

# Probabilistic Forecast of Surface Air Temperature Using Bayesian Model Averaging

Hongmei Zhou, Yue Mao, Zhaofeng Song

Sheyang Meteorological Bureau, Yancheng Jiangsu  
Email: 1534607029@qq.com

Received: Apr. 16<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2019; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In this study, based on European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and Global Forecast System (GFS), the probabilistic forecasts of surface air temperature during the period from 1 June to 31 November 2018 were conducted using Bayesian Model Averaging (BMA). The results showed that BMA method can not only provide deterministic result prediction, but also provide full probability density function to describe the uncertainty of prediction quantitatively. By using Analyzed the Correlation Coefficient (ACC), Root-mean-square error (RMSE) and the prediction accuracy of the prediction errors at 1°C and 2°C, the prediction results of BMA are better than models. The continuous ranked probability score (CRPS) is used to evaluate the probability prediction of BMA, and it is found that the probability prediction skills of BMA are also improved. In addition, for the probability forecast provided by BMA, the temperature forecast under 80% probability can be used as the limit of the maximum temperature forecast.

## Keywords

BMA, Probabilistic Forecast, Yancheng

---

# 基于BMA方法的地面气温概率预报研究

周红梅, 茆越, 宋兆丰

射阳县气象局, 江苏 盐城  
Email: 1534607029@qq.com

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年4月23日; 发布日期: 2019年4月30日

---

## 摘要

利用欧洲中心欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(GFS)两个预报中心2018年6月1

日至2018年11月30日地面2米气温0~4天预报资料,对地面气温进行贝叶斯模式平均(Bayesian Model Averaging, BMA)预报实验。结果表明,BMA方法不仅可以提供确定性结果预报而且可以提供全概率密度函数,定量描述预报不确定性大小。利用ACC、RMSE以及预报误差在1℃和2℃的预报准确率来看,BMA的预报结果相比于模式而言,有一定的提高。利用CRPS评分对BMA概率预报进行评估,发现BMA的概率预报技巧也有提高。另外对于BMA提供的概率预报,80%概率下温度预报可作为最高气温预报的界限。

## 关键词

BMA, 概率预报, 盐城

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

天气概率预报初创于20世纪,但直到上世纪60年代前期为止,概率天气预报的进展比较缓慢。20世纪60年代最先由美国国家气象局把概率预报用于日常气象业务的试验;并于1965年开始在全国实施降水主观概率预报(SubpoPa)业务计划,1972年雷雨和强风暴概率预报投入业务运行,1974年短时局地强风暴概率预报系统进行试运行,1976年完成此系统的开发。20世纪70年代日本开始传送降水概率预报,并于1980年JE式对外发布东京的降水概率预报;1980年欧洲中心澳大利亚、加拿大等国和地区相继建立了降水概率预报业务系统。我国在20世纪80年代曾发布过概率预报,1995年在上海市、北京市相继发布了降水概率预报。1998年中国气象局决定在全国推行概率预报业务,但目前国内水平与美国、日本等发达国家相比还存在一定差距,不仅表现在数值预报模式的分辨率上、计算机速度上、预报产品分发处理上,还表现在我国数值预报产品释用工作至今尚未形成完整业务。

大气自身的运动特征、数值模式的不完备、初始资料的不确定性等各类因素,促使了天气预报从单一值的确定论向多值的概率论转变[1][2]。

杜钧[3]、矫海燕[4]指出集合预报的产生和应用在一定程度上弥补了预报的不确定性,提高了预报精度,为概率预报的发展奠定了坚实的基础。Epstein [5]提出了集合预报的思想和方法,这是一种动力随机预报方法。依据非线性理论,由于数值模式对初始状态的敏感性,集合预报方法使用多个成员来描述大气状态的不确定性,通过模式运行产生大量预报信息,可生成真正“概率论”意义下的预报结果。多模式集成方法是一种提高模式预测准确率的非常有效的后处理统计方法。多模式集成方法不仅适用于确定性预报,也可用于概率预报。其中集合概率预报可以定量评估不确定性,并且对天气变化的风险分析和决策制定提供更准确的值,从而实现经济最优化[6]。集合概率预报方法BMA, Raftery等[7]在2005年引入BMA方法,将其作为一种方法产生任何天气参数的概率密度函数。这种方法现在被广泛的用于气温、海平面气压、定量降水、风速以及风向的概率预报。贝叶斯模式平均方法(Bayesian Model Averaging,简称BMA)能够产生率定的高度集中的概率密度函数(Probability density function,简称PDF)。它对某一特定变量的概率预报是经过偏差校正的单个模式概率预报的加权平均,其权重是相应模式的后验概率,代表着每个模式在模式训练期相对的预报技巧。应用研究表明,基于BMA方法进行集合预报具有明显优势。用已有预测效果的PDF进行概率预报,这个有预测效果的PDF是经过偏差校正的各个中心的概率密度函

