

## 数值模式降水预报OTS订正法的实现技术

刘会军 吴启树 危国飞 韩美 潘宁

### Implement Technology of Optimal Threat Score Correction Method for Numerical Model Precipitation Forecast

LIU Huijun WU Qishu WEI Guofei HAN Mei PAN Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22115>

#### 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

##### 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用

Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application

大气科学. 2021, 45(1): 195 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237>

##### 未来30年亚洲降水情景预估及偏差订正

Projection of Asian Precipitation for the Coming 30 Years and Its Bias Correction

大气科学. 2022, 46(1): 40 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20241>

##### 世纪前期中国降水预估及其订正

Projection of China Precipitation and Its Bias Correction for the Early 21st Century

大气科学. 2019, 43(6): 1385 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18221>

##### 基于累加气候概率的FSS检验方法对多模式短时暴雨预报的评估

Forecast Evaluation of Short-Term Heavy Precipitation from Operational Models by the Fractions Skill Score Method Based on the Cumulative Climatological Probability

大气科学. 2024, 48(4): 1478 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22175>

##### 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验

Scale Sensitivity Experiments of Precipitation Neighborhood Ensemble Probability Method

大气科学. 2020, 44(2): 282 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228>

##### 冬奥会复杂山地百米尺度10 m风速预报的机器学习订正对比试验

Comparative Machine Learning-Based Correction Experiment for a 10 m Wind Speed Forecast at a 100 m Resolution in Complex Mountainous Areas of the Winter Olympic Games

大气科学. 2023, 47(3): 805 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22117>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



刘会军, 吴启树, 危国飞, 等. 2024. 数值模式降水预报 OTS 订正法的实现技术 [J]. 大气科学, 48(5): 1891–1900. LIU Huijun, WU Qishu, WEI Guofei, et al. 2024. Implement Technology of Optimal Threat Score Correction Method for Numerical Model Precipitation Forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(5): 1891–1900. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22115

## 数值模式降水预报 OTS 订正法的实现技术

刘会军<sup>1,2,3</sup> 吴启树<sup>1,2,3</sup> 危国飞<sup>1,2,3</sup> 韩美<sup>1,2,3</sup> 潘宁<sup>1,2,3</sup>

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 模式的逐 12 h 累计降水预报的订正试验为例, 以福建、江西、浙江和上海为研究区域, 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 (Optimal Threat Score) 实现

文章编号 1006-9895(2024)05-1891-10

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22115

## Implement Technology of Optimal Threat Score Correction Method for Numerical Model Precipitation Forecast

LIU Huijun<sup>1,2,3</sup>, WU Qishu<sup>1,2,3</sup>, WEI Guofei<sup>1,2,3</sup>, HAN Mei<sup>1,2,3</sup>, and PAN Ning<sup>1,2,3</sup>

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

2 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350028

3 Fujian Provincial Meteorological Observatory, Fuzhou 350028

**Abstract** This study focuses on enhancing the accuracy of 12-h cumulative precipitation forecasts from the model derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts using Fujian, Jiangxi, Zhejiang, and Shanghai as the research areas. It introduces three technologies either cited or initiated by Fujian to implement the OTS (Optimal Threat Score) correction method and compares them with similar technologies. Results are summarized in the following points: (1) A 3-year quasi-symmetric sliding window sampling method was used to collect training samples for calculating the OTS correction threshold. This approach proved to be more effective than collecting samples from the

收稿日期 2022-07-03; 网络预出版日期 2023-07-12

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 (Grants 2021J01457, 2022J011078), Open Project of Fujian Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2021KFKT05)

same season over the previous 3 years. (2) The magnitude of the OTS correction threshold  $F_1$  (i.e., elimination threshold) is closely related to the 2-m temperature. As the temperature rises, the elimination threshold first increases and then decreases. Grouping modeling based on the maximum 2-m temperature forecast yielded an elimination threshold under different temperature conditions. This method simultaneously reduced the false alarm ratio and missing ratio for light rain, improving the equitable threat score for light rain by 5.0%–8.2%. (3) The study compared two schemes for interpolating model precipitation forecasts before applying the OTS correction method. The first scheme employed the inverse distance weighted interpolation method, which outperformed the second scheme using the nearest neighbor interpolation method.

