

数值模式降水预报 OTS 订正法的实现技术研究

刘会军^{1,2,3} 吴启树^{1,2,3} 危国飞^{1,2,3} 韩美^{1,2,3} 潘宁^{1,2,3}

1 中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350028

2 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350028

3 福建省气象台, 福州 350028

摘要 本文以 ECMWF 模式插值到站点的逐 12 h 累积降水预报的订正试验为例, 以福建及周边共 4 个省(市)为研究区域, 详细介绍了福建省气象台在实现最优 TS 评分(Optimal Threat Score, OTS)订正法时引用或首创的三项技术, 并与同类技术进行对比。结果表明: 1) 用 3 年期准对称滑动窗口取样法采集训练样本计算 OTS 订正阈值, 其效果优于取之前 3 年的当季样本的取样方法; 2) OTS 订正阈值 F_1 (即消空阈值) 的大小与最高 2 m 温度密切相关, 随着温度升高, 消空阈值先变大后减小。相比不分组的方案, 基于最高 2 m 温度预报分组计算消空阈值的方案能同时降低小雨的空报率和漏报率, 使 ETS 评分提高 5.0%~8.2%; 3) 先用反距离加权插值法对模式降水预报进行插值, 再应用 OTS 订正法对降水预报进行订正, 其效果优于先用最邻近点插值法对模式降水预报进行插值, 再应用 OTS 订正法对降水预报进行订正。

关键词 模式降水 订正 OTS 实现

文章编号 中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.2115

Research on the Technology of Realizing OTS Correction Method for Numerical Model Precipitation Forecast

LIU Huijun^{1,2,3}, WU Qishu^{1,2,3}, WEI Guofei^{1,2,3}, HAN Mei^{1,2,3}, PAN Ning^{1,2,3}

1 China Meteorological Administration Straits Severe Weather Key Laboratory, Fuzhou 350028

2 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350028

3 Fujian Provincial Meteorological Observatory, Fuzhou 350028

收稿日期 2022-07-03; **网络预出版日期**

作者简介 刘会军, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事天气预报技术方法研究。E-mail: 21006262@zju.edu.cn

通讯作者 吴启树, E-mail: 172475076@qq.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1506905, 福建省自然科学基金项目 2021J01457、2022J011078, 福建省灾害天气重点实验室开放课题 2021KFKT05

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506905), Natural Science Foundation of Fujian (Grant 2021J01457 and 2022J011078), Open Project of Fujian Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2021KFKT05)

Abstract Taking the correction experiment of ECMWF model station forecast of 12 h cumulative precipitation as an example, taking Fujian, Jiangxi, Zhejiang and Shanghai as the research area, three technologies cited or initiated by Fujian when realizing the optimal threat score (OTS) correction method are introduced in detail, and compared with similar technologies. The results are summarized in the following points: 1) The 3-year quasi-symmetric sliding window sampling method is used to collect training samples to calculate the OTS correction threshold, and the effect is better than that of the sampling method of collecting the samples from the same season in the previous 3 years. 2) The magnitude of the OTS correction threshold F_1 (i.e. elimination threshold) is closely related to the magnitude of 2 m temperature. As the temperature rises, the elimination threshold first increases and then decreases. Compared with the modeling scheme without grouping, the grouping modeling based on the maximum 2 m temperature forecast can obtain the elimination threshold under different temperature conditions, which can simultaneously reduce the false alarm ratio and missing ratio of light rain, and improve the equitable threat score of light rain by 5.0%~8.2%. 3) The effect of the first scheme, which is to use the inverse distance weighted interpolation method to interpolate the model precipitation forecast, and then use the OTS correction method to correct the precipitation forecast, is better than that of the second scheme, which is to use the nearest neighbor interpolation method to interpolate the model precipitation forecast, and then use the OTS correction method to correct the precipitation forecast.

Keywords model precipitation, correction, OTS, realizing

1 引言

随着经济社会的快速发展和人民生活水平的不断提高, 公众、政府、水文、农业、交通等各个领域对于降水预报的要求越来越高, 需要气象部门提供高时空分辨率、高准确率的定量降水预报产品。因此, 如何逐步提高定量降水预报产品的时空分辨率和准确率是目前气象业务研究的重点和难点之一。毕宝贵等(2016)认为目前定量降水预报技术流程包括 5 个部分: (1) 数值模式预报产品, 这是定量降水预报技术的基础, 主导着整个定量降水预报技术的发展; (2) 天气学实时检验评估, 分析模式对于当前天气系统的预报误差并评估其预报能力; (3) 客观订正集成分析, 订正模式定量降水预报的系统误差; (4) 预报员主观订正, 根据概念模型、经验和检验评估, 订正预报偏差, 给出最有可能的预报结论; (5) 格点化处理技术, 获得高时空分辨率的定量降水预报。

随着数值模式的不断改进, 数值预报准确率不断得到提高(Ebert et al., 2003; Forbes et al., 2015), 使气象部门制作高时空分辨率、高准确率的定量降水预报产品成为可能。然而由于初始场误差和模式自身误差等因素, 数值模式预报产品存在一定随机性和系统性误差, 通过统计分析等方法对数值模式预报产品进行订正, 可以减少系统性误差, 提高预报准确率

