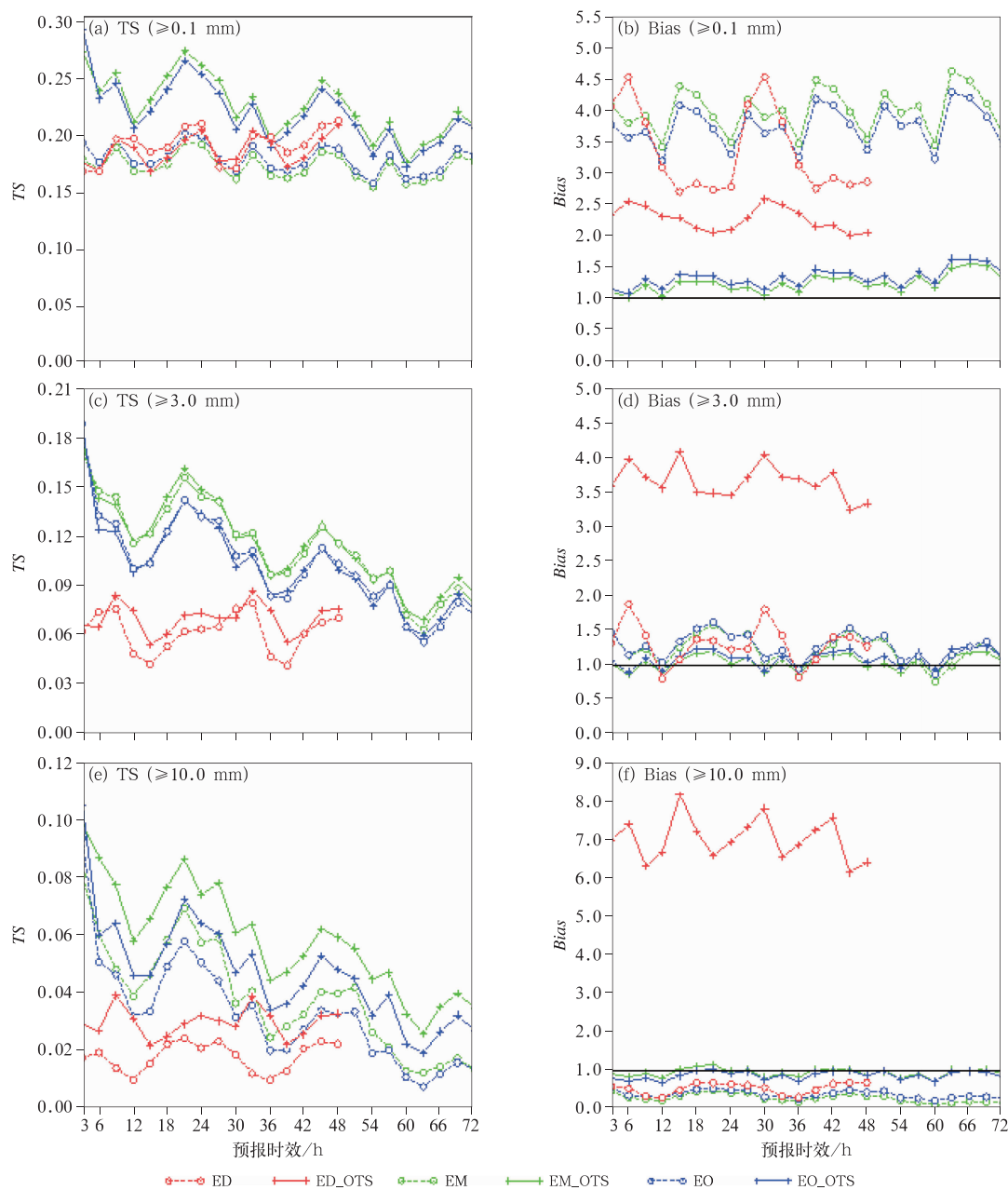


图1 2018年5月5日至9月30日08时起报的72 h内3 h累积0.1 mm(a,b),

3 mm(c,d),10 mm(e,f)以上降水的预报评分

(a,c,e)TS评分,(b,d,f)预报偏差(Bias)

(ED、EM、EO、ED_OTS、EM_OTS、EO_OTS 分别代表 ECWMF 模式的插值预报、

基于 ECMWF 预报的 MOS 预报、纳入超前空间实况因子的 OMOS 预报,以及相应的 OTS 订正预报)

