

陈法敬, 矫梅燕, 陈静. 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究[J]. 气象, 2011, 37(1): 14-20.

一种温度集合预报产品释用方法的初步研究^{*1}

陈法敬¹ 矫梅燕² 陈 静³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局, 北京 100081

3 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 数值天气预报技术与能力在不断地发展与提高, 集合预报是数值预报发展中的一个热点。集合预报产品所提供的大量预报信息, 需要通过合适的产品释用处理来传递给用户, 因此对集合预报产品进行解释与应用是实现其实用价值的一个重要环节。选取武汉站 00:00 UTC 地面气温(T_{2m})作为预报量, 利用其历史观测资料及 2008 年 1 月份 TIGGE 资料中的 NCEP 120 h 集合预报资料, 基于单一数值预报产品的贝叶斯统计处理技术——贝叶斯输出处理器(Bayesian Processor of Output, BPO), 对 NCEP 集合预报各成员进行 BPO 建模, 获得了各成员贝叶斯概率预报, 研究了 NCEP 集合预报各成员在 2008 年 1 月份对武汉站 00:00 UTC T_{2m} 的 120 h 预报能力差异。基于各成员有效信息评分(Informativeness Score, IS), 尝试对各成员贝叶斯概率预报进行融合, 获得了代表 NCEP 集合预报不确定性的集成贝叶斯概率预报。初步试验结果表明, NCEP 集合预报各成员具有不同的预报性能, 各成员贝叶斯概率预报之间存在较明显差异, 这种基于 BPO 的集合预报产品释用方法, 可以将集合预报不确定性量化为一个集成贝叶斯概率预报, 从而实现集合预报的概率化。

关键词: 集合预报, 预报不确定性, 概率预报, 贝叶斯输出处理器 BPO

A New Scheme of Calibration of Ensemble Forecast Products Based on Bayesian Processor of Output and Its Study Results for Temperature Prediction

CHEN Fajing¹ JIAO Meiyang² CHEN Jing³

1 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: Numerical weather prediction (NWP) techniques and ability are developing constantly and the ensemble prediction is a very important part of NWP. An appropriate interpretation process is needed to convey the mass information provided by ensemble prediction to users, thus the interpretation and application of ensemble prediction products are important to realize their utilitarian value. The 00:00 UTC surface temperature at Wuhan Station is selected as the predictand, and its historical observation data as well as NCEP 120 h ensemble prediction data from TIGGE data during January 2008 are used to establish BPO model for each NCEP ensemble member based on a statistical process technique, which is the Bayesian Processor of Output (BPO). The member Bayesian probabilistic forecast is obtained and the performance difference among members is studied. The member Bayesian probabilistic forecasts are integrated into an integrated Bayesian probabilistic forecast which quantifies the ensemble prediction uncertainty according to the weights depending on member Informativeness Scores. The analysis of initial experiment results shows that the performances of ensemble members are different from each other, so are the member Bayesian

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706001, GYHY200906007);国家自然科学基金面上项目(41075035)共同资助

2010 年 3 月 13 日收稿; 2010 年 7 月 27 日收修定稿

第一作者: 陈法敬, 主要从事数值预报产品释用研究. Email: chen fj@cma.gov.cn

probabilistic forecast. This new interpretation scheme based on BPO can quantify the forecasting uncertainty of an ensemble prediction, and then a Bayesian integrated probabilistic forecast can be obtained.

Key words: ensemble prediction, forecasting uncertainty, probabilistic forecast, BPO (Bayesian Processor of Output)

引 言

随着天气预报技术与能力的不断提高以及社会的发展,气象因素在国民经济的很多方面所起的作用越来越重要^[1-2]。基于更准确、全面的天气预报信息进行各种活动的决策,将会产生更高的经济价值及社会效益或避免更大的损失。杜均等^[3]指出不能定量地把不确定性表达出来的预报是不完备的,而决策分析理论也表明,更加客观地反映人对大气状态未来发展趋势认识状态的概率预报,较之确定性预报具有更高的实用价值。因此为用户提供概率天气预报是天气预报服务发展的方向^[4-7]。

集合数值天气预报是天气预报向概率天气预报发展过程中的重要一步^[8-10]。其思想是针对模式初值及物理过程参数化等方面的不确定性进行扰动,产生一组预报值并借此表达数值预报的不确定性。集合预报的扰动情况反映了人们对大气状态发展变化的认识状况,扰动效应表现为集合成员间的相互关系。集合预报产品释用就是要基于包含着集合预报系统预报性能的历史预报资料,从集合预报产品中,提取出可以量化表达预报不确定性的概率预报。

随着集合预报技术的发展,现在已存在多种集合预报产品释用技术方法,如:邮票图、集合平均、集合离散度、面条图、概率烟羽图、各种聚类方法等^[11],金荣花等^[12]采用 Ward 聚类法开发了我国集合预报系统的聚类产品,严明良等^[13]提出了几种基于超级集合思想的多模式数值预报动态变权集成处理方法。在这些产品释用技术方法中,多数只对集合预报结果进行处理,这使得历史预报资料中的集合预报性能信息没有得到利用;有些虽然利用了历史预报资料,但其处理结果不是概率预报,并不能反映预报不确定性。最近,陈朝平等^[14]在贝叶斯概率决策理论的基础上,利用四川境内 1951—2004 年 147 站暴雨的气候概率,对西南区域中尺度集合预报模式提供的 50 mm 以上集合降水概率预报产品进行了修正,提高了四川暴雨预报准确率。因此有必要寻找一种能从历史预报资料中提取可用信息,