(周兵等, 2006; 佟铃等, 2017; 危国飞等, 2020)。因此, 伴随着数值模式的发展, 科研人员也陆续研发了许多数值模式预报的统计后处理技术。1959 年美国国家气象局首先提出了用数值天气预报与统计天气预报相结合的完全预报方法 (Perfect Prognostic Method, 简称 PP 法) 来制作局地天气预报 (朱乾根等, 2000), 该方法根据长期的历史观测资料来推导预报量和预报因子的关系式, 而在制作预报时以数值预报结果作为预报因子代入预报关系式。PP 法的基础是假定模式输出与实测值是完全一致的。但实际上, 数值预报结果相对于实况是有误差的, 因此用模式输出作统计预报也必定相应地会产生误差。自 20 世纪 70 年代开始, 发展了数值模式输出统计方法 (Model Output Statistics Method, 简称 MOS 法) (Glahn and Lowry, 1972), 该方法是利用数值预报产品和历史观测资料来建立预报量和预报因子的关系式。MOS 法能自动地与局地天气匹配, 并考虑了数值模式的偏差和不确定性, 而且可以采用许多不易为 PP 法采用的因子, 如边界层风、垂直速度和散度等, 因此 MOS 法比 PP 法的应用更广泛 (朱乾根等, 2020)。多年来, 世界各国广泛使用 MOS 法来研制降水客观预报产品 (刘还珠等, 2004; Wilks and Hamill, 2007; 王启光等, 2011; 杨杰等, 2012; 郭渠等, 2017), 其预报性能较模式原始预报均有不同程度的提升。

在数值模式降水预报统计后处理技术中, 目标评分阈值订正方法也十分常用, 例如频率匹配法、最优 TS 评分订正法等。频率匹配法以降水预报订正结果的频率分布偏差达到最优为目标, 利用观测降水量的频率分布校正预报降水量的频率分布。李俊等 (2015) 用频率匹配法对 AREM 模式降水预报进行了订正, Zhu 等 (2015) 用频率匹配法对 NCEP 的全球确定性预报模式和集合预报模式的定量降水预报进行了订正, 智协飞和吕游 (2019) 用频率匹配法对 TIGGE 资料中 ECMWF、JMA、UKMO、NCEP 四个中心全球集合预报模式的降水预报进行了订正, 均发现订正后降水落区的面积偏差显著减小, 轮廓和位置也更接近实况。吴启树等 (2017) 以降水预报订正结果的 TS 评分达到最优为目标设计了最优 TS 评分 (Optimal Threat Score, 简称 OTS) 订正法, 用该方法对 ECMWF、JMA、NCEP、T639 四家全球确定性预报模式的定量降水预报进行了订正, 订正结果的 TS 评分在所有预报时效均优于模式原始预报。福建省气象局应用 OTS 订正法参加 2019 年第一届全国智能预报技术方法交流大赛, 逐 24 h、逐 3 h、逐 1 h 的晴雨准确率技巧均排名全国第一, 参加 2021 年第二届全国智能预报技术方法交流大赛, 降水项目综合成绩获得全国第一, 优异的成绩表明 OTS 订正法具有很好的先进性和稳定性。

OTS 订正法设计理念简单、易实现且订正效果较好, 得到全国气象部门的广泛应用 (赵瑞霞等, 2020; 范江琳等, 2022; 刘段灵和陈超, 2022), 但不同部门间的订正效果却有较

大差别，其主要原因是将 OTS 订正法转换成计算机程序时，不同部门在诸如插值方法、训练样本采集方法、消空阈值计算方法等方面采用了不同的技术。福建省气象局研发团队自 2017 年提出 OTS 订正法以来，经过多年的实践与探索，形成了一套较成熟的 OTS 订正法的实现技术，每项技术的应用都使订正效果有所提升，这些技术的综合应用可使最终的订正效果得到明显提升。本文将重点介绍其中的三项技术，可为正在应用或打算应用 OTS 订正法的气象部门提供参考，亦可为其他降水预报订正方法的实现提供参考。

2 资料与方法

2.1 预报资料

所用预报资料为中国气象局下发的欧洲中期天气预报中心（European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）确定性预报模式输出场，所用预报要素为逐 12 h 累积降水和最高 2 m 温度，空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ，预报时效为 0~84 h，起报时次为 08:00 和 20:00（北京时间），时间长度为 2015~2019 年。本文是基于站点实况进行统计建模和检验，因此需要把数值预报的格点场插值到站点。ECMWF 模式降水预报产品，经反距离加权插值法插值后的产品简称为 EC_IDW（Inverse Distance Weighted），经最邻近点插值法插值后的产品简称为 EC_NN（Nearest Neighbor）。

2.2 观测资料

本文的研究区域为福建、江西、浙江和上海三省一市所组成的区域，所用观测资料为研究区域内 235 个国家地面气象观测站 2015~2019 年逐 12 h 的降水观测资料。

2.3 OTS 订正法

吴启树等（2017）基于模式降水预报订正结果的 TS 评分最优化设计了 OTS 订正法，该方法的公式如下：

$$y = \begin{cases} 0, & x < F_1; \\ O_k + (O_{k+1} - O_k) \times \frac{x - F_k}{F_{k+1} - F_k}, & F_k \leq x < F_{k+1} (k = 1, 2, \dots, N-1); \\ x \times \left(\frac{O_N}{F_N} \right), & x \geq F_N \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 和 y 为任一站点或格点的模式降水量原始预报值和订正值； $O_1 \sim O_N$ 为 N 个预先设定的降水阈值，本文 N 取 10， $O_1 \sim O_{10}$ 分别设为 0.1, 1, 5, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 100 mm，其中 0.1、10、25、50、100 mm 分别是小雨（按 24 小时降雨强度划分，下同）、中雨、

大雨、暴雨和大暴雨的下限，而穿插在他们之间的降水阈值 1、5、16、35、70 是参考了孙靖等（2015）的文献设计的。 F_k 为原始预报值订正到 O_k 时，该量级对应的模式降水量预报值。当原始预报 x 小于 F_1 时，订正预报 y 为 0，称作消空订正， F_1 亦可称作消空阈值。训练过程中调整 F_k ，使 O_k 量级以上累加降水的 TS 评分达到最高时求得。

