

基于BMA-QM的福建区域降水预报订正及暴雨检验研究

吴国丽¹, 鲍艳松^{1,2,3}, 林青^{4,5}, 潘宁^{4,5}, 赵晔昊¹, 董振¹

¹南京信息工程大学, 江苏 南京

²南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京

³南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 江苏 南京

⁴福建省灾害天气重点实验室, 福建 福州

⁵福建省气象台, 福建 福州

收稿日期: 2022年8月23日; 录用日期: 2022年9月18日; 发布日期: 2022年9月27日

摘要

以全球交互式大集合预报系统提供的六种模式模拟的福建省及其周边区域2019年至2020年的4月至6月的日降水数据结果作为降水预报资料, 以国家气象信息中心多源融合降水格点产品作为降水观测资料。对降水预报资料进行贝叶斯模型平均(简称BMA)方法订正后, 对BMA方法订正结果使用分位数映射法(简称QM)进行再订正。结果表明: 1) BMA方法订正后, 提升模式在晴雨和小雨的预报技巧, 但在中雨和大雨中未体现出优势。2) BMA-QM方法订正后, 保持晴雨处的预报技巧之余, 提升了小雨处的预报技巧, 尤其提高了大雨处的预报技巧。3) BMA-QM方法订正之下, 暴雨TS (0.163)和暴雨ETS (0.147)的提升率分别为98.30%、108.16%。BMA-QM方法订正可以提升模式对强降水的预报技巧, 这将对做出更为准确的暴雨预警有着重要的意义。

关键词

贝叶斯模型平均, 分位数映射法, 降水偏差订正, 统计后处理

Precipitation Forecast Correction and Rainstorm Test in Fujian Province Based on Bayesian Model Averaging-Quantile Mapping Method

Guoli Wu¹, Yansong Bao^{1,2,3}, Qing Lin^{4,5}, Ning Pan^{4,5}, Weihao Zhao¹, Zhen Dong¹

¹Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

文章引用: 吴国丽, 鲍艳松, 林青, 潘宁, 赵晔昊, 董振. 基于 BMA-QM 的福建区域降水预报订正及暴雨检验研究[J]. 应用数学进展, 2022, 11(9): 6755-6767. DOI: 10.12677/aam.2022.119716

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

³Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu

⁴Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou Fujian

⁵Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou Fujian

Received: Aug. 23rd, 2022; accepted: Sep. 18th, 2022; published: Sep. 27th, 2022

Abstract

The 24-hour cumulative precipitation data from April to June in Fujian Province and its surrounding areas from 2019 to 2020 simulated by six models provided by TIGGE are used as precipitation forecast data. The grid precipitation observation data are provided by CMPA. After the precipitation forecast data were revised by Bayesian model averaging, the results of BMA were revised using quantile-mapping. The results show as follows: 1) After BMA revision, the forecasting skills of models in clear-rainy and light rain have been improved, but there is no improvement in moderate rain and heavy rain. 2) After BMA-QM revision, the forecasting skill of light rain, especially heavy rain, are improved while maintaining the forecasting skill of clear-rainy. 3) After BMA-QM revision, Threat Score (0.163) and Equitable Threat Score (0.147) in rainstorm increased by 98.30% and 108.16% respectively. The correction of BMA-QM can improve the prediction skills of heavy precipitation, which is of great significance to make more accurate rainstorm warning.

Keywords

Bayesian Model Averaging, Quantile Mapping Method, Precipitation Bias Revised, Statistical Post-Processing

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天气系统是一个混沌系统，天气预报无法达到百分之百的准确率，故在观测资料和模式模拟中都存在着不确定性[1]。这些不确定性不利于获得准确的降水预报。集合预报的出现，促成天气预报从单一的数值预报走向概率性预报。Raftery 等[2]在 2005 年将贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)引入气象领域的天气预报中，该法能量化概率性预报的不确定性。集合预报对比单一的确定性预报具有更高的研究价值，但是原始集合模式预报中也存在偏差，集合预报统计学后处理技术便应运而生[3]。在 Leamer [4]给出 BMA 方法的框架之后，国内外学者开始探索如何将 BMA 方法延至多模式集合预报订正。

周梦瑶等[5]利用第五次耦合模式比较计划八个气候模式的预报资料来对赣江与汉江流域的降水和气温进行建模订正，结果表明在 BMA 方法订正后，都提高了模拟结果对气温和降水的精度，其中对气温订正效果的显著程度远比降水更高。吴裕珍等[6]利用了全球交互式大集合预报系统(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, TIGGE)收集的预报资料，研究东江流域降水概率预报，研究发现，BMA 方法在降水量较小的情况下，改进了整个流域的各个时段中的预报效果。祁海霞等[7]将 BMA 方法应用于清江

流域后,指出 50%分位数预报对于一般降水的预报效果较好,而面对强降水、极端降水,确定性预报的分位点在 50%~90%选取的效果更好。Javanshiri 等[8]对比集合模型输出统计法和贝叶斯模型平均法的订正效果,可以发现经过后处理的集合预报均比未处理之前的预报结果更接近实况,且 BMA 方法更准确可靠。Sloughter 等[9]证明, BMA 方法对强降水事件订正的表现优于逻辑回归。周洁琴[10]指出 BMA 方法对轻降水事件预报准确,但是对中强降水的预报性能有限。

分位数映射法(Quantile-Mapping, QM)作为一种依赖频率分布来订正预报的方法,也是常用的统计学后处理技术。雷华锦等[11]将 QM 方法改进后应用于黑河上游区域的降水误差订正,发现订正后的预报数据在频率和降水量中都有明显的订正效果。包慧濛等[12]用频率匹配法对江西省欧洲中期气象预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的降水预报进行偏差订正后降低了模式预报的小雨的空报率,以及大雨和暴雨量级中的漏报率,且订正后对于强降水的空间分布的形态和位置刻画效果较好。智协飞等[13]基于卡尔曼滤波法使用频率匹配法进行偏差订正后提升了各降水量级的 ETS,对小于 5 毫米和大于 15 毫米的降水事件的预报技巧提升最为明显。Hamill 等[14]选用 QM 方法进行偏差订正后不仅提高了预报技巧,也保持了降水分布的形态。喻雪晴等[15]对比研究了 QM 方法和比例缩放法,发现 QM 方法订正后的平均绝对百分比误差值最大值为 2.31%,远比例缩放法小。韩振宇等[16]对比前人的研究,指出 QM 方法能有效提高集合预报模式中的气温和降水的预报技巧。