数(PDF)的加权平均,其权重是相应模式的后验概率,代表着每个模式在模式训练阶段相对的预报技巧。

智协飞等[8]利用 TIGGE 多模式资料研究 BMA 方法对地面气温的 10~15 d 延伸期概率预报研究,结果表明 BMA 方法对概率预报技巧有一定的效果。智协飞等[9]利用多模式资料中地面气温资料进行 BMA 预测方法研究,结果表明,EMN 的回报效果优于 8 个单模式的回报效果,而 BMA 的回报效果最好。另外,智协飞等[10]也比较了集合概率预报的两种不同的方法,结果发现利用 BMA 方法制作的概率预报的方差较小,减小了预报的不确定性,因此预报结果更接近大气的真实值。

在实际业务应用方面,如何通过有效的手段充分利用各种数值预报产品形成本地概率预报产品,十分迫切。盐城地处江苏中东部,拥有最长的海岸线和最远的沿海滩涂以及最广的海域面积,物产富饶,素有鱼米之乡的美称。冬季主要受极地变性大陆气团控制,夏季受副热带高压控制,一年四季均有灾害性天气,主要包括暴雨、大风、寒潮、高温等。本文以盐城为例,进行多模式集成将多种模式产品转化成所需的概率预报产品,进一步提升各种数值预报的客观指导价值,进一步提升本地预报水平,实现经济最优化。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料

本文用包括欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)、美国国家环境预报中心(Global Forecast System, GFS)预报数据都是 08 时起报,预报未来 3 天 96 小时的 2 米气温。模式中心及其分辨率如表 1 所示。

**Table 1.** Basic characteristics of the two climate models

**表 1.** 两个预报模式中心模式的基本信息

预报中心	模式名称	分辨率
欧洲中期天气预报中心	European Center for Medium-Range Weather Forecast, (ECMWF)	$0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$
美国国家环境预报中心	Global Forecast System (GFS)	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$

由于不同模式的分辨率不同,为便于比较,因此采用双线性插值统一将各个模式资料的 2 米气温统一插值到  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。

本文使用 Cressman 插值将站点资料转换为格点资料作为观测场,与模式资料对应,格点分辨率为  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。空间范围统一选取( $32^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $119^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$ )。本文使用的 2018 年 6~11 月供 6 个月的气温模式在资料。

### 2.2. 方法

#### 2.2.1. 贝叶斯模式平均

BMA 是一种集合预报的前处理方法,可以产生有预测效果的概率预报,也可以产生确定性预报。它以实测样本隶属于某一模式的后验概率为权重,将各模式的条件概率密度函数进行加权平均,从而得到概率密度函数,其基本原理如下:

$$p(y | (f_1, f_2, \dots, f_K, y^T)) = \sum_{k=1}^K \omega_k h_k(y | (f_k, y^T))$$

其中,  $\omega_k$  是权重,反映了第  $k$  个模式在训练期的相对贡献程度。 $\omega_k$  是非负的,且满足  $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ 。

$h_k(y|(f_k, y^T))$ 是与单个模式回报结果  $f_k$  相联系的条件概率密度函数。

BMA 模型的预报方差包括两项, BMA 模型的预报方差包括两项, 第一项是模式间的方差, 反映了预报集合的离散度, 第二项表示集合内的方差。

$$\text{var}[y|(f_{1st}, f_{2st}, \dots, f_{kst}, y^T)] = \sum_{k=1}^K w_k \left( (a_k + b_k f_{kst}) - \sum_{k=1}^K w_k (a_k + b_k f_{kst}) \right)^2 + \sigma^2$$