**Keywords** Model precipitation, Correction, OTS (Optimal Threat Score), Implement

## 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 and Luo (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 ECMWF、JMA、UKMO、NCEP 四个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 四个全球确定性预报模式的定量降水预报进行了订正, 订正的 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 累计降水和最高 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 时 (北京时, 下同) 和 20 时, 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, 该方法的公式为

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

其中,  $x$  和  $y$  分别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 h 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 mm 是参考了孙靖等 (2015) 设计的;  $F_k$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ) 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)、ETS 评分 (Equitable Threat Score)、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 累计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 评分表示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。

TS、ETS、FAR、MR 和 BS 的计算公式为

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

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

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

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

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

式(2~6)中,对于给定的降水量级,  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$ 、 $N_D$  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,福建省采用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  $M$  天( $M$  为滑动日数)和前1年预报日及其之后的  $M$  天、前1年预报日之前的  $M$  天和前2年预报日及其之后的  $M$  天、前2年预报日之前的  $M$  天和前3年预报日及其之后的  $M$  天组合而成的样本作为训练样本。经测试滑动日数  $M$  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 累计降水预报进行 OTS 订正,订正后的降水预报产品分别简称为 EC\_IDW\_OTS\_QSSW (Quasi-Symmetric 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(图1)来看,除了中雨量级的48~84 h

表1 降水检验分类表

Table 1 The frequency of “yes” and “no” forecasts and occurrences

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”( $N_D$ )	预报“否”的总数
总计	观测“是”的总数	观测“否”的总数	总数

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多。

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。

### 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  $\geq 0.1$  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