福建省雨量充沛,气象灾害频发,精确的降水预报对该区域尤为重要,故本文选取福建省及其周边地区为研究区域,其中该区域的全年平均降雨量为 1400 至 2000 毫米之间[17]。文中首先利用 BMA 方法对 TIGGE 数据集中六个模式日降水数据进行订正,并给出订正后的降水预报结果,分析 BMA 方法在不同降水分级中的订正效果。其次,对 BMA 方法订正后的结果使用 QM 方法进行再订正(记为 BMA-QM),以期提高预报在强降水处的预报技巧。BMA-QM 方法订正或能提供更为准确的暴雨预警。

2. 资料与方法

2.1. 数据介绍

预报数据选取的是 TIGGE 提供的六个模式在福建省及其周边地区(23°N~29°N, 115°E~121°E)的日降水数据(1°/day)。观测资料选取 CMPA (China Merged Precipitation Analysis)降水融合资料(0.05°/hourly)。降水资料信息如表 1 所见。时段为 2019 年至 2020 年的 4 月至 6 月。由于数据的空间分辨率不统一,采用双线性插值法统一分辨率为 1° × 1°。

Table 1. Precipitation data information

表 1. 降水资料信息

数据集名称	研究机构	空间分辨率	时间分辨率
CMPA	国家气象信息中心	0.05° × 0.05°	逐小时
ECCC	加拿大气象局	1° × 1°	逐日
ECMWF	欧洲中期天气预报中心	1° × 1°	逐日
JMA	日本气象厅	1° × 1°	逐日
KMA	韩国气象厅	1° × 1°	逐日
NCEP	美国国家环境预测中心	1° × 1°	逐日
UKMO	英国气象局	1° × 1°	逐日

2.2. 贝叶斯模型平均

贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)方法是一种基于贝叶斯理论的数据后处理方法,并能针对预报值得到具有预报效果的概率密度函数[10]。

令 $f = f_1, \dots, f_k$ 分别表示 K 个不同数值模式预报结果, y 为需要预报的变量, y^T 为训练期数据。依据 BMA 原理, 预报量 y 在训练数据下基于 K 个不同模式下的概率分布函数为:

$$p(y | f_1, \dots, f_k) = \sum_{k=1}^K w_k g_k(y | (f_k, y^T)) \quad (1)$$

式中: $g_k(y | (f_k, y^T))$ 为预报变量 y 在模型训练期阶段 y^T 、模式 f_k 预报为最佳预报条件下的概率密度函数; w_k 为各个集合模式在训练期为最佳预报的后验概率, 也可称之为权重, 非负且 $\sum_{k=1}^K w_k = 1$, 反映的是每个数值模式在模型训练期对预报技巧的相对贡献程度。

类似降水数据这类不连续的变量, 并不服从高斯分布。因此 $y | (f_k, y^T)$ 的分布可以分成两个部分来进行假设[10]。

$$g_k(y | (f_k, y^T)) = P(y = 0 | f_k) I[y = 0] + P(y > 0 | f_k) g_k(y | (f_k, y^T)) I[y > 0] \quad (2)$$

其中, 第一部分, 无降水部分: $P(y = 0 | F^{M_i}, Y)$ 是由逻辑回归模型得到的无降水概率。第二部分, 有降水部分: $P(y > 0 | F^{M_i}, Y)$ 为有降水概率, $y | F^{M_i}$ 服从伽马分布。

2.3. 分位数映射法

将降水事件通过不同的阈值划分成不同的等级后, 在相同等级中, 将预报的降水频率调整到和观测的降水频率一致, 这就是频率匹配法[13]。分位数映射法(Quantile-Mapping, QM)属于频率匹配法的一类, 其认为观测降水和模拟降水在频率分布上是一致的[11]。该方法通过建立模拟降水和观测降水之间的传递函数, 对模拟降水进行订正。具体如下[18]:

- 1) 计算 CMPA 降水数据和 TIGGE 提供的六种模式的降水预报数据的累积概率密度分布
- 2) 建立 CMPA 降水数据和各模式的降水预报数据的累积概率密度分布之间的传递函数
- 3) 利用传递函数对验证期的数据进行订正

$$X_{cor} = F_{obs}^{-1} \left(F_{mod,train} \left(X_{mod,fut} \right) \right) \quad (3)$$

其中, F_{obs} 、 $F_{mod,train}$ 分别表示训练期内观测数据和模式数据的经验累积分布函数; $X_{mod,fut}$ 表示验证期(或者预测期, 因为 QM 方法假设 CMPA 降水数据和各模式的降水预报数据的累积概率密度分布之间的传递函数在未来时期也不发生改变); X_{cor} 为验证期内模式的订正结果。

2.4. 预报效果检验方法

本文选取两种类型的指标对订正效果进行检验和评估, 一类是统计指标, 从数学的角度评价模型的效果; 第二类是分级气象降水评价指标, 从业务检验的角度来评估订正模型的效果。统计指标中选取平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和连续概率排位分数(Continuous Ranked Probability Score, CRPS)。平均绝对误差反映预报数据和观测数据之间的差距大小, 连续等级概率评分是可以量化真实值和理论值之间的差异的指标。理想状态是 $MAE = 0$, $CRPS = 0$ 。两个指标的计算方式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |fo_i - ob_i| \quad (4)$$

$$CRPS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int [f(f_{o_i}) - H(f_{o_i} - ob_i)]^2 dx \tag{5}$$