2.4 检验方法

本文采用国内气象业务常用的定量降水预报的检验指标 TS 评分（Threat Score，记作 TS ）、ETS 评分（Equitable Threat Score，记作 ETS ）、空报率（False Alarm Ratio，记作 FAR ）、漏报率（Missing Ratio， MR ）、Bias 评分（Bias Score， BS ），对 ECMWF 模式原始降水预报产品及其订正产品的逐 12 h 累积降水预报进行分级检验。TS 评分用来衡量降水落区的准确性，TS 评分越高，降水落区越准确。ETS 评分是对 TS 评分的改进，能对空报或漏报进行惩罚，使评分相对后者更加公平。Bias 评分为预报事件的发生频率，Bias 评分大于 1.0 表示预报过度，空报次数多于漏报次数；Bias 评分小于 1.0 表示预报不足，漏报次数多于空报次数。

表 1 降水量观测与预报二分类列联表

Table 1 Two-category contingency table for observed precipitation and forecasted precipitation

预报	观测		总计
	是	否	
是	命中 (N_A)	误报 (N_B)	预报“是”的总数
否	漏报 (N_C)	命中“否”的频次 (N_D)	预报“否”的总数
总计	观测“是”的总数	观测“否”的总数	总数

TS 、 ETS 、 FAR 、 MR 和 BS 的计算公式如下：

$$TS = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (2)$$

$$\begin{cases} e = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{N_A + N_B + N_C + N_D} \\ ETS = \frac{N_A - e}{N_A + N_B + N_C - e} \end{cases} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{N_B}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (4)$$

$$MR = \frac{N_C}{N_A + N_C} \times 100\% \quad (5)$$

$$BS = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \quad (6)$$

式 (2) ~ (6) 中, N_A 、 N_B 、 N_C 、 N_D 的含义见表 1。

3 训练样本采集方法优选

OTS 订正法的订正阈值 F_k 是通过采集一定的训练样本计算得到的, 训练样本的采集好坏对 OTS 订正法的订正效果影响很大。常用的训练样本采集方法有取之前若干年的样本、取之前若干年的当季样本、持续滑动窗口取样法、准对称滑动窗口取样法 (吴启树等, 2016) 等。经过对比检验, 福建采用 3 年期准对称滑动窗口取样法采集训练样本, 即取预报日之前最近可用的 N_d 和前 1 年预报日及其之后的 N_d 、前 1 年预报日之前的 N_d 和前 2 年预报日及其之后的 N_d 、前 2 年预报日之前的 N_d 和前 3 年预报日及其之后的 N_d 组合而成的样本作为训练样本。经测试滑动日数 N 取 45 左右相对最优。本文重点给出了取之前若干年的当季样本的取样方法和准对称滑动窗口取样法的对比检验结果。采用取之前 3 年的当季样本的取样方法和 3 年期准对称滑动窗口取样法选取训练样本计算 OTS 订正阈值, 对 EC_IDW 逐 12 h 累积降水预报进行 OTS 订正, 订正后的降水预报产品分别简称为 EC_IDW_OTS_QSSW (Quasi-Symmetrical Sliding Window) 和 EC_IDW_OTS_SFSS (Samples From the Same Season)。

图 1-3 分别给出了 2018~2019 年 EC_NN、EC_IDW_OTS_SFSS 和 EC_IDW_OTS_QSSW 在 24~84 h 预报时效, 小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的 ETS 评分、空报率和漏报率。EC_NN 的预报成绩可以表征 ECMWF 模式原始降水预报的成绩。从 ETS 评分来看 (图 1), 除了中雨量级的 48~84 h 预报时效外, EC_IDW_OTS_SFSS 和 EC_IDW_OTS_QSSW 均明显高于 EC_NN。EC_IDW_OTS_QSSW 在多数预报时效 (尤其 24~48 h) 高于 EC_IDW_OTS_SFSS 或基本相当。

从空报率 (图 2) 和漏报率 (图 3) 来看, 对于小雨量级, EC_NN 的空报率在 49% 以上, 显著大于漏报率 (15%~20%), 空报问题相对突出。经过订正, EC_IDW_OTS_SFSS 和 EC_IDW_OTS_QSSW 的空报率明显降低, 虽然同时漏报率增大, 但因消空订正减少的空报站次远大于增加的漏报站次, 如 EC_IDW_OTS_QSSW 相比 EC_NN 在 24 h 预报时效减少空报站次 30933 次, 增加漏报站次 8990 次, 其他预报时效结论类似。EC_IDW_OTS_QSSW 在 24~84 h 预报时效空报率均小于 EC_IDW_OTS_SFSS, 同时其漏报率在 36 h、48 h 和 84 h 预报时效也小于或等于 EC_IDW_OTS_SFSS, 从小雨量级看 EC_IDW_OTS_QSSW 更优。对于中雨量级, 在 24 h 和 36 h 预报时效 EC_IDW_OTS_QSSW 比 EC_IDW_OTS_SFSS 空报率和漏报率都更小, 订正效果更好; 在其他预报时效这两种方案对中雨的订正能力都有限。对于大雨和暴雨量级, EC_IDW_OTS_SFSS 和 EC_IDW_OTS_QSSW 相比 EC_NN 漏报率均

减小，尤其大雨漏报率减小的幅度远大于空报率增加的幅度，虽然大雨和暴雨的空报率有所增加，但最终 ETS 评分提高，这有利于强降水的预报服务工作。从空报率和漏报率看两种采集训练样本的方法对大雨和暴雨的订正效果相差不大。

总的来看，OTS 订正法对 EC_NN 有较好的订正效果，且 EC_IDW_OTS_QSSW 的预报效果优于 EC_IDW_OTS_SFSS，即 3 年期准对称滑动窗口取样法的应用效果优于取之前 3 年的当季样本的取样方法。