其中  $s, t$  分别表示格点的空间指标和时间指标,  $f_{kst}$  表示第  $k$  个模式在格点  $(s, t)$  的回报结果。模式间方差反映了集合成员的离散度, 模式内方差可用于衡量模式预报的不确定性。常规的概率预报方法通常只考虑了其中之一, 造成了不确定性的低估。以简单集合平均为例, 它仅考虑了模式间的方差, 而忽略了模式内的方差, 进而影响了预报效果。BMA 预测了这种离散度 - 误差的关系, 且这种关系是离散度偏小的, 并可从理论上解释集合预报离散度偏低的可能性。由于模式方差也表征着预报不确定性的程度, BMA 方法为这种相互矛盾的现象提供了一定的理论框架, 并给出了改进的方法。

### 2.2.2. Cressman 插值

Cressman 插值算法由 Cressman 等[11]在 1959 年提出, 采用逐步订正的方法进行最优化插值, 用实际资料与预备场或者初值场之差去改变和订正预备场或者初值场, 得到一个新场, 再求出新场与实际值之差, 去订正上一场的场, 直到订正后的场逼近观测记录为止。

Cressman 插值算法的基本公式模型为:

$$\alpha' = \alpha_0 + \Delta\alpha_{ij}$$

其中

$$\Delta\alpha_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K (W_{ijk}^2 \Delta\alpha_k)}{\sum_{k=1}^K W_{ijk}}$$

式中,  $\alpha_k$  为任意一个气象要素(如: 气温、降水等),  $\alpha_0$  为变量  $\alpha$  在格点  $(i, j)$  上的第一猜测值,  $\alpha'$  是变量  $\alpha_k$  在格点  $(i, j)$  上的订正值,  $\Delta\alpha_k$  为观测点  $k$  上的观测值与第一猜测值之差,  $W_{ijk}$  是权重因子, 分别由橡胶形、椭圆形和圆形权重函数决定, 在 0.0~1.0 之间,  $K$  是影响半径  $R$  内的台站数。

Cressman 插值最重要的是权重函数  $W_{ijk}$  的确定, 其一般形式为:

$$W_{ijk} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_{ijk}^2}{R^2 + d_{ijk}^2}, & d_{ijk} < R \\ 0, & d_{ijk} \geq R \end{cases}$$

其一般取为 1、2、4、7 和 10 几个常数。  $d_{ijk}$  是格点  $(i, j)$  到观测点  $k$  的距离。

Cressman 插值算法的基本思路如下:

- S1: 需要确定一个预备场, 并设定一个逼近值范围, 用于比较计算后的新值与实际资料的差值;
- S2: 计算权重  $W_{ijk}$ ;
- S3: 将权重  $W_{ijk}$  放入插值计算中, 得到一个新场;
- S4: 将这个新场与实际资料相比, 计算他们的差是否在预定的逼近值范围内, 如果不在逼近值范围内, 就用这个新场与实际值的差, 去订正上一场的场;
- S5: 对订正后的场与实际值进行比较, 如果还是超过逼近值的范围, 则继续订正, 直到新场与实际值的差在预定的逼近值范围内。

### 2.3. 检验评估方法

本文采用以下三种常用的方法对 BMA 结果进行检验和评估。

1) 均方根误差(Root-mean-square error, RMSE), 其定义为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2}$$

其中,  $n$  是训练期数据总和,  $y_i$  是模式回报值,  $o_i$  是观测值。RMSE 值越小, 则模式的回报效果越好。

2) 距平相关系数(Anomaly Correlation Coefficient, ACC), 其定义为:

$$\text{ACC} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}}$$

其中,  $n$  是空间场的格点样本数,  $y_i$  是模式回报值,  $o_i$  是观测值。ACC 用来评估模式回报值与观测值的相似程度, 因而 ACC 值越大, 则模式的回报效果越好。

3) 连续分级概率评分(Continuous Ranked Probability Score, CRPS), 其定义为:

$$\text{CRPS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int [f(y_i) - H(y_i - o_i)]^2 dx$$

其中,  $H(y_i - o_i)$  是赫维赛德阶跃函数(Heaviside step function), 如果  $y_i < o_i$ ,  $H(y_i - o_i) = 0$ ; 反之,  $H(y_i - o_i) = 1$ 。CRPS 评分是评估概率预报效果的常用指标之一, 反映了模式模拟值和观测值累计分布函数的区别, 因而 CRPS 取值越小, 则模式的模拟效果越好。