Fig.1 Verification scores of 3 h precipitation forecast starting from 08:00 BT for three thresholds of 0.1 mm (a, b), 3 mm (c, d), and 10 mm (e, f) out to 72 h from 5 May to 30 September 2018

(a, c, e) TS scores, (b, d, f) Bias

[ED, EM, EO, ED_OTS, EM_OTS and EO_OTS respectively represent the original ECWMF DMO forecast, MOS, OMOS (with prior-spatial observation predictors) forecast and their respective OTS corrected forecasts]

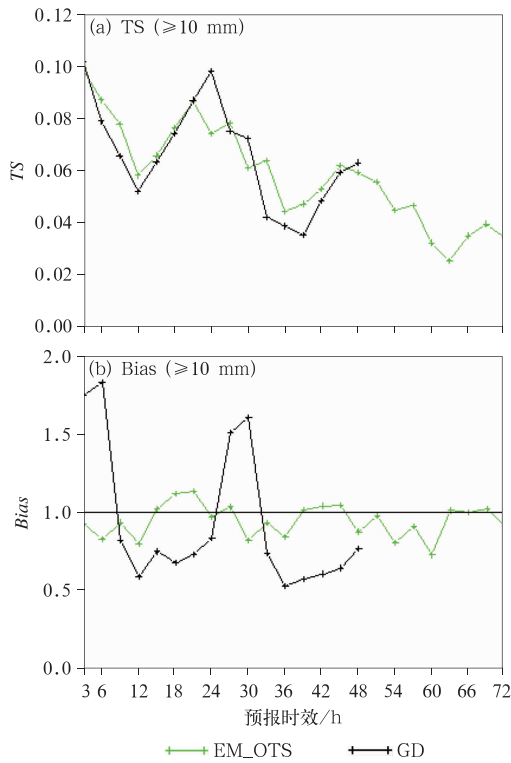


图 2 同图 1e, 1f, 但为 EM_OTS 与国家级站点指导报(GD)的强降水预报评分
Fig. 2 Same as in Figs. 1e and 1f, but for heavy precipitation forecast based on EM_OTS forecast and the guidance forecast (GD) of national stations

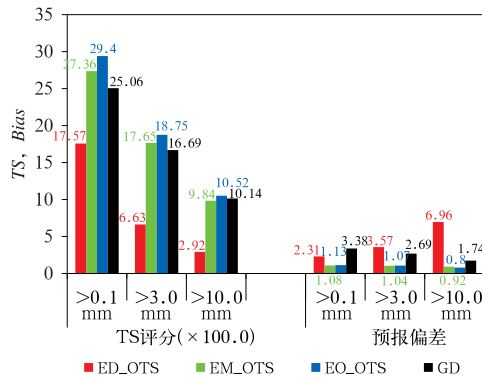


图 3 2018 年 5 月 5 日至 9 月 30 日 08 时起报的临近 3 h 降水量的不同量级以上累积降水预报的四种预报方法 TS 评分和预报偏差 (TS 评分扩大了 100 倍)

Fig. 3 TS and Bias scores of 3 h precipitation nowcasts starting from 08:00 BT by four different forecast methods and exceeding three thresholds of 0.1, 3.0 and 10.0 mm from 5 May to 30 September 2018 (TS score is multiplied by 100)

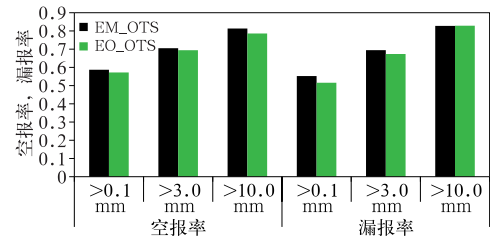


图 4 同图 3, 但为 EM_OTS 和 EO_OTS 预报的空报率和漏报率对比

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for comparison of false alarm rate and missing alarm rate by EM_OTS and EO_OTS