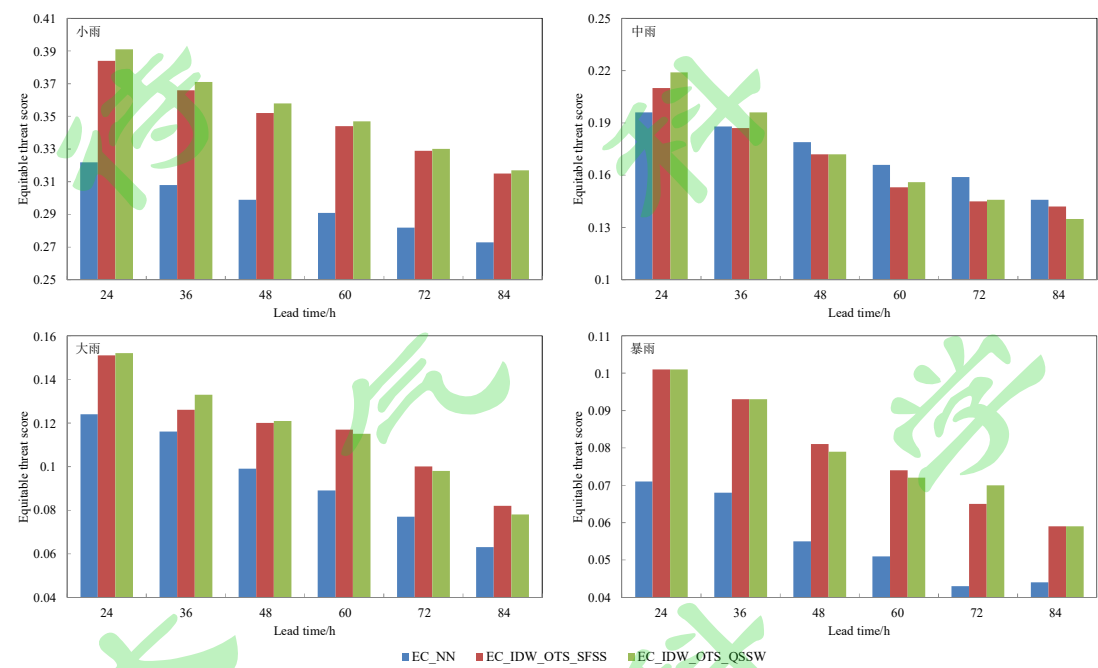


图1 2018~2019 年 EC_NN、EC_IDW_OTS_SFSS 和 EC_IDW_OTS_QSSW 在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的 ETS 评分

Fig. 1 Equitable threat score of EC_NN, EC_IDW_OTS_SFSS and EC_IDW_OTS_QSSW for light, moderate, heavy and hard rain from 2018 to 2019

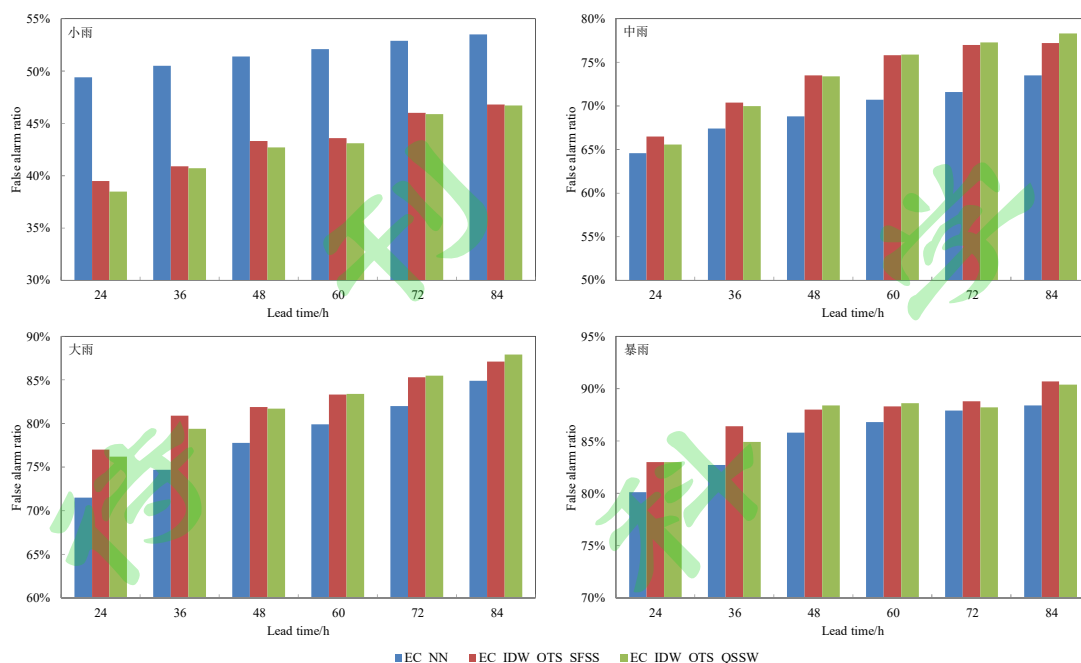


图2 2018~2019年EC_NN、EC_IDW_OTS_SFSS和EC_IDW_OTS_QSSW在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的空报率

Fig. 2 False alarm ratio of EC_NN, EC_IDW_OTS_SFSS and EC_IDW_OTS_QSSW for light, moderate, heavy and hard rain from 2018 to 2019