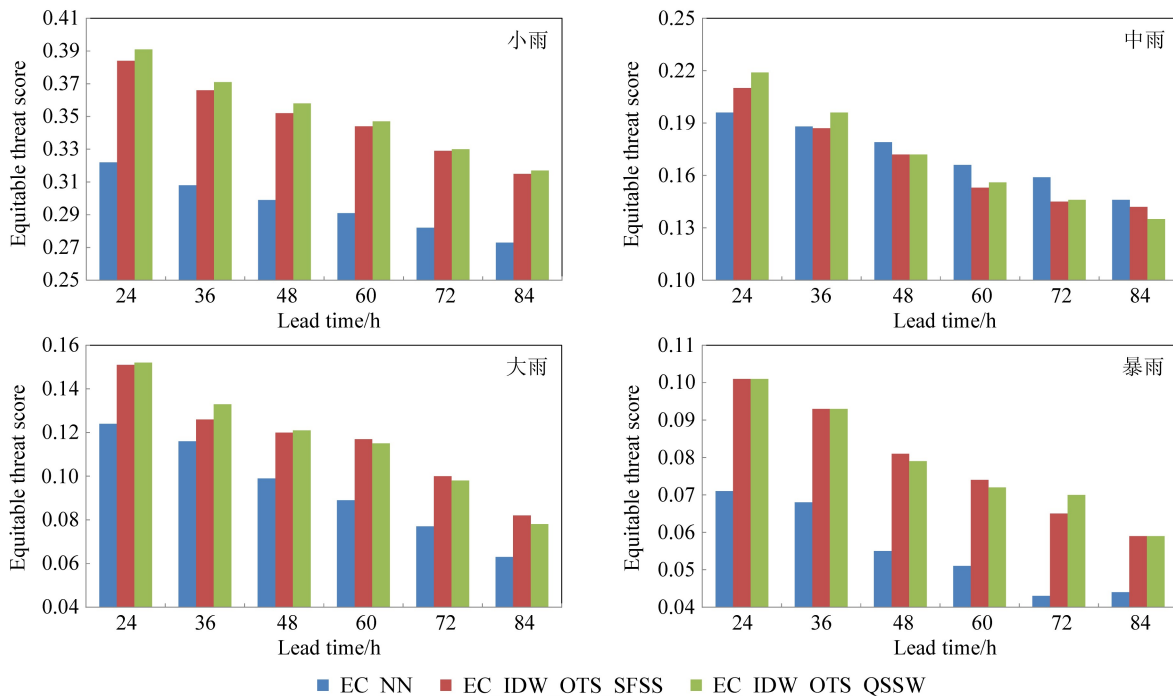


图1 2018~2019年 EC\_NN、EC\_IDW\_OTSS\_SFSS 和 EC\_IDW\_OTSS\_QSSW 产品在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的 ETS 评分。  
Fig. 1 ETS (Equitable threat score) of EC\_NN, EC\_IDW\_OTSS\_SFSS, and EC\_IDW\_OTSS\_QSSW for light, moderate, heavy, and hard rain during 2018~2019. EC-NN represents the ECMWF precipitation forecast interpolated by the nearest neighbor interpolation scheme. EC-IDW represents the ECMWF precipitation forecast interpolated by the inverse distance weighted interpolation scheme. Two methods were used to select training samples for calculating the OTS (OptimalThreat Score) correction threshold: One was 3-year quasi-symmetric sliding window sampling method and the other was the sampling method of collecting the samples from the same season over the previous 3 years. Applying the OTS correction method to correct EC-IDW, the corrected results are referred to as EC-IDW-OTS-QSSW and EC-IDW-OTS-SFSS, respectively.

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 累计降水预报样本，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  $\geq 33^{\circ}\text{C}$  的样本组成  $33^{\circ}\text{C}$  组， $\leq 4^{\circ}\text{C}$  的样本组成  $4^{\circ}\text{C}$  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  $4^{\circ}\text{C}\sim 29^{\circ}\text{C}$  内  $F_1$  随温度升高而增大（相关系数 0.79），在  $29^{\circ}\text{C}\sim 33^{\circ}\text{C}$  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。

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\_OTSS\_QSSW 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  $2^{\circ}\text{C}$  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 累计降水预报进行 OTS 订正，订正后的降水预报产品简称为 EC\_IDW\_OTSS\_QSSW2 (EC\_NN\_OTSS\_QSSW2)。

图 5 给出了 2018~2019 年 EC\_IDW\_OTSS\_QSSW 和 EC\_IDW\_OTSS\_QSSW2 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\_OTSS\_QSSW2 的 ETS 评分均高于 EC\_IDW\_OTSS\_QSSW，约提高了 5.0%~