其中， f_{o_i} 和 ob_i 分别代表的是第 i 个格点处的模式预报数据和观测数据， $f(f_{o_i})$ 表示概率预报累积分布函数； $H(f_{o_i} - ob_i)$ 是 Heaviside 函数， $f_{o_i} < ob_i$ 时为 0，反之则为 1； n 是预报的总格点数。

业务上从降水分级角度对预报效果进行评估，降水分级则是按降水量为标准[10] (如表 2)。计算分级预报评价指标中，涉及到表 3 的混淆矩阵。表 3 中，NA、NB、NC、ND 分别表示为命中个数、空报个数、漏报个数、反命中个数。技巧评分(Thereat Score, TS)是用以评价确定性预报的准确率的评分标准；公平技巧评分(Equitable ThreatScore, ETS)则在 TS 的基础上，考虑了空报和漏报的情况，并对这两种情况加以惩罚。偏差评分(Bias Score)是用以衡量模式预报与实况的预报偏差，可以用来体现降水总体的预报效果。理想预报状态下， $TS = 1$ ， $ETS = 1$ ， $BIAS = 1$ 。各个指标的计算公式如下：

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \tag{6}$$

$$ETS = \frac{NA - R}{NA + NB + NC - R} \tag{7}$$

$$R = \frac{(NA + NB)(NA + NC)}{NA + NB + NC + ND} \tag{8}$$

$$BIAS = \frac{NA + NB}{NA + NC} \tag{9}$$

Table 2. Classification table of precipitation grades

表 2. 降水等级划分表

用语	日降水量(mm)	降水等级
晴雨	<0.1	/
小雨	0.1~9.9	轻降水
中雨	10~24.9	中降水
大雨	25~49.9	强降水
暴雨	>50	强降水

Table 3. Classification of predictive tests

表 3. 预报检验分类表

实况	预报	
	出现某一量级的降水	未出现某一量级的降水
出现某一量级的降水	NA	NC
未出现某一量级的降水	NB	ND

3. 结果分析

3.1. BMA 方法降水预报订正

3.1.1. 训练期选取

因为天气系统是一个无时无刻不在改变的系系统，因此本文选择滑动建模。本文选取平均绝对误差

(MAE)和连续概率排位分数(CRPS)作为指标来确定训练期长度。图 1 是不同训练期长度下福建及其周边地区 BMA 方法降水回报的 MAE 和 CRPS 趋势图,可见在 94 天的训练期之前,随着训练期长度的增加平均绝对误差和连续概率排位分数两个指标均出现了下降的趋势,并且在 94 天之后均趋于平稳。因此,确定训练期长度为 94 天。

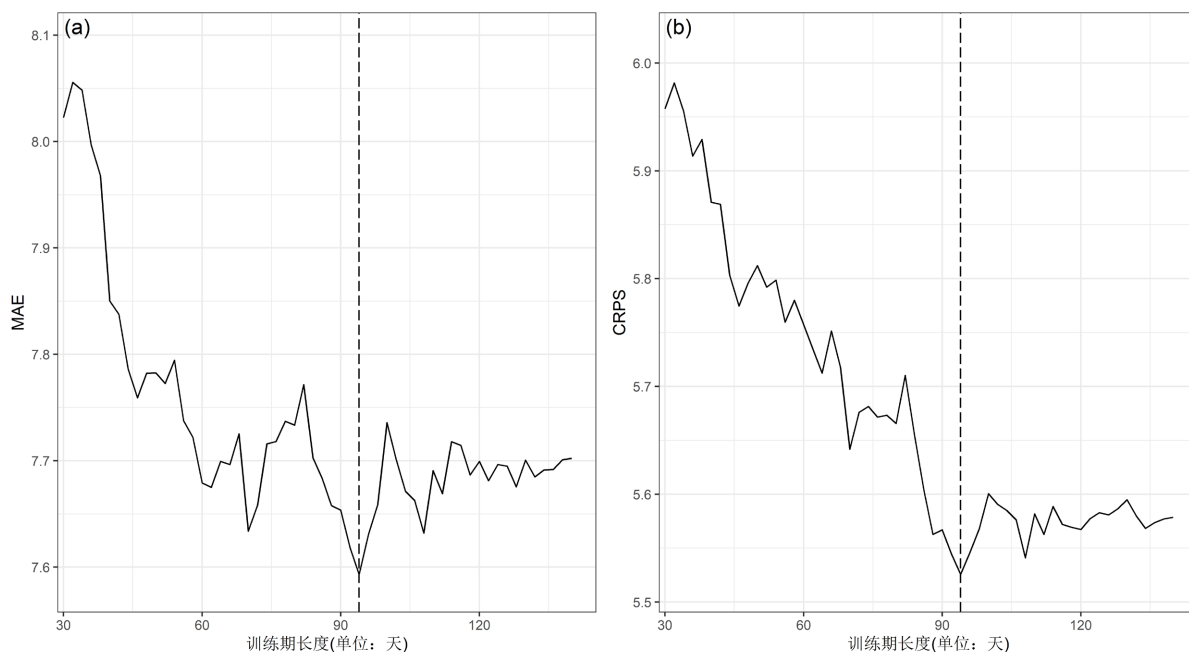


Figure 1. Index trend chart of precipitation return by BMA method in Fujian and its surrounding areas under different training periods (imaginary line is the position of 94 days): (a) MAE, (b) CRPS

图 1. 不同训练期长度下福建及其周边地区 BMA 方法降水回报的指标趋势图(虚直线为 94 天所处位置): (a) MAE 指标, (b) CRPS 指标

3.1.2. 各个集合模式的权重分布对比

根据 BMA 中各模式的权重随验证期内天数变化的折线图(图 2(a))可以看到,各个模式的权重随时间变化而变化。这符合天气系统常常处于变化之中的现实情况。由 BMA 中各模式权重分布的箱线图(图 2(b))可见,ECMWF 和 NCEP 的权重的中位数分别是 0.526 和 0.434,远远高于其他模式。即在建模过程中,ECMWF 和 NCEP 对于订正效果的提升贡献较大。同时,通过评估各原始预报模式的预报技巧,确定原始最优模式为 ECMWF,次优模式为 NCEP。