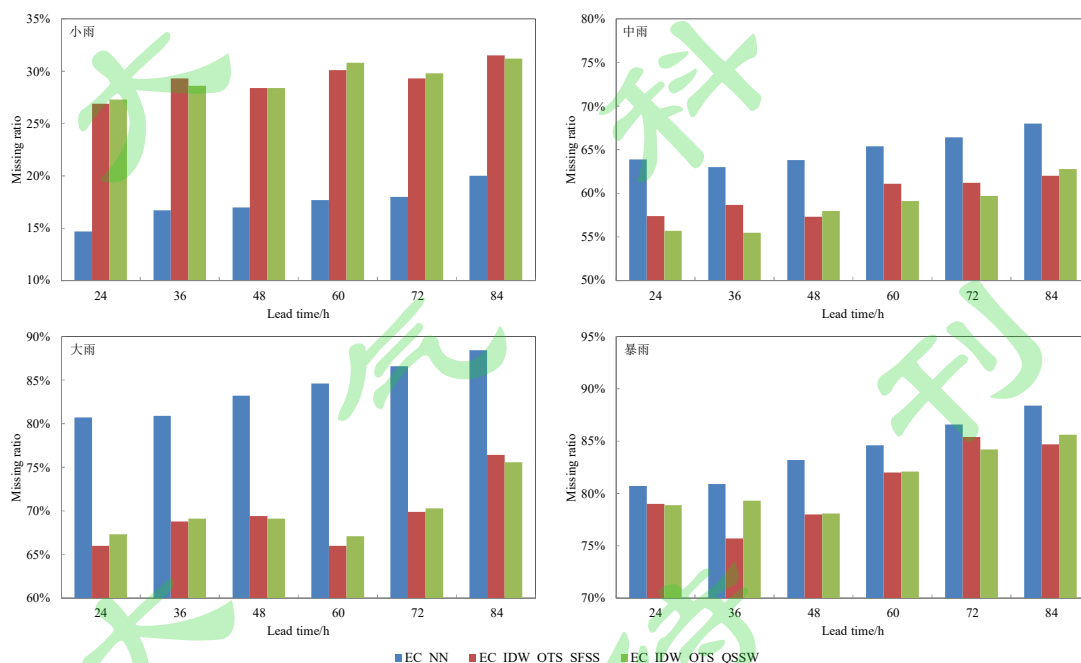


图3 2018~2019年EC_NN、EC_IDW_OTS_SFSS和EC_IDW_OTS_QSSW在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的漏报率

Fig. 3 Missing ratio of EC_NN, EC_IDW_OTS_SFSS and EC_IDW_OTS_QSSW for light, moderate, heavy and

4 基于模式最高 2 m 温度预报分组计算不同温度条件下的消空阈值

分析发现 EC_IDW 在 24 h 预报时效 ≥ 0.1 mm 量级降水的 Bias 评分随最高 2 m 温度预报的升高呈升高趋势（图 4），这种趋势在其他预报时效和 EC_NN 产品也有体现（图略），可见随着最高 2 m 温度升高，降水空报现象越来越严重，其原因尚不清楚，推测可能与 ECMWF 模式云微物理方案和对流参数化方案有关。要进一步提高 ECMWF 模式订正产品的小雨的准确率，需要研究不同温度条件下的降水消空问题。把 2018~2019 年所有 EC_IDW 24 h 预报时效的 12 h 累积降水预报样本，按照 12~24 h 预报时效内的最高 2 m 温度预报（四舍五入，下同）分组，其中大于等于 33 °C 的样本组成 33 °C 组，小于等于 4 °C 的样本组成 4 °C 组，其余样本逐度分组，共分 30 组。计算每一组样本的消空阈值 F_1 ，图 4 给出了 F_1 随最高 2 m 温度预报的变化，在 4~29 °C 内 F_1 随温度升高而增大（相关系数 0.79），在 29~33 °C 内 F_1 随温度升高而减小（相关系数 -0.92）。其他预报时效和其他年份也有类似特征，可见 ECMWF 模式降水预报消空阈值的大小与最高 2 m 温度预报密切相关。

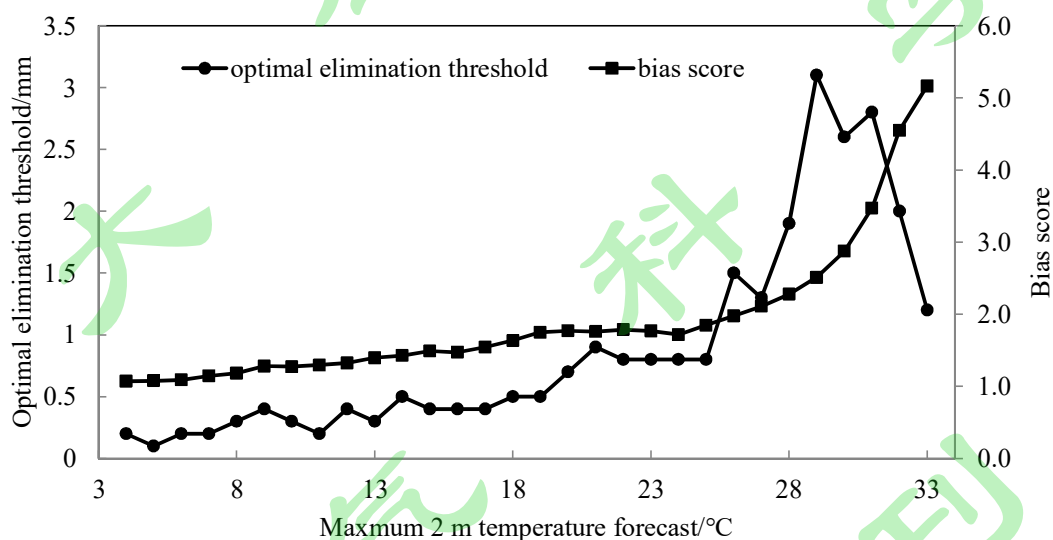


图 4 2018~2019 年 EC_IDW 在 24 h 预报时效 ≥ 0.1 mm 量级降水的 Bias 评分和 OTS 消空阈值随最高 2 m 温度预报的变化