## 3. 检验评估

对多模式进行集合预报, 并采用 ACC、RMSE、预报误差 1°C 和 2°C 的预报准确率以及 CRPS, 对多模式集成结果进行气温预报效果评估。图 1~4 就是各个指标的评估效果。从 ACC、RMSE 以及预报误差在 1°C 和 2°C 的预报准确率可以看出大部分预报时效内, BMA 的确定性结果都具有较好的预报效果。就从 ACC 来看, 预报技巧最大幅度可以提高 0.12, 但随着预报时效的增大, 提高的幅度逐渐减小。从 RMSE 来看, 大部分预报时效预报技巧有提高, 最高可以减少 2.7°C, 并且同样, 随着预报时效逐渐变大, 预报技巧提高幅度逐渐减小。对于地面气温预报误差在 1°C 的准确率最高可提高 0.13, 预报误差在 2°C 的准确率最高可提高 0.13。

CRPS 可以看出在所有预报时效内, BMA 的预报技巧都高于其他两个模式, 最高技巧提高幅度可达 0.4, 并且随着预报时效的增长, 预报的技巧提高幅度逐渐减小。另外, 对于所有时效, CRPS 值还是比较大。说明各个模式以及 BMA 方法对盐城区域范围内 2 米气温预报仍存在一定的困难。也说明对盐城区域的气温的预报研究存在一定的实际意义。

## 4. BMA 概率预报结果

### 4.1. 单点预报结果

对研究时段内但各个点的地面 2 m 气温进行 BMA 预报研究。图 5 给出格点(32°N, 119.45°E) 00~96 h 预报期内的 5%、25%、50%、75%、95% 的概率折线图。对于大部分预报时效而言, 观测值接近于 50% 的概率值附近, 说明 BMA 方法预测出的预报值是最大概率值。

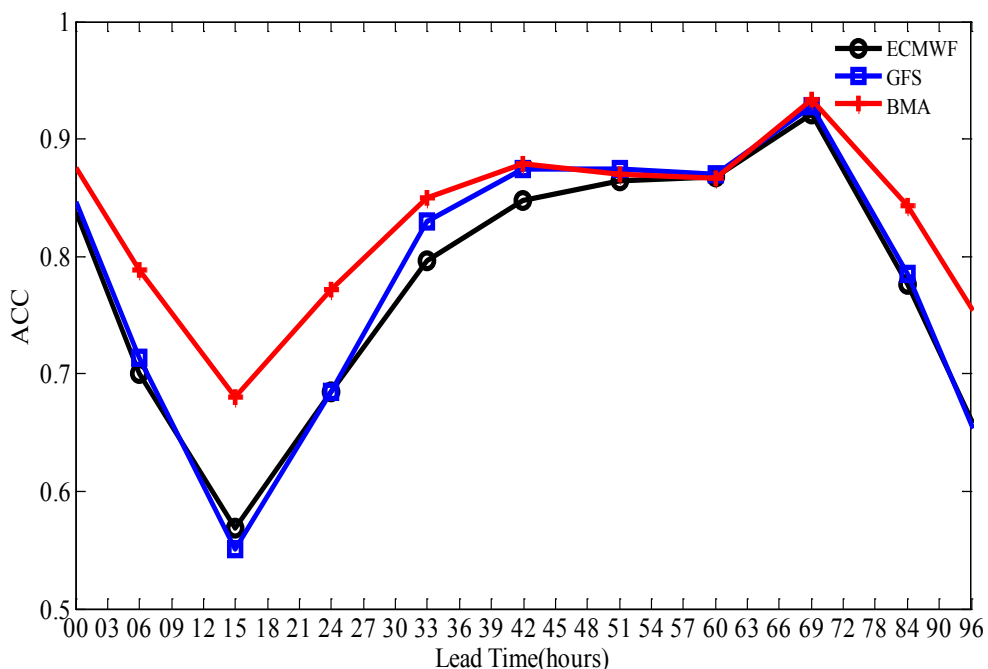


Figure 1. The variation of ACC with 96 h leading time at 08:00 for T2m by different model (ECMWF, GFS) and BMA