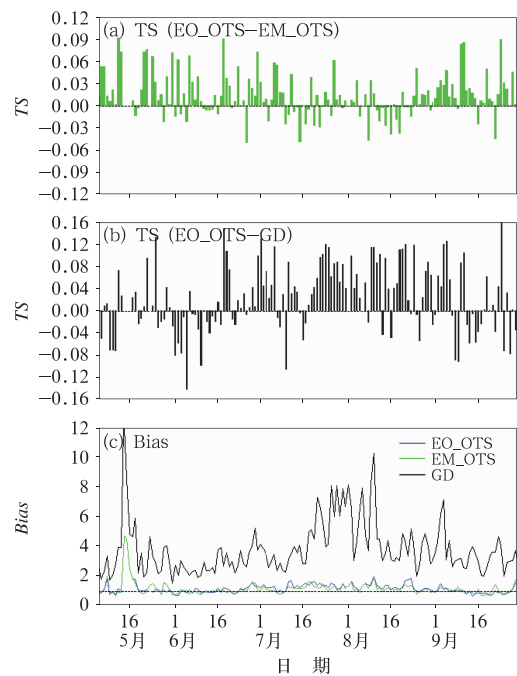


图 5 2018 年 5 月 5 日至 9 月 30 日 08 时起报的临近 3 h 降水量 EO_OTS、EM_OTS 和 GD 预报的逐日评分对比 (a) EO_OTS 与 EM_OTS 有无降水预报的 TS 评分差值, (b) EO_OTS 与 GD 预报有无降水预报逐日 TS 评分差值, (c) EO_OTS、EM_OTS、GD 有无降水预报的预报偏差

Fig. 5 Comparison of daily difference of EO_OTS 3 h precipitation nowcast starting from 08:00 BT with the forecast by EM_OTS and GD methods, for the differences of TS scores for exceeding 0.1 mm between EO_OTS and EM_OTS (a), between EO_OTS and GD (b), and their daily bias scores (c) from 5 May to 30 September 2018

的TS评分,分别计算了与EM_OTS及GD预报的TS评分的逐日差值(图5a、5b)。可以看到,大部分日期EO_OTS的TS评分相对于EM_OTS及GD预报都是正技巧,明显优于其他两种预报。

在临近3 h有无降水预报的预报偏差方面(图5c),GD预报明显偏多,Bias评分远大于1;EO_OTS和EM_OTS的Bias评分接近于1,尤其是前者几乎一直稳定在1附近,EM_OTS在5月中旬至下旬Bias评分出现偏大现象。

可见,在2018年5月5日至9月30日的逐日临近3 h预报中,TS评分和Bias评分都表明,EO_OTS有无降水预报性能的整体表现持续优于EM_OTS和GD预报,OPTOR因子的纳入使其具有稳定的预报优势。

5 结论和讨论

针对短期和临近3 h降水预报,对比分析了基于ECMWF模式的插值预报ED、MOS预报EM、纳入超前空间实况预报因子OPTOR的OMOS预报EO,以及在每种预报基础上进行最优TS阈值订正的ED_OTS、EM_OTS和EO_OTS预报六种方法的预报效果,其中OMOS预报是本文提出和改进的预报方法。得到以下结论:

(1)单独采取OTS方法对原始模式预报进行订正,通过调整阈值大幅增加了3和10 mm以上降水预报,一定程度上提高了TS评分,但同时使Bias评分明显增大;针对ECMWF模式有无降水预报偏多情况,OTS方法通过调整阈值明显减小了Bias评分,但没有改善TS评分效果,反而引起有无降水预报的TS评分降低。

(2)MOS预报方法可以整体上合理优化ECMWF降水预报分布,明显改进3 mm以上降水预报的TS和Bias评分,以及10 mm以上降水预报的TS评分,但对ECMWF模式有无降水预报Bias评分偏大问题没有改进。

(3)在MOS方法合理优化降水分布的基础上开展OTS订正,通过适当调整阈值,MOS-OTS预报方法无论是TS评分还是Bias评分,都显著提高了所有量级降水的预报性能;纳入OPTOR因子的OMOS-OTS方法显著提高了临近降水预报性能,0.1、3、10 mm以上降水的TS评分最高比ED预报分别提高73%、198%和483%,Bias评分接近于1。

(4)六种基于ECMWF模式的3 h降水预报方法,在短期各量级预报中MOS-OTS综合方法的预报性能最好,强降水预报效果与城镇指导预报GD中的主客观融合降水预报相比也略胜一筹。而在临近3 h各量级降水预报中则OMOS-OTS综合方法预报技巧最高,无论是TS、Bias评分,还是空报率和漏报率,EO_OTS预报都表现出最好的预报性能;而且,无论是整体统计评估,还是逐日有无降水预报对比,都表明OMOS-OTS方法的预报性能还明显优于GD预报。