Fig. 4 Variation of the bias score of EC_IDW for ≥ 0.1 mm and OTS elimination threshold at 24 h with the maximum 2 m temperature forecast from 2018 to 2019

由以上分析可知，基于 ECMWF 模式最高 2 m 温度预报分组计算不同温度条件下的消空阈值 F_1 ，应该可以在 EC_IDW_OTSSW 的基础上进一步提高小雨预报成绩。设计了以下方案：先采用 3 年期准对称滑动窗口取样法采集训练样本，再基于 ECMWF 模式最高 2

m 温度预报对训练样本进行分组，最高 2 m 温度预报在 $[T-X, T+X]$ 范围内的样本分成一组，来计算最高 2 m 温度预报为 T 时的消空阈值 F_1 ，遍历 T 可以得到不同温度条件下的消空阈值 F_1 ，参数 X 经过试验在本文研究区域内取 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 比较合适。基于模式最高 2 m 温度预报分组计算消空阈值 F_1 ，其他 OTS 订正阈值的计算方法不变，对 EC_IDW (EC_NN) 逐 12 h 累积降水预报进行 OTS 订正，订正后的降水预报产品简称为 EC_IDW_OTSSW2 (EC_NN_OTSSW2)。

图 5 给出了 2018~2019 年 EC_IDW_OTSSW 和 EC_IDW_OTSSW2 在 24~84 h 预报时效小雨的 ETS 评分、空报率和漏报率，可以看出，在所有预报时效，EC_IDW_OTSSW2 的 ETS 评分均高于 EC_IDW_OTSSW，约提高了 5.0%~8.2%，空报率和漏报率均低于 EC_IDW_OTSSW，空报率约降低了 1.2~2.4 个百分点，漏报率约降低了 1.4~2.8 个百分点，说明基于 ECMWF 模式最高 2 m 温度预报分组计算消空阈值的方案，可以在 EC_IDW_OTSSW 的基础上进一步提高小雨预报成绩。试验了基于 ECMWF 模式最低 2 m 温度预报和平均 2 m 温度预报分组计算消空阈值的方案，应用效果都不如基于 ECMWF 模式最高 2 m 温度预报。除了消空阈值 F_1 外，也试验了基于 ECMWF 模式最高 2 m 温度预报分组计算其他 OTS 订正阈值 ($F_2\sim F_{10}$)，结果只有 F_2 有改进效果（图表略）。

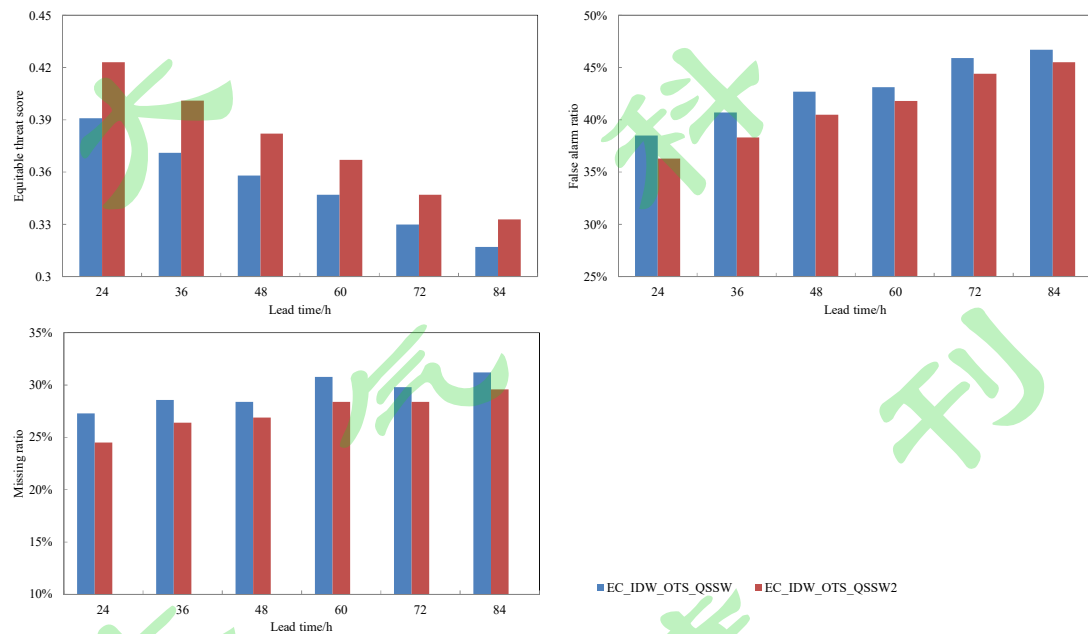


图 5 2018~2019 年 EC_IDW_OTSSW 和 EC_IDW_OTSSW2 在小雨量级的 ETS 评分、空报率和漏报率

Fig. 5 Equitable threat score, false alarm ratio and missing ratio of EC_IDW_OTSSW and EC_IDW_OTSSW2 for light rain from 2018 to 2019

5 插值方法优选

对数值模式站点降水预报进行 OTS 订正, 首先要把数值模式的格点预报场插值到站点, 不同的插值方法对 OTS 订正法的订正效果影响很大。常用的插值方法有最邻近点插值法、双线性插值法、反距离加权插值法等。经过对比检验, 福建业务上先采用反距离加权插值法把数值模式的格点降水预报场插值到站点, 然后再进行订正。插值公式如下:

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{kij} P_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{kij}} \quad (7)$$

式 (7) 中 P_k 为第 k 个站点经插值得到的降水量预报, P_{ij} 为格点 (i, j) 的降水量预报, W_{kij} 为权重因子, m 、 n 分别为格点场在纬向、经向的格点数, 本文使用的权重因子可用下式来表示:

$$W_{kij} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_{kij}^2}{R^2 + d_{kij}^2}, & \text{当 } d_{kij} < R \\ 0, & \text{当 } d_{kij} \geq R \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中 R 为有效影响半径, d_{kij} 为格点 (i, j) 到站点 k 的距离。经测试 R 取 100 km 左右相对最优。