图 1. 单模式(ECMWF, GFS)和 BMA 对 T2m 变量 08:00 时起报的 96 h 时效的预报期平均 ACC

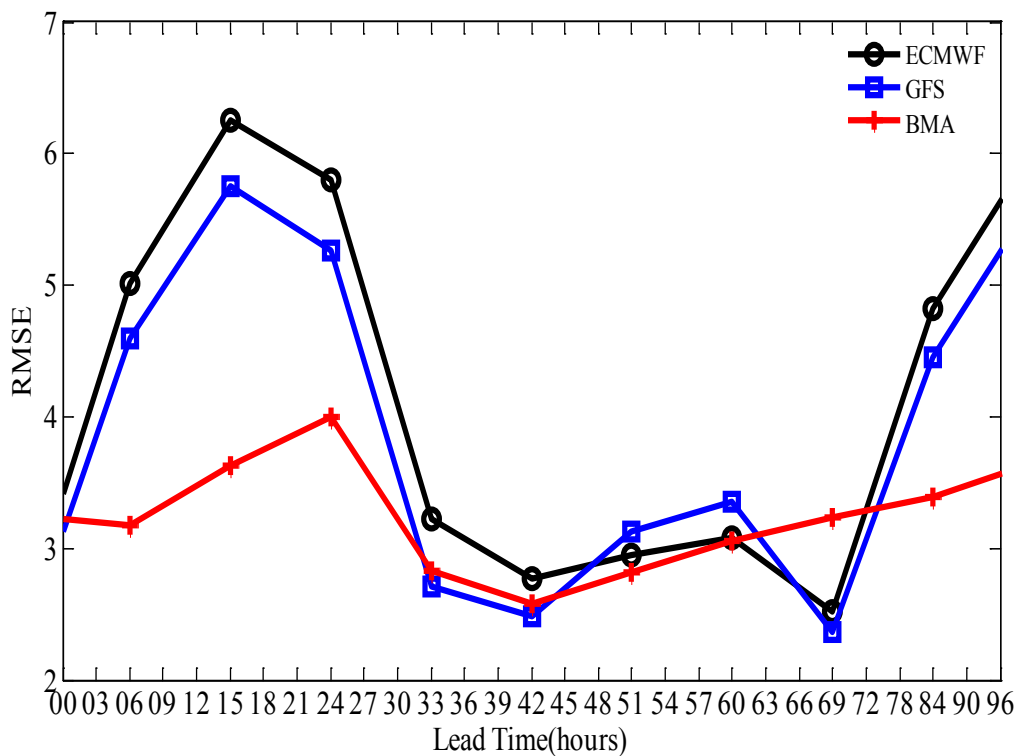
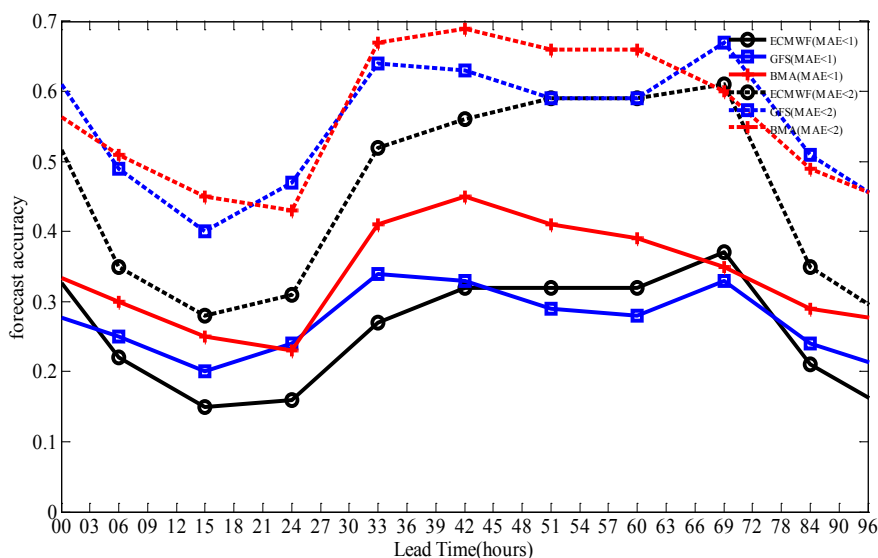