本次研究中OPTOR因子只选取了1 h降水,如果选取云量作为OPTOR因子,可能会为降水预报提供更好的超前相关预报信息。另外,由于3 h降水尤其是10 mm以上的3 h降水的实际发生样本量少,导致部分站点MOS预报无法建模,OTS预报也缺乏足够训练样本,今后可以采取区域建模的方法增加降水样本。OPTOR因子的纳入,显著提高了基于ECMWF全球模式的OMOS临近3 h降水预报效果,应该是得益于滚动更新实况资料的临近“相关外推”效应,为滚动预报提供了一种有效方法,临近降水预报方面后续可以基于中尺度模式或者循环更新的对流尺度模式开展进一步试验。

参考文献

- 白永清,林春泽,陈正洪,等,2013. 基于LAPS分析的WRF模式逐时气温精细化预报释用[J]. 气象,39(4):460-465. Bai Y Q, Lin C Z, Chen Z H, et al, 2013. Product interpretation of refined hourly temperature based on the assimilation of WRF model in LAPS[J]. Meteor Mon, 39(4):460-465(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).
- 车钦,赵声蓉,范广洲,2011. 华北地区极端温度MOS预报的季节划分[J]. 应用气象学报,22(4):429-436. Che Q, Zhao S R, Fan G Z, 2011. Seasonal partition problem of MOS forecast for extreme temperature in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 22(4):429-436(in Chinese).
- 代刊,曹勇,钱奇峰,等,2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J]. 气象,42(12):1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short and medium range weather forecast[J]. Meteor Mon, 42(12):1445-1455(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).

- 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,2014.降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J].气象,40(5):580-588. Li J, Du J, Chen C J, 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction[J]. Meteor Mon, 40(5):580-588(in Chinese).
- 刘还珠,赵声蓉,陆志善,等,2004.国家气象中心气象要素的客观预报—MOS系统[J].应用气象学报,15(2):181-191. Liu H Z, Zhao S R, Lu Z S, et al, 2004. Objective element forecasts at NMC-a MOS system[J]. J Appl Meteor Sci, 15(2):181-191(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).
- 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).
- 赵声蓉,赵翠光,邵明轩,2009.事件概率回归估计与降水等级预报[J].应用气象学报,20(5):521-529. Zhao S R, Zhao C G, Shao M X, 2009. Regression estimate of event possibility and precipitation categorical forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5):521-529(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).
- Buizza R, Alonso-Balmaseda M, Brown A, et al, 2018. The development and evaluation process followed at ECMWF to upgrade the Integrated Forecasting System(IFS)[C]//The 47th Scientific Advisory Meeting. Reading:ECMWF.
- Carter G M, Dallavalle J P, Glahn H R, 1989. Statistical forecasts based on the National Meteorological Center's numerical weather prediction system[J]. Wea Forecasting, 4(3):401-412.
- Charba J P, Samplatsky F G, 2011. High-resolution GFS-based MOS quantitative precipitation forecasts on a 4-km grid[J]. Mon Wea Rev, 139(1):39-68.
- Chen M, Bica B, Tüchler L, et al, 2017. Statistically extrapolated nowcasting of summertime precipitation over the Eastern Alps[J]. Adv Atmos Sci, 34(7):925-938.
- Engel C, Ebert E E, 2012. Gridded operational consensus forecasts of 2 m temperature over Australia[J]. Wea Forecasting, 27(2):301-322.
- Glahn B, Gilbert K, Cosgrove R, et al, 2009. The gridding of MOS[J]. Wea Forecasting, 24(2):520-529.
- Glahn H R, Lowry D A, 1972. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting[J]. J Appl Meteor, 11(8):1203-1211.
- Glahn H R, Ruth D P, 2003. The new digital forecast database of the national weather service[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(2):195-202.
- Ruth D P, Glahn B, Dagostaro V, et al, 2009. The performance of MOS in the digital age[J]. Wea Forecasting, 24(2):504-519.
- Schmeits M J, Kok K J, Vogelesang D H P, et al, 2008. Probabilistic forecasts of (severe) thunderstorms for the purpose of issuing a weather alarm in the Netherlands[J]. Wea Forecasting, 23(6):1253-1267.
- Stauffer R, Umlauf N, Messner J W, et al, 2017. Ensemble postprocessing of daily precipitation sums over complex terrain using censored high-resolution standardized anomalies[J]. Mon Wea Rev, 145(3):955-969.
- Trepte S, Eckert M, Mahringer G, 2018. Using model output statistics for aerodrome weather forecasts[C]//Proceedings of 20th EGU General Assembly. Vienna:EGU.
- Vislocky R L, Fritsch J M, 1995. Improved model output and statistics through model consensus[J]. Bull Amer Meteor Soc, 76(7):1157-1164.
- 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.