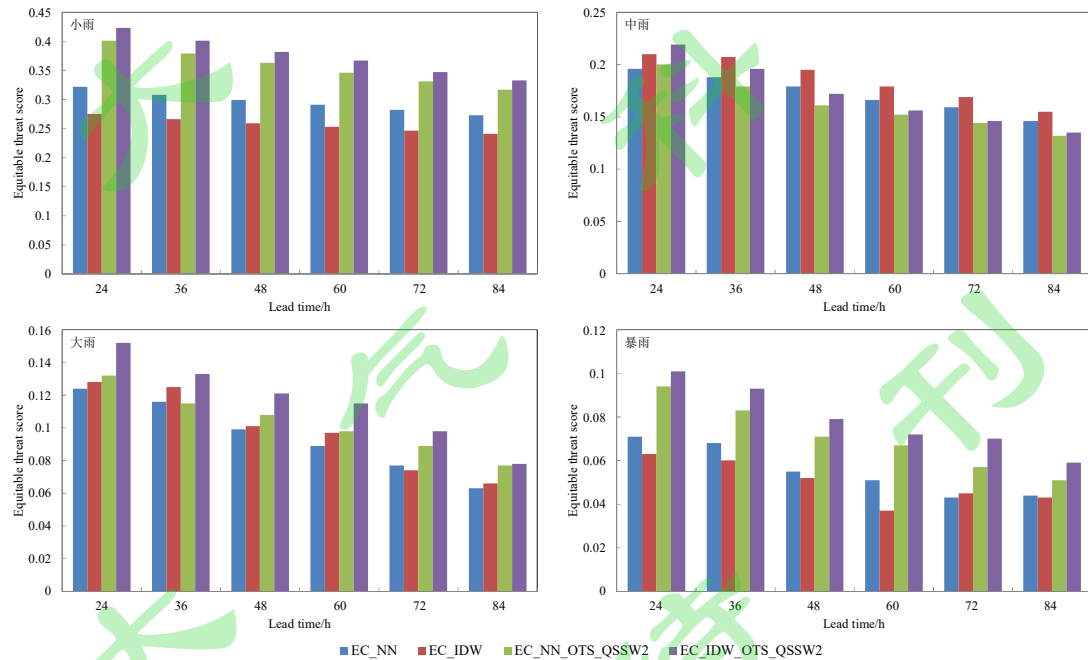


图 6 2018~2019 年 EC_NN、EC_IDW、EC_NN_OTS_QSSW2 和 EC_IDW_OTS_QSSW2 在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的 ETS 评分

Fig. 6 Equitable threat score of EC_NN, EC_IDW, EC_NN_OTS_QSSW2 and EC_IDW_OTS_QSSW2 for light,

moderate, heavy and hard rain from 2018 to 2019

本文重点给出了最邻近点插值法和反距离加权插值法的对比检验结果。图 6 给出了 2018~2019 年 EC_NN、EC_IDW、EC_NN_OTS_QSSW2 和 EC_IDW_OTS_QSSW2 在 24~84 h 预报时效，小雨、中雨、大雨和暴雨四个降水量级的 ETS 评分，可以看出，对于小雨和暴雨，经最邻近点插值法插值得到的降水预报产品 EC_NN 的 ETS 评分高于经反距离加权插值法插值得到的降水预报产品 EC_IDW，两者经过 OTS 方法订正后 ETS 评分明显提高，且 EC_IDW_OTS_QSSW2 的 ETS 评分相对更高。对于大雨，EC_IDW 的 ETS 评分基本都高于 EC_NN，两者经过 OTS 方法订正后 ETS 评分明显提高，也是 EC_IDW_OTS_QSSW2 的 ETS 评分相对更高。对于中雨，EC_IDW 的 ETS 评分高于 EC_NN，两者经过 OTS 方法订正后，ETS 评分除了 24 h 预报时效外均未有提升，但 EC_IDW_OTS_QSSW2 的 ETS 评分仍高于 EC_NN_OTS_QSSW2。总的来看，先采用反距离加权插值法对数值模式预报要素进行插值，再对降水预报进行 OTS 订正，其订正效果优于先采用最邻近点插值法对数值模式预报要素进行插值，再对降水预报进行 OTS 订正，其中小雨、中雨、大雨和暴雨四个降水量级的 ETS 评分前者较后者分别提高了 4.8%~6.1%、1.4%~9.5%、1.3%~17.3%和 7.4%~22.8%。

6 结论与讨论

本文以 ECMWF 模式插值到站点的逐 12 h 累积降水预报的订正试验为例，详细介绍了福建省气象台在实现 OTS 订正法时引用或首创的三项技术：用准对称滑动窗口取样法采集训练样本、基于模式最高 2 m 温度预报分组计算不同温度条件下的消空阈值、用反距离加权插值法把数值模式的格点降水预报场插值到站点，每项技术的应用都使订正效果有所提升，这些技术的综合应用可使最终的订正效果得到明显提升。主要结论和讨论如下：

(1) 对于小雨量级，OTS 订正法通过降低空报率来提高 ETS 评分，对于大雨及以上量级，OTS 订正法主要通过降低漏报率提高 ETS 评分，但空报率会有所加大。采用 3 年期准对称滑动窗口取样法采集训练样本计算 OTS 订正阈值的效果，优于取之前 3 年的当季样本的取样方法。