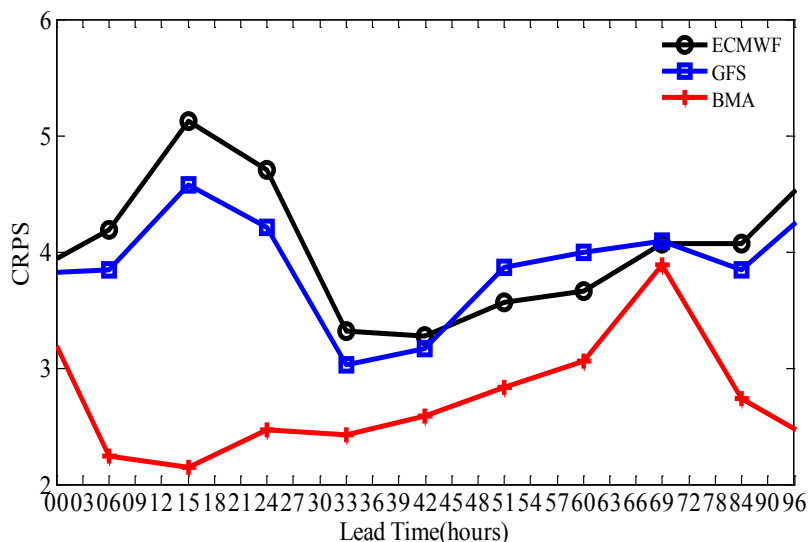
Figure 2. The variation of RMSE with 96 h leading time at 08:00 for T2m by different model (ECMWF, GFS) and BMA (unit: °C)

图 2. 单模式(ECMWF, GFS)和 BMA 对 T2m 变量 08:00 时起报的 96 h 时效的预报期平均 RMSE(单位: °C)



**Figure 3.** The variation of forecast accuracy of 1°C and 2°C with 96 h leading time at 08:00 for T2m by different model (ECMWF, GFS) and BMA