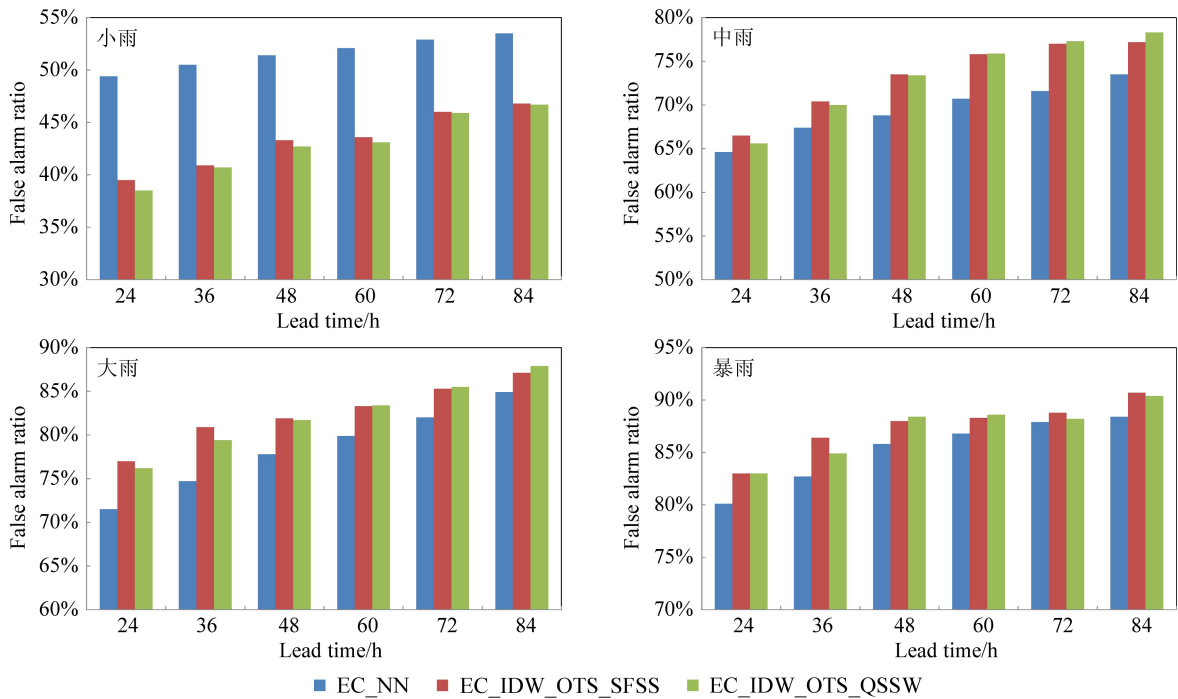


图2 2018~2019年 EC\_NN、EC\_IDW\_OT\_S\_SFSS 和 EC\_IDW\_OT\_S\_QSSW 产品在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的空报率。  
Fig. 2 False alarm ratio of EC\_NN, EC\_IDW\_OT\_S\_SFSS, and EC\_IDW\_OT\_S\_QSSW for light, moderate, heavy, and hard rain during 2018–2019.