(2) OTS 订正阈值 F_1 (即消空阈值) 的大小与最高 2 m 温度密切相关，随着温度升高，消空阈值先变大后又减小。相比不分组的方案，基于最高 2 m 温度预报分组计算消空阈值的方案能同时降低小雨的空报率和漏报率，提高小雨的 ETS 评分，其中空报率降低了 1.2~2.4 个百分点，漏报率降低了 1.4~2.8 个百分点，ETS 评分提高了 5.0%~8.2%。

(3) 先采用反距离加权插值法对数值模式预报要素进行插值，再应用 OTS 订正法对降水预报进行订正，其效果优于先采用最邻近点插值法对数值模式预报要素进行插值，再应用

OTS 订正法对降水预报进行订正, 其中小雨、中雨、大雨和暴雨四个降水量级的 ETS 评分前者较后者分别提高了 4.8%~6.1%、1.4%~9.5%、1.3%~17.3%和 7.4%~22.8%。

本文通过逐 12 h 的站点降水预报的订正试验来展示福建省气象台在实现 OTS 订正法时引用或首创的三项技术, 在实际业务中, 这些技术亦可应用于订正不同时间、空间分辨率的站点降水预报和网格降水预报。在应用 OTS 订正法时, 若对文中提到的一系列参数进行本地化调整可以得到更好的应用效果。在对多家数值模式的降水预报产品进行 OTS 订正的基础上进行多模式(最好是包含全球模式和区域中尺度模式)降水分级最优化权重集成, 可进一步提升降水客观预报产品的性能, 尤其是大量级降水的预报性能, 目前福建已取得了一些研究成果(危国飞等, 2020)。

参考文献 (References)

- 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 Baogui, Dai Kang, Wang Yi, et al. 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 27(5): 534-549.
- Ebert E E, Damrath U, Wergen W, et al. 2003. The WGENE assessment of short-term quantitative precipitation forecasts [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84: 481-492.
- 范江琳, 陈朝平, 曹萍萍, 等. 2022. 四川地区 ECWMF 模式晴雨预报订正试验研究[J]. 暴雨灾害, 41(1): 58-65. Fan Jianglin, Chen Chaoping, Cao Pingping, et al. 2022. Experimental study on revision of ECWMF clear-rainy forecast in Sichuan region [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 41(1): 58-65.
- Forbes R, Haiden T, Magnusson L. 2015. Improvements in IFS forecasts of heavy precipitation [J]. ECMWF Newsletter, 144: 21-26.
- 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.
- 郭渠, 刘向文, 吴统文, 等. 2017. 基于 BCC_CSM 模式的中国东部夏季降水预测检验及订正[J]. 大气科学, 41(1): 71-90. Guo Qu, Liu Xiangwen, Wu Tongwen, et al. 2017. Verification and correction of East China summer rainfall prediction based on BCC_CSM [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(1): 71-90.
- 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 Jun, Du Jun, Chen Chaojun. 2015. Applications of “frequency-matching” method to ensemble precipitation forecasts [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41(6): 674-684.
- 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 Huangzhu, Zhao Shengrong, Lu Zhishan, et al. 2004. Objective element forecasts at NMC-a MOS system [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 15(2): 181-191.
- 刘段灵, 陈超. 2022. 最优 TS 评分方法在逐时降水订正中的初步应用及评估[J]. 热带气象学报, 38(4): 611-620. Liu Duanling, Chen Chao. 2022. Preliminary application and evaluation of optimal threat score method in hourly precipitation forecast [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 38(4): 611-620.
- 孙靖, 程光光, 张小玲. 2015. 一种改进的数值预报降水偏差订正方法及应用[J]. 应用气象学报, 26(2): 173-184. Sun Jing, Cheng Guangguang, Zhang Xiaoling. 2015. An improved bias removed method for precipitation prediction and its application [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 26(2): 173-184.
- 佟铃, 彭新东, 范广州, 等. 2017. GRAPES 全球模式的误差评估和订正[J]. 大气科学, 41(2): 333-344. Tong Ling, Peng Xindong, Fan Guangzhou, et al. 2017. Error evaluation and correction for GRAPES global forecasts [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2): 333-344.
- 王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究[J]. 大气科学, 35(2): 287-297.

- Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. A study of the objective and quantifiable forecasting based on optimal factors combinations in precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(2): 287-297.
- 危国飞, 刘会军, 吴启树, 等. 2020. 多模式降水分级最优化权重集成预报技术[J]. 应用气象学报, 31(6): 668-680. Wei Guofei, Liu Huijun, Wu QiShu, et al. Multi-model consensus forecasting technology with optimal weight for precipitation intensity levels [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 31(6): 668-680.
- Wilks D S, Hamill T M. 2007. Comparison of ensemble-MOS methods using GFS reforecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 135(6): 2379-2390.
- 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 Qishu, Han Mei, Guo Hong, et al. The optimal training period scheme of MOS temperature forecast [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 27(4): 426-434.
- 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 Qishu, Han Mei, Liu Ming, et al. 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(3): 306-317.
- 杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 等. 2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验[J]. 大气科学, 36(1): 11-22. Yang Jie, Zhao Junhu, Zheng Zhihai, et al. 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on the basis of prophase key factors in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 36(1): 11-22.
- 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[J]. 气象, 46(3): 420-428. Zhao Ruixia, Dai Kan, Jin Ronghua, 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. (in Chinese), 46(3): 420-428.
- 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 Xiefei, Lyu You. 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method [J]. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(6): 814-823.
- 周兵, 赵翠光, 赵声蓉. 2006. 多模式集合预报技术及其分析与检验[J]. 应用气象学报, 17(s1): 104-109. Zhou Bing, Zhao Cui Guang, Zhao Shengrong. Multi-model ensemble forecast technology with analysis and verification of the results [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17(S1): 104-109.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 649. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 649.
- Zhu Y J, Luo Y. 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method [J]. Wea. Forecasting, 30(5): 1109-1124.