**图 3.** 单模式(ECMWF, GFS)和 BMA 对 T2m 变量 08:00 时起报的 96 h 时效的预报期误差 1°C 和 2°C 的平均预报准确率

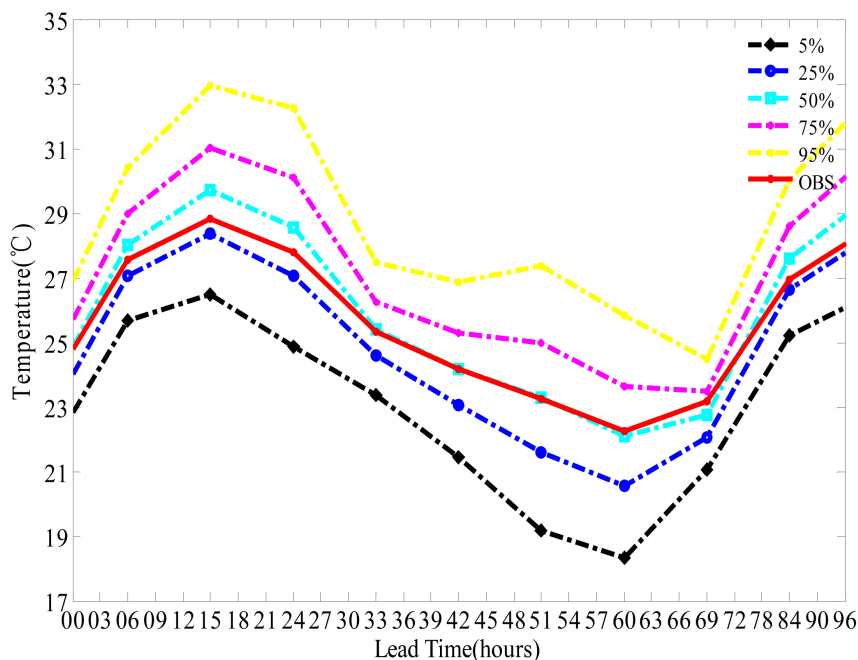


**Figure 4.** The variation of CRPS with 96 h leading time at 08:00 for T2m by different model (ECMWF, GFS) and BMA

**图 4.** 单模式(ECMWF, GFS)和 BMA 对 T2m 变量 08:00 时起报的 96 h 时效的预报期平均 CRPS

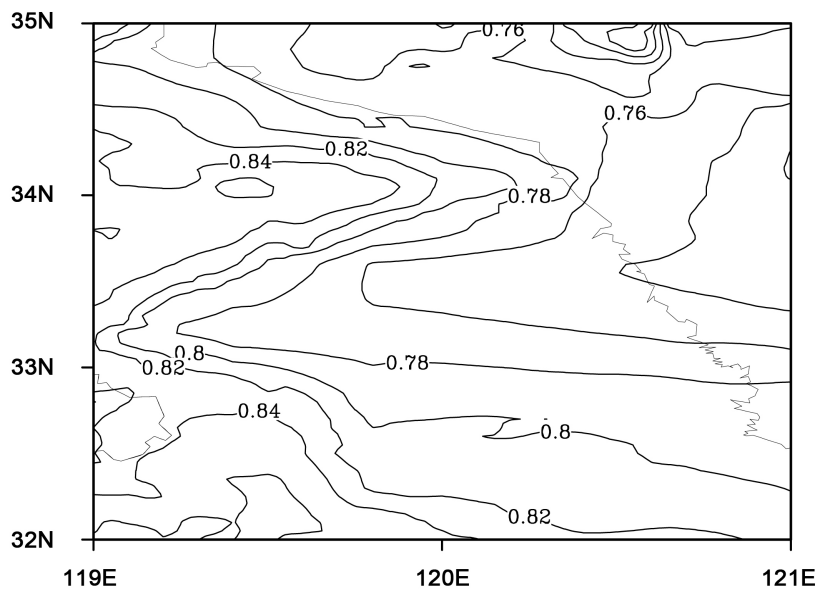
#### 4.2. 区域预报结果特征

图 6 对预报期的 2 米最高气温作为预报值, 可以看出其概率分布多集中在 80% 附近, 即对于本次试验而言, 80% 的概率值下的温度可作为高温天气的预警。这对于高温预警具有一定的参考价值, 也同样可以为用户和决策者提供这种预报结果的不确定量值。相应地, 将该方法可应用于所需预报时段, 不仅可以给出最高气温的阈值范围也可以给出最高气温发生概率的地理分布情况。图 7 地面 2 米的气温观测值的概率值分布, 可以看出观测值更接近于 40% 概率, 因此除了 BMA 提供的确定性预报之外, 可以就



**Figure 5.** Surface air temperature of different probability (5%, 25%, 50%, 75%, 95%) in 00 - 96 h at the grid point (32°N, 119.45°E), the dotted curves are the BMA predictive, dashed curve is observation

**图 5.** 格点(32°N, 119.45°E) 00~96 h 预报期内的 5%、25%、50%、75%、95%的概率分布, 虚线是 BMA 预报值, 实线是观测值

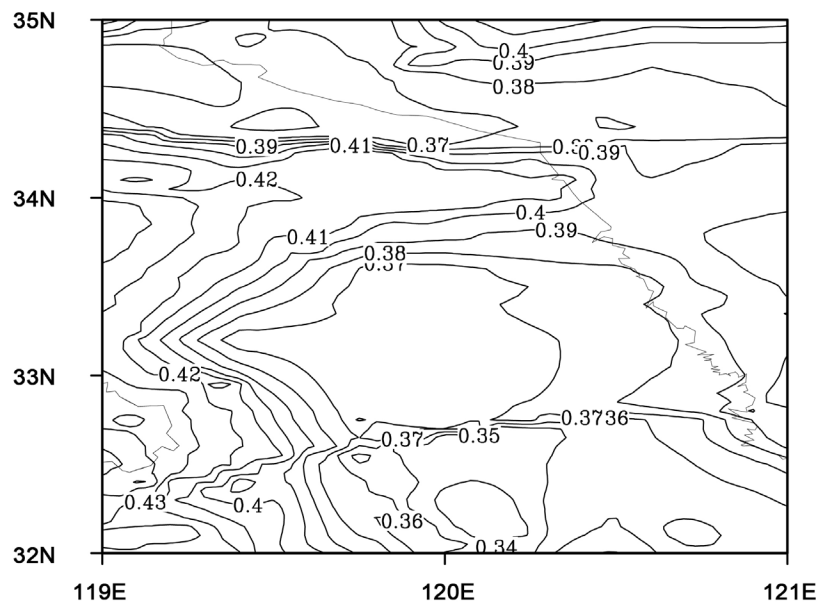


**Figure 6.** The spatial probability distribution of the observed maximum surface air temperature with a lead time of 000