3.1.3. BMA 方法订正的降水预报结果评价

表 4 是 BMA 方法订正前后的分级降水预报评价指标对比,其中 RAW 表示加拿大气象局(ECCC)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、日本气象厅(JMA)、韩国气象厅(KMA)、美国国家环境预测中心(NCEP)、英国气象局(UKMO)六个模式订正前的评价结果。由表 4 可得,经过 BMA 方法订正后,晴雨 TS 达到 80.75%,对比 ECMWF 提升率达 21.12%;在小雨处的 TS 提升率为 35.49%。在各降水量级中,BMA 方法订正后结果的 ETS 都比 ECMWF 更靠近 1,即在 ETS 中体现出 BMA 模型在各降水量级的优势。经 BMA 方法订正后,结果在小雨量级处的 BIAS 评分更接近于 1。

在三个指标的中强降水中,BMA 方法订正后,TS 和 ETS 次于 ECMWF 模式;BIAS 评分仅优于 NCEP 模式。由此可得,经过 BMA 方法订正后,对比原始集合模式预报,在中雨和大雨以上量级中均出现了

负技巧。这在一定程度上说明了 BMA 方法在小雨的订正效果明显，而在中强降水中预报能力有限。

同时通过对比不同指标的情况可以发现，相同的模型中，会出现指标的差异性，在之后分析也会从多角度出发。

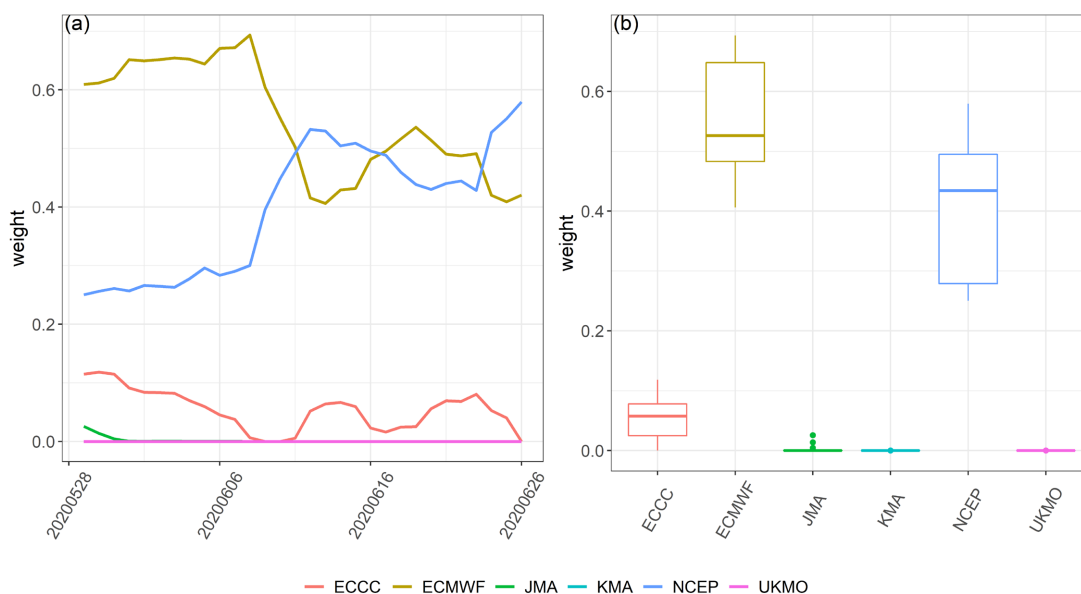


Figure 2. Comparison of weight distribution of each set mode in the validation period: (a) Line chart of weight change of set mode, (b) Boxplot of weight distribution of set mode

图 2. 验证期内各集合模式的权重分布对比：(a) 集合模式权重变化折线图，(b) 集合模式权重分布箱线图

Table 4. Comparison of evaluation indexes of graded precipitation forecast before and after the revision of BMA method
表 4. BMA 方法订正前后的分级降水预报评价指标对比

评分指标	雨级	RAW						BMA
		ECCC	ECMWF	JMA	KMA	NCEP	UKMO	
TS	晴雨	0.746	0.667	0.739	0.718	0.638	0.715	0.808
	小雨	0.357	0.387	0.449	0.442	0.336	0.435	0.525
	中雨	0.201	0.342	0.245	0.243	0.295	0.259	0.313
	大雨	0.281	0.303	0.238	0.238	0.223	0.283	0.294
ETS	小雨	0.171	0.099	0.188	0.173	0.061	0.162	0.315
	中雨	0.132	0.271	0.184	0.172	0.209	0.190	0.235
	大雨	0.232	0.254	0.185	0.185	0.183	0.233	0.255
BIAS	小雨	0.911	2.424	1.916	2.006	2.754	2.127	1.573
	中雨	1.109	1.438	1.101	1.504	1.963	1.237	1.546
	大雨	0.884	0.916	1.013	1.013	0.626	0.903	0.645

3.2. QM 方法降水预报订正

本文对六个集合模式的降水预报使用 QM 方法订正,探讨 QM 方法在不同预报模式的订正效果差异,验证 QM 方法可以提升模式在小雨和大雨的预报技巧,而对于中雨的订正效果不如小雨和大雨这一结论

的泛化性。

图 3 是 QM 方法订正前后的评分指标对比图。可见，除 ECCC 外的五个模式在 QM 方法之后的晴雨 TS 都出现了大幅度提升，并且整体在小雨 TS 有提升。NCEP 的大雨 TS 的提升率甚至达 32.15%，与此同时，ECMWF 在大雨 TS 提升率也有 3.6%。在各降水量级的 ETS 中，各模式的小雨 ETS 的订正效果最明显。除 ECCC 外的五个模式订正的小雨 ETS 均出现了提升，最低提升率超过 30%，ECMWF 模式的小雨 ETS 在 QM 订正后提升率高达 264.72%，NCEP 模式的小雨 ETS 提升率为 289.70%。ECMWF 模式和 NCEP 模式订正后的 BIAS 评分在各量级中表现均优，即在订正后表现出 BIAS 评分更接近 1。在大雨 BIAS 评分中，改良效果最好的是 ECMWF 模式。改良效果最明显的是 NCEP 模式，ECMWF 模式是改良效果次明显的模式。在 QM 方法订正后，NCEP 模式|BIAS-1|的变化率达 26.45%，ECMWF 模式的变化率为 8.39%。