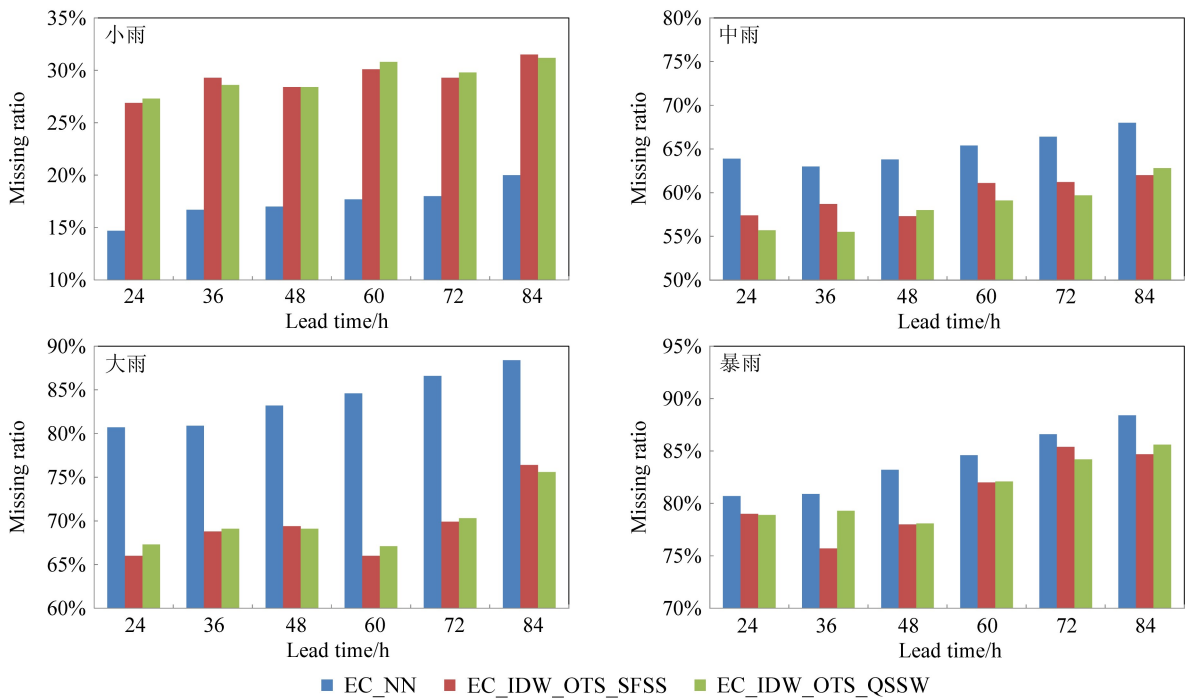


图3 2018~2019年 EC\_NN、EC\_IDW\_OT\_S\_SFSS 和 EC\_IDW\_OT\_S\_QSSW 产品在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的漏报率。  
Fig. 3 Missing ratio of EC\_NN, EC\_IDW\_OT\_S\_SFSS, and EC\_IDW\_OT\_S\_QSSW for light, moderate, heavy, and hard rain during 2018–2019.

8.2%，空报率和漏报率均低于 EC\_IDW\_OT\_S\_QSSW，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，

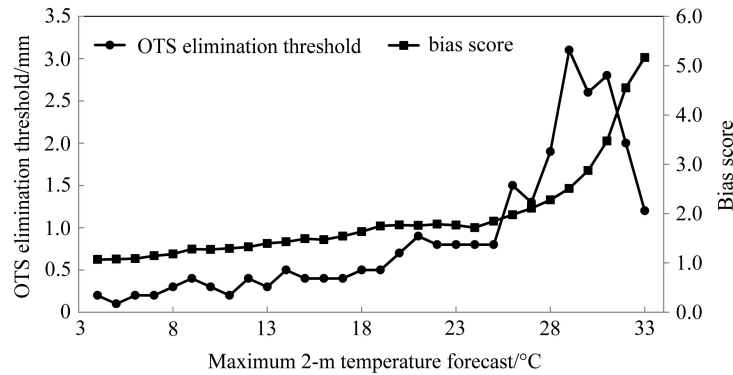


图 4 2018~2019 年 EC\_IDW 在 24 h 预报时效  $\geq 0.1$  mm 量级降水的 Bias 评分和 OTS 消空阈值随预报的最高 2 m 温度的变化。

Fig. 4 Variation of the bias score and OTS (Optimal Threat Score) elimination threshold with the maximum 2-m temperature forecast for precipitation  $\geq 0.1$  mm at 24-h lead time of EC\_IDW during 2018–2019.