**图 6.** 地面气温预报时效 000 对应时效最高气温的概率分布

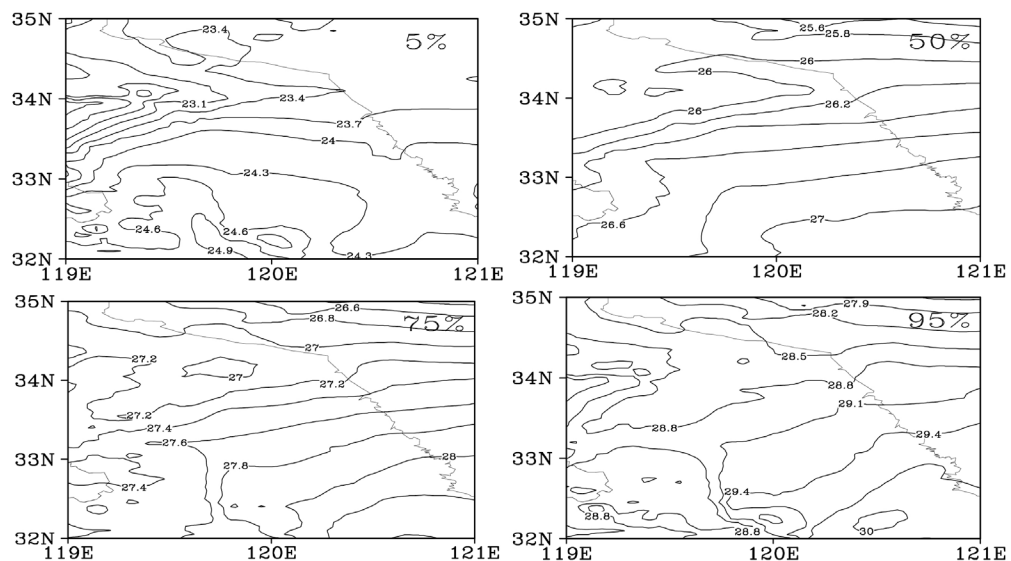
各地分布情况,将不同概率下的预报值作为温度预报的参考值。**图 8** 给出了气温概率分布的空间分布特征,给出不同概率下的温度分布(5%, 50%, 75%, 95%),从低概率到高概率,可以清晰看出,温度随着的概率的增加而升高。陆地和海洋相比,陆地温度的上升幅度会比较大,这与海陆热力性质的差异有很大关系。





**Figure 7.** The spatial probability distribution of the observed surface air temperature with a lead time of 000

**图 7.** 预报时效 000 对应时效地面气温观测值的概率分布



**Figure 8.** The spatial distribution of surface air temperature in probability of 5% - 95% in leading time 000 at 08:00

**图 8.** 地面气温 08 时起报 000 预报时效下不同概率下(5%~95%)的温度分布

## 5. 总结

本文利用 ECMWF、GFS 两个模式的 BMA 预报结果进行 2 米气温 0~96 h 的概率预报研究，得到以下几个结论：

1) BMA 方法对于 0~96 h 预报时效不仅可以提供确定性结果也可以做出概率预报，对于确定性结果，ACC、RMSE、误差在 1°C 和 2°C 的预报准确率而言，预报技巧都有提高。对于概率预报，CRPS 预报技巧都有提高。

2) BMA 提供的确定性预报结果可在实际精细化预报中发挥作用。

3) BMA 概率预报, 提供的 80% 概率下的预报值可作为最高气温的预警。这对于夏季高温预警有很好的警示作用。

## 参考文献

- [1] Lorenz, E.N. (1963) Deterministic Non-Periodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 130-141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)
- [2] Lorenz, E.N. (1965) A Study of the Predictability of a 28-Variable Atmosphere Model. *Tellus*, **17**, 321-333. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v17i3.9076>
- [3] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [4] 矫梅燕. 天气业务的现代化发展[J]. 气象, 2010, 36(7): 1-4.
- [5] Epstein, E.S. (1969) Stochastic Dynamic Prediction. *Tellu*, **21**, 739-759. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v21i6.10143>
- [6] 杜钧, 邓国. 单一值预报向概率预报转变的价值: 谈谈概率预报的检验和应用[J]. 气象, 2010, 36(12): 10-18.
- [7] Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., et al. (2005) Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles. *Monthly Weather Review*, **133**. <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
- [8] 智协飞, 彭婷, 王玉虹. 基于 BMA 方法的地面气温的 10~15 d 延伸期概率预报研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 627-636.
- [9] 智协飞, 王晶, 林春泽, 等. CMIP5 多模式资料中气温的 BMA 预测方法研究[J]. 气象科学, 2015, 35(4): 405-412.
- [10] 智协飞, 彭婷, 李刚, 等. 多模式集成的概率天气预报和气候预测研究进展[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 248-256.
- [11] Cressman, G.P. (1959) An Operational Objective Analysis System. *Monthly Weather Review*, **87**, 367-374. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1959\)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2)

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ccl@hanspub.org](mailto:ccl@hanspub.org)