改良效果的显著程度在不同的指标下不相同。对三个指标的趋势进行结合考虑后得出：其一，对预报性能越好的预报模式数据进行 QM 订正后的订正效果越显著；其二，对模式数据进行 QM 方法订正后，订正效果的显著程度随量级的增大而减小；其三，QM 方法在小雨和大雨量级处的订正效果优于中雨量级。

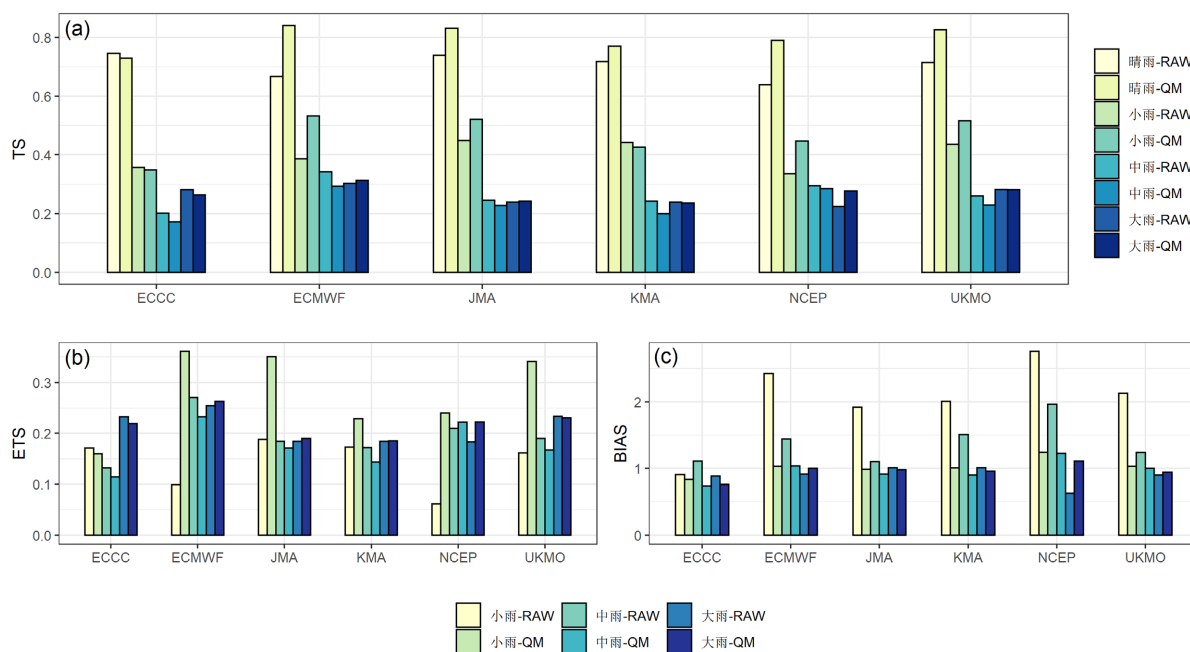


Figure 3. Comparison of scoring indexes before and after QM revision: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS

图 3. QM 订正前后的评分指标对比: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS 评分

3.3. BMA-QM 降水预报订正

由前文可得，BMA 方法订正后的模式数据在中雨以上量级都出现了预报负技巧，QM 方法具有改善预报中存在“小雨空报，大雨漏报”问题的能力。为此本节将结合 BMA 方法对中强降水预报技巧提升有限的情况，对 BMA 方法订正后的结果使用 QM 方法进行再订正。

3.3.1. BMA-QM 方法订正的降水预报结果评价

图 4 是 BMA 和 BMA-QM 方法订正前后评分指标对比图。对比 BMA 方法订正，BMA-QM 方法订

正后在晴雨 TS、小雨 TS 和大雨 TS 的提升率分别为 3.62%、3.08% 和 8.63%，在小雨 ETS 和大雨 ETS 的提升率分别为 16.63% 和 4.62%。对比 ECMWF 模式，BMA-QM 方法订正后在小雨 TS 和大雨 TS 提升率分别为 39.67% 和 5.69%，在小雨 ETS 和大雨 ETS 提升率分别为 85.25% 和 4.97%。经 BMA 方法订正的和 BMA-QM 方法订正的结果在各降水量级 BIAS 评分中，均体现出 BMA-QM 方法的优势，这与前文 QM 方法在 BIAS 评分下的效果一致，即 ECMWF 模式在各量级 BIAS 评分都体现出改良效果。ECMWF 模式的大雨 BIAS 评分为 0.916，即存在漏报的情况。在进行 BMA-QM 方法订正之后，BIAS 评分从 BMA 方法订正的 0.645 提升至 1.103。

在 BIAS 评分中，BMA-QM 方法订正后，提升了模式预报对于中雨事件的预报技巧。然而，BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正后，在 TS 和 ETS 指标中，未表现出对中雨降水事件的订正技巧提高。结合三个指标说明，对中雨事件的预报订正中，减轻了空报情况的同时，加剧了漏报和不能命中预报的情况。