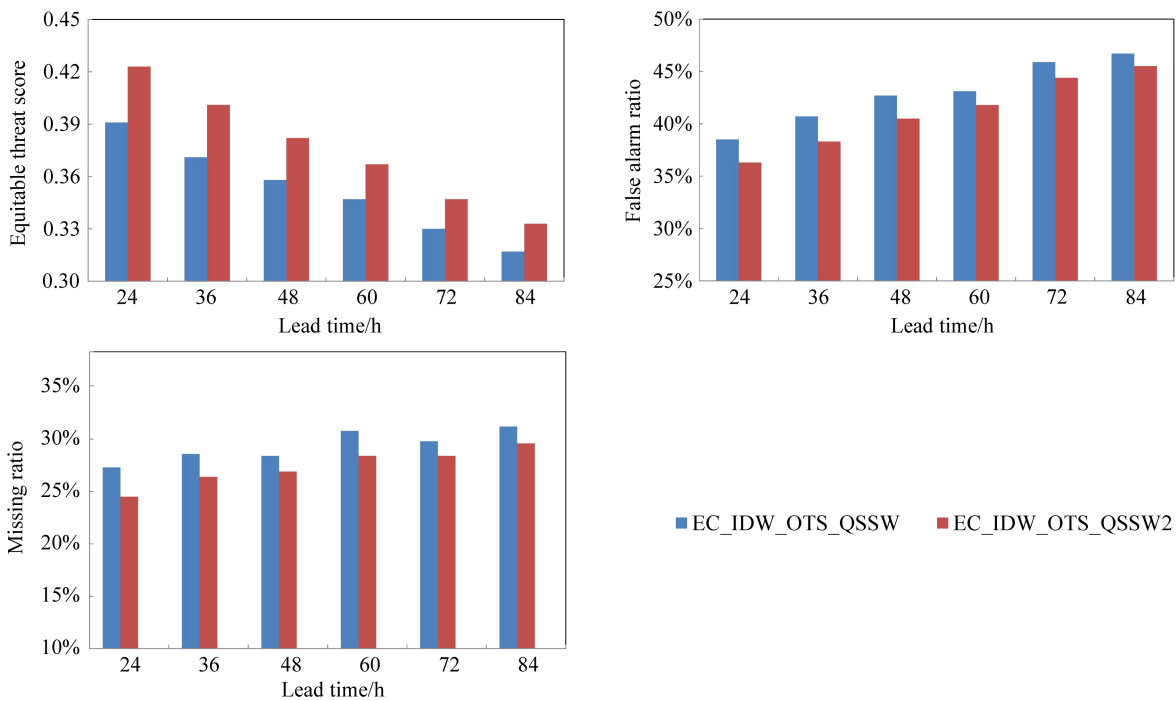


图 5 2018~2019 年 EC\_IDW\_OTS\_QSSW 和 EC\_IDW\_OTS\_QSSW2 产品在小雨量级的 ETS 评分、空报率和漏报率。

Fig. 5 Equitable threat score, false alarm ratio, and missing ratio of EC\_IDW\_OTS\_QSSW and EC\_IDW\_OTS\_QSSW2 for light rain during 2018–2019. The calculation process of EC\_IDW\_OTS\_QSSW2 is mostly the same as EC\_IDW\_OTS\_QSSW, except that the former calculate elimination threshold by grouping modeling based on the maximum 2-m temperature forecast.

可以在 EC\_IDW\_OTS\_QSSW 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 ( $F_2$ – $F_{10}$ )，结果只有  $F_2$  有改进效果 (图表略)。

## 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，福建省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。插值公式为

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

其中， $P_k$  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表示为

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

式中， $R$  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。

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\_OTSSW2 和 EC\_IDW\_OTSSW2 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\_OTSSW2 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\_OTSSW2 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\_OTSSW2 的 ETS 评分仍高于 EC\_NN\_OTSSW2。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%。