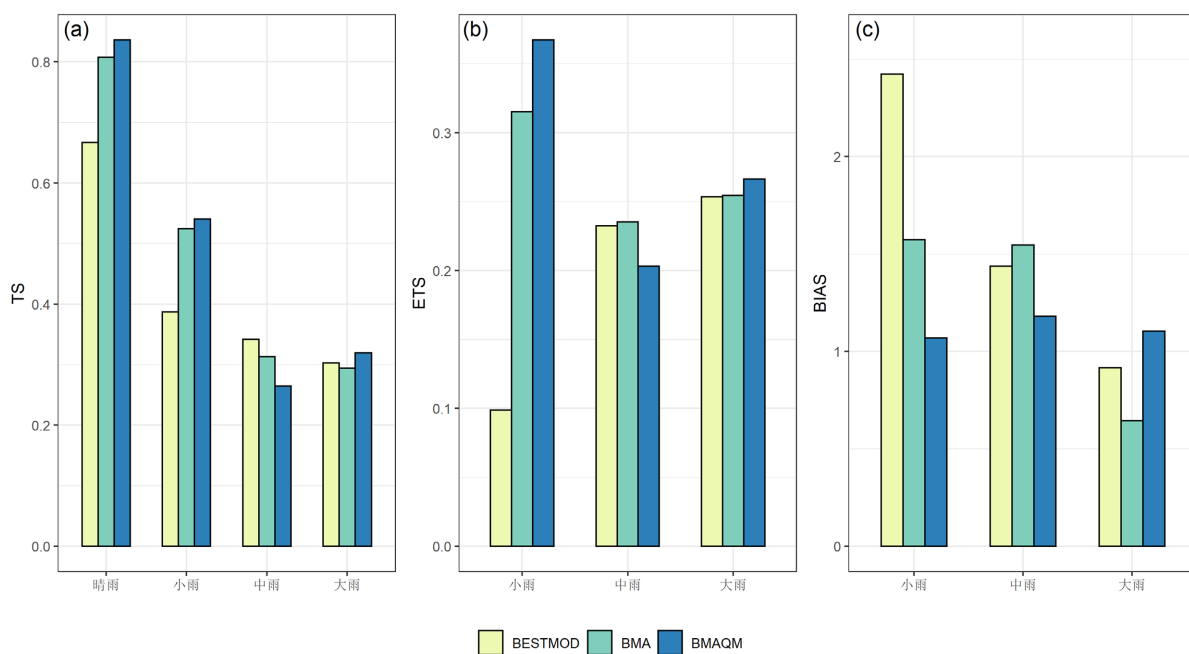


Figure 4. Comparison of scoring indexes before and after BMA revision and BMA-QM revision: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS

图 4. BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正前后评分指标对比: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS 评分

3.3.2. BMA-QM 方法订正的暴雨检验评分

结合前文，本文给出 BMA-QM 方法订正后全区域的暴雨检验评分。表 5 是 BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正前后的暴雨检验评分对比，其中 BESTMOD、BMA、BMA-QM 分别代表 ECMWF 模式的数据、BMA 方法订正后的结果、BMA-QM 方法订正后的结果对应的暴雨检验评分。经 BMA-QM 方法订正后，暴雨 TS 对比 ECMWF 模式提升率达 98.30%，暴雨 ETS 的提升率达 108.16%。基于 ECMWF 模式和 BMA 方法订正的暴雨 BIAS 评分都小于 1 的情况来看，BMA-QM 方法订正后暴雨 BIAS 评分大于 1。出现这样的结果，是因为在调节降水强度的过程中，减少了漏报的同时也增加了空报，而空报增加的幅度远低于漏报减少的幅度，同时，预报命中情况从好到差的顺序为 BMA-QM 方法订正后的结果、ECMWF 模式数据、BMA 方法订正后的结果。这导致了 BMA-QM 的最终结果在暴雨量级中的 TS 和 ETS 表现良好，

但 BIAS 评分表现不佳。总体而言，BMA-QM 方法订正对暴雨的预报技巧的提升明显。

Table 5. Comparison of rainstorm test scores before and after BMA revision and BMA-QM rerevision
表 5. BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正前后的暴雨检验评分对比

评分指标 \ 模式/模型	BESTMOD	BMA	BMA-QM
TS	0.081	0.070	0.163
ETS	0.071	0.065	0.147
BIAS	0.784	0.243	1.514

3.3.3. 2020 年 6 月 5 日降水订正的个例分析

由图 5 的 2020 年 6 月 5 日日降水情况对比图可见，ECMWF 模式能较好的刻画出该地区的降水重心，尤其是研究区域的西北部，但 ECMWF 模式并没有将研究区域在东南部的无雨带刻画出来。BMA 方法订正后，将这个区域的无雨带及主雨带的位置和形态刻画出来。BMA-QM 方法订正之后，将主雨带的形态、位置、强度刻画相对完整。BMA 方法订正以及 BMA-QM 方法订正之后主雨带的形态和位置几乎相似，且在无雨部分，BMA-QM 更接近实况。

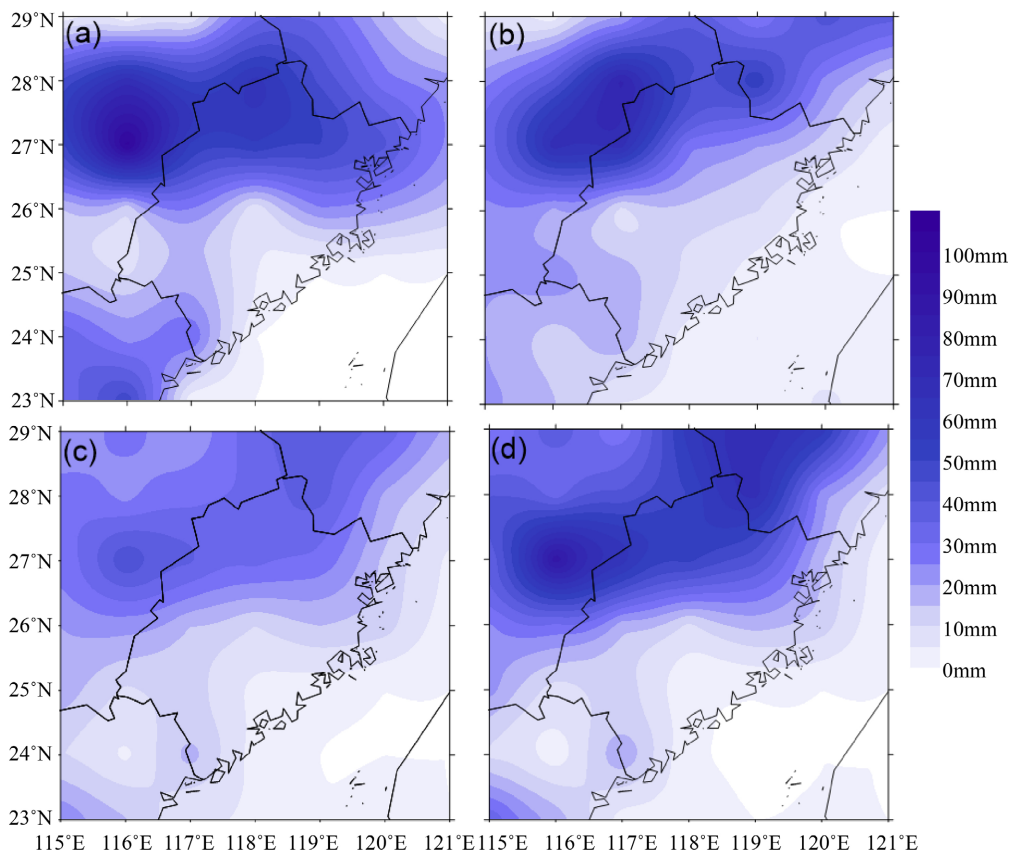


Figure 5. Comparison of cumulative precipitation in 24 hours on June 5, 2020 (unit: mm): (a) Observation, (b) Original optimal forecast model, (c) Deterministic precipitation forecast after BMA correction, (d) Deterministic precipitation forecast after BMA-QM revision
图 5. 2020 年 6 月 5 日 24 小时累积降水情况对比(单位: mm): (a) 观测, (b) 原始最优预报模式, (c) BMA 方法订正后降水预报, (d) BMA-QM 方法订正后降水预报

通过计算指标, BMA-QM 方法对比 BMA 方法在平均绝对误差的订正率为 4.95%, 对比 ECMWF 模式平均绝对误差的订正率为 4.37%。由图 6 的 2020 年 6 月 5 日降水预报各个指标对比图, 可以看出 BMA-QM 方法订正后的 TS 和 ETS 在三个量级都比 BMA 方法订正之下的情况更好。在 BIAS 评分中, 小雨和大雨量级里, BMA-QM 方法订正均改善了空报的情况, 而在中雨量级中, BMA 方法订正已经达到理想预报的状态, 此时 BMA-QM 并没有保持中雨的 BIAS 评分, 甚至还比 ECMWF 模式还差。说明在该订正个例的降水过程中, BMA-QM 方法订正后的中雨量级里的空报, 对比 BMA 方法订正和 ECMWF 模式更严重。出现这样的情况是因为 BMA-QM 方法订正的过程中, 在大雨量级的降水强度调高的同时, 接近中雨的小雨处对应的预报降水强度也提高了, 最终导致中雨量级空报增加。

总体而言, 在此次降水过程中, BMA-QM 方法订正后, 不仅保持了晴雨量级下的预报技巧, 也提升了小雨处的预报技巧, 尤其是提高了中雨和大雨量级的预报技巧。这也验证了前文的分析结论。

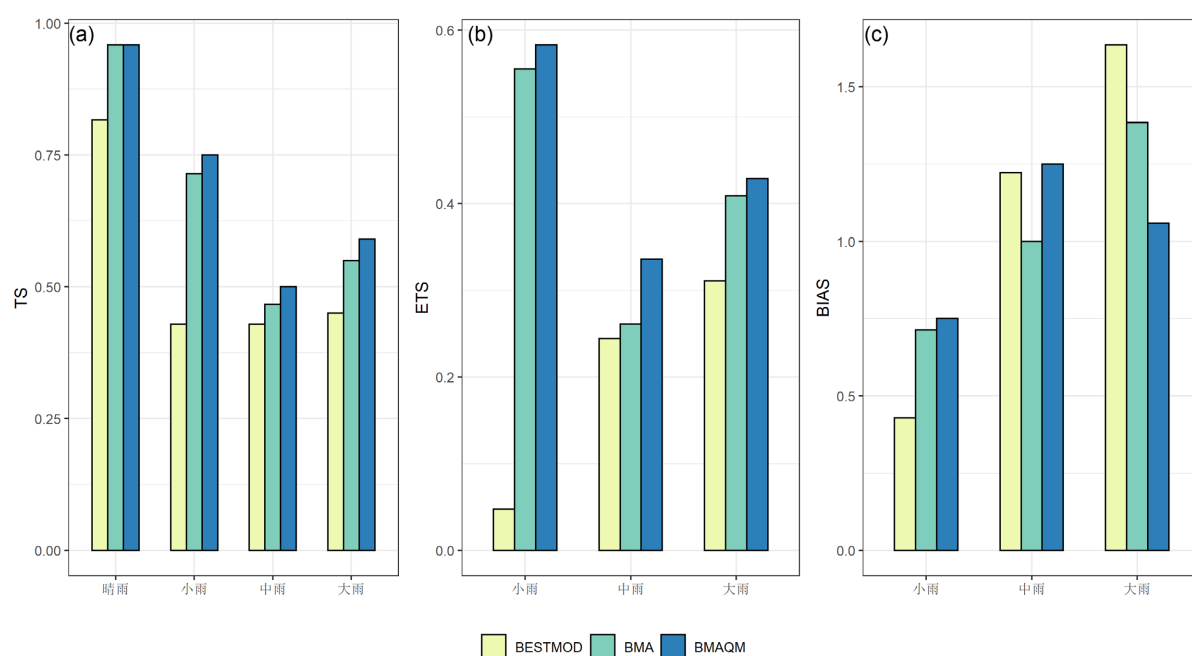


Figure 6. Comparison of precipitation forecast indicators for June 5, 2020: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS
图 6. 2020 年 6 月 5 日降水预报各个指标对比: (a) TS, (b) ETS, (c) BIAS 评分