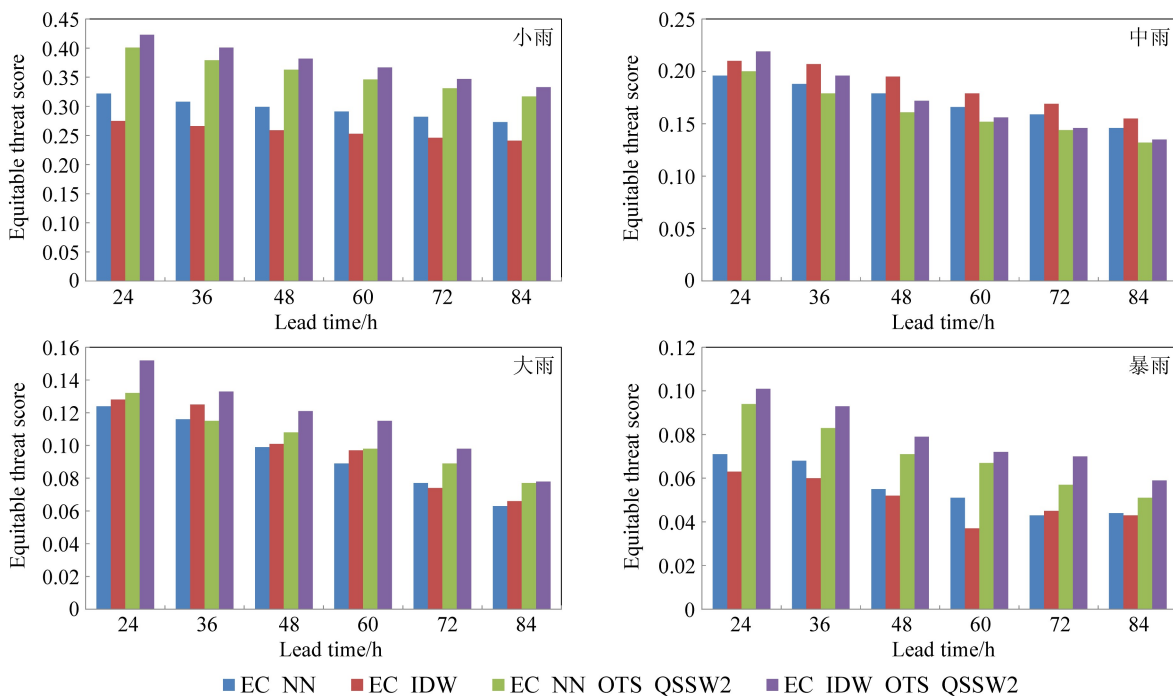


图 6 2018~2019 年 EC\_NN、EC\_IDW、EC\_NN\_OTSSW2 和 EC\_IDW\_OTSSW2 产品在小雨、中雨、大雨和暴雨四个量级的 ETS 评分。

Fig. 6 Equitable threat score of EC\_NN, EC\_IDW, EC\_NN\_OTSSW2 and EC\_IDW\_OTSSW2 for light, moderate, heavy and hard rain during 2018–2019. The calculation process of EC\_NN\_OTSSW2 is mostly the same as EC\_IDW\_OTSSW2, except that the former uses nearest neighbor interpolation scheme and the latter uses inverse distance weighted interpolation scheme.

## 6 结论与讨论

本文以 ECMWF 模式插值到站点的逐 12 h 累计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, 目前福建省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. doi:10.11898/1001-7313.20160503
- 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(4): 481-492. doi:10.1175/BAMS-84-4-481
- 范江琳, 陈朝平, 曹萍萍, 等. 2022. 四川地区 ECWFM 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 ECWFM clear-rainy forecast in Sichuan region [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 41(1): 58-65. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.007
- Forbes R, Haiden T, Magnusson L. 2015. Improvements in IFS forecasts of heavy precipitation [R]. ECMWF Newsletter, 144: 21-26. doi:10.21957/jxtonky0
- 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. doi:10.1175/1520-0450(1972)011<1203:TUOMOS>2.0.CO;2
- 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 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(1): 71-90. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15280
- 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. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.06.002
- 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. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.055
- 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 Huanzhu, 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. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.02.006
- 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. doi:10.11898/1001-7313.20150205
- 佟铃, 彭新东, 范广洲, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16115
- 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.08
- 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. 2020. Multi-model consensus forecasting technology with optimal weight for precipitation intensity levels [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 31(6): 668–680. doi:10.11898/1001-7313.20200603
- Wilks D S, Hamill T M. 2007. Comparison of ensemble-MOS methods using GFS reforecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135(6): 2379–2390. doi:10.1175/MWR3402.1
- 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. 2016. The optimal training period scheme of MOS temperature forecast [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 27(4): 426–434. doi:10.11898/1001-7313.20160405
- 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. doi:10.11898/1001-7313.20170305
- 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 Sciences (in Chinese)*, 36(1): 11–22. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.02
- 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 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. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.013
- 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, Lü You. 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(6): 814–823. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190109001
- 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 Cuiguang, Zhao Shengrong. 2006. Multi-model ensemble forecast technology with analysis and verification of the results [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 17(S1): 104–109. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.015
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 649pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 649pp.
- Zhu Y J, Luo Y. 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method [J]. *Wea. Forecasting*, 30(5): 1109–1124. doi:10.1175/WAF-D-13-00049.1