4. 结论

本文使用福建省及其周边地区在 2019 年至 2020 年 4 月~6 月的日降水资料以及 6 个集合预报模式的日降水数据, 利用 BMA 方法对六个集合预报模式的降水数据进行订正后, 利用 QM 方法对经 BMA 方法订正后的结果进行再订正。选取 2020 年 5 月 28 日~2020 年 6 月 26 日作为验证期, 得到以下的主要结论:

1) BMA 方法订正后, 在晴雨和小雨处的订正效果最明显, 但 BMA 方法订正后在 TS 和 BIAS 评分中并没有在中强降水上表现出订正优势。BMA 方法订正后的结果在 ETS 指标中, 对比 ECMWF 模式在中强降水上有改良效果。说明在不同的指标中, 订正效果的显著程度不相同。

2) 在对六个原始模式分别进行 QM 方法订正后发现, TS、ETS、BIAS 评分均表明 QM 方法在 ECMWF 和 NCEP 这两个模式的订正较好。并且也验证了 QM 方法在小雨和大雨, 对比中雨有更好的订正效果。

3) BMA-QM 方法订正之后, 其结果在各级 BIAS 评分中对比 ECMWF 模式均有改进。对比 ECMWF 模式, BMA-QM 方法订正后的晴雨、小雨和大雨的 TS 提升率分别为 25.5%、39.67% 和 5.69%; 小雨和

大雨的 ETS 的提升率分别为 85.25% 和 4.97%。同时, BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正的结果对应的中雨 TS 分别为 31.33%、26.47%, 中雨 ETS 分别为 23.52%、20.31%, 对比 ECMWF 模式(中雨 TS: 34.17%、中雨 ETS: 23.25%), BMA 方法订正和 BMA-QM 方法订正的结果均未表现出对中雨事件订正技巧提高, 且 BMA-QM 方法订正的结果对比 BMA 方法订正结果出现了更明显的负技巧。

4) 对研究区域进行暴雨检验后发现: BMA-QM 方法订正后的结果对比 ECMWF 模式的数据, 暴雨 TS 和暴雨 ETS 提升率分别高达 98.30% 和 108.16%。BIAS 评分不减反增之因或在, 调节降水强度时, 为保实况资料和 BMA 方法订正后的结果两者累积概率密度分布一致, 不免将实况中大雨降水事件调至暴雨事件, 便增加了空报。个例分析表明: 经 BMA-QM 方法订正后, 不仅保持了晴雨处的预报技巧, 提升小雨处的预报技巧, 也提高了中雨量级和大雨量级的预报技巧。BMA-QM 方法订正后的结果在中雨量级里, 空报对比 BMA 订正和 ECMWF 模式更严重。

致 谢

本论文的顺利完成离不开导师的指导和林青和潘宁两位福建省气象台的专家提供的数据, 向三位老师表示衷心感谢。同时, 也向帮助和关心过我的同门表示感谢。

基金项目

江苏省研究生科研实践项目(SJCX21_0374)。

参考文献

- [1] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革[J]. 气象, 2010, 36(1): 1-6.
- [2] Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., et al. (2005) Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Monthly Weather Review*, **133**, 1155-1174. <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
- [3] 苏翔, 袁慧玲. 集合预报统计学后处理技术研究进展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(2): 30-41.
- [4] Ingene, C.A. and Leamer, E.E. (1980) Specification Searches: Ad Hoc Inference with Nonexperimental Data. *Journal of Marketing Research*, **17**, 136. <https://doi.org/10.2307/3151132>
- [5] 周梦瑶, 袁飞, 江善虎, 等. 基于贝叶斯模型平均的赣江与汉江流域多气候模式集合研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 1-5.
- [6] 吴裕珍, 钟逸轩, 王大刚, 等. 基于贝叶斯模式平均的东江流域降雨概率预报[J]. 热带地理, 2015, 35(6): 860-872.
- [7] 祁海霞, 彭涛, 林春泽, 等. 清江流域降水的多模式 BMA 概率预报试验[J]. 气象, 2020, 46(1): 108-118.
- [8] Javanshiri, Z., Fathi, M. and Mohammadi, S.A. (2021) Comparison of the BMA and EMOS Statistical Methods for Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasting. *Meteorological Applications*, **28**, e1974. <https://doi.org/10.1002/met.1974>
- [9] Sloughter, J.M.L., Raftery, A.E., Gneiting, T., et al. (2007) Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasting Using Bayesian Model Averaging. *Monthly Weather Review*, **135**, 3209-3220. <https://doi.org/10.1175/MWR3441.1>
- [10] 周洁琴. 基于贝叶斯模型平均的东北地区降水概率预报[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2021. <https://doi.org/10.27248/d.cnki.gnjqc.2021.000791>
- [11] 雷华锦, 马佳培, 李弘毅, 等. 基于分位数映射法的黑河上游气候模式降水误差订正[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 266-279.
- [12] 包慧濛, 郭达烽, 李葳. 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, 2022, 38(2): 12-20.
- [13] 智协飞, 吕游. 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, 2019, 42(6): 814-823.
- [14] Hamill, T.M., Engle, E., Myrick, D., et al. (2017) The US National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. *Monthly Weather Review*, **145**, 3441-3463. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0331.1>
- [15] 喻雪晴, 穆振侠. 降水资料匮乏地区不同再分析数据降尺度效果的评价[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 5-8+23.

-
- [16] 韩振宇, 童尧, 高学杰, 等. 分位数映射法在 RegCM4 中国气温模拟订正中的应用[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(4): 331-340.
- [17] 罗小莉, 姚才, 肖志祥, 等. 近 60 年来登陆华南热带气旋降水的气候变化特征及其成因[J]. 海洋预报, 2020, 37(4): 76-85.
- [18] 刘远驰. 基于降雨数值预报的山洪灾害动态预警模式研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2021.