从而将预报不确定性信息定量化为一个概率预报的集合预报产品释用新方法。

本文首先介绍预报不确定性及一种基于贝叶斯统计理论,可以利用历史观测及预报资料,将单一数值预报产品处理为一个可以量化表达该产品预报不确定性的概率预报技术——贝叶斯输出处理器(Bayesian Processor of Output, BPO)^[15];基于单一数值预报产品概率化技术 BPO,将一次集合预报结果融合为一个集成贝叶斯概率预报;最后对这种集合预报产品释用新思路进行了初步试验验证。

1 预报不确定性及 BPO 简介

1.1 预报不确定性及其量化

由于模式初值及物理过程参数化等方面存在不确定性的原因,导致数值天气预报模式的预报值总具有预报不确定性。如果数值模式的预报值无不确定性,即对于模式每次输出的同一个预报值 x ,实况都为同一个值,则此数值模式的预报性能就表现为图 1 中的那条“Perfect forecast”曲线。但实际情况是,对于模式多次输出的同一确定预报值 x ,其与历史观测值构成的样本点并不重合,而是构成了 x 值下的一些离散样本点,这说明一个确定的预报值是具有预报不确定性的。

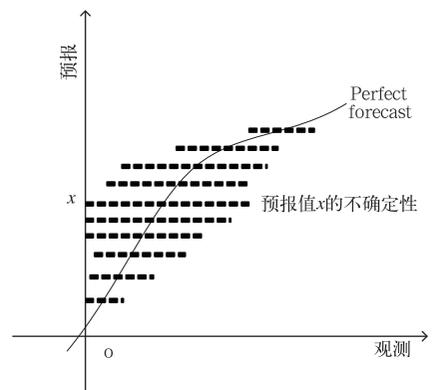


图 1 单一数值预报的不确定性示意图
Fig. 1 The concept of uncertainty of single NWP forecasts

不同预报值 x 下, 样本点的分布情况并不相同。预报样本中所有样本点的分布状况, 即预报值、观测值之间的统计关系, 反映了数值模式的预报性能。预报值 x 下的样本点分布情况代表了 x 的预报不确定性, 因此可以将样本点的分布定量化为一个概率密度函数形式的条件概率预报, 其信息来源有两个: 预报值 x 及来自历史预报样本的预报不确定性信息。这样, 就可以将预报信息 x 转化为其预报不确定性的量化表达——概率预报, 此概率预报可以向用户传达一种更完善的预报信息。

1.2 BPO 简介

贝叶斯输出处理器 BPO 通过建立一个数值模式的概率预报模型, 将该模式的一个确定预报值转化为一个概率预报, 这个概率预报是该预报值预报不确定性的量化表达。

下面介绍采用单一预报因子(即模式的单一预报值)的连续型预报量 BPO。记预报因子 X (模式 120 h 温度预报值)的边缘概率密度函数为 $k(x)$, 预报量 W (武汉站 00:00 UTC T_{2m} 的 120 h 预报)的边缘概率密度函数为 $g(w)$, X 的条件概率密度函数为 $f(x|w)$, W 的似然密度函数也记为 $f(x|w)$, X 与 W 构成的二维随机变量 (X, W) 的联合概率密度函数记为 $h(x, w)$ 。由贝叶斯定理有关系式:

$$\phi(w|x) = \frac{h(x, w)}{k(x)} = \frac{f(x|w)g(w)}{k(x)} \quad (1)$$

贝叶斯公式(1)中的 $\phi(w|x)$ 就是模式预报值 x 下的概率预报(概率密度函数形式)。由于对不同的预报量 W , 代表不同模式预报性能的 $h(x, w)$ [或 W 的似然模型 $f(x|w)$]是不同的, 即历史样本表现出的 X, W 间的统计依赖结构是多种多样的, 因此难以找出某一解析函数 $h(x, w)$ [或 $f(x|w)$]来表征这些统计依赖结构。也就是说, 在原始预报变量的概率密度空间, 建立数值模式的一个具有较强适用性的预报性能模型, 从而求得 $\phi(w|x)$ 是难以实现的。

对此, Krzysztofowicz 等^[15]基于贝叶斯统计理论, 开发出了模式产品统计处理技术——BPO。其主要思想是, 通过正态分位数转换(Normal Quantile Transform, NQT)^[16], 将满足单调似然比要求的原始预报变量 X 与 W 的历史预报与观测样本, 从原始概率密度空间变换到转换预报变量的二维正态分布概率密度空间, 建立 W 的似然模型, 利用贝叶斯公式(1)推导出转换预报量的概率预报公式, 再

利用 NQT 的逆及其雅克比式, 将概率预报公式转换回原始概率密度空间, 从而得到原始预报量的概率预报公式 $\phi(w|x)$, 以及代表预报因子 X 预报能力的有效信息评分(Informativeness Score, IS)。现在 BPO 已逐渐在水文、气象等领域得到重视和应用^[17-19]。

应用贝叶斯输出处理器 BPO 时, 首先要从历史观测资料中求取预报量的先验概率分布 $G(w)$, 从单一数值预报的历史预报资料中求取预报因子的边缘概率分布 $K(x)$, 然后利用预报因子与预报量的联合样本求得似然参数与后验参数。BPO 利用预报值 x , 将预报量 W 的先验(气候)概率密度函数 $g(w)$ 修订为后验概率密度函数 $\phi(w|x)$ (图 2)。BPO 概率预报公式有三种形式^[15], 后验概率分布函数形式为:

$$\phi(w|x) = Q \left\{ \frac{1}{T} [Q^{-1}G(w) - c_1 Q^{-1}\bar{K}(x) - c_0] \right\} \quad (2)$$

$\phi(w|x)$ 表示在已知模式预报值 x 的情况下, 预报量小于 w 的概率; 后验概率密度函数形式为:

$$\phi(w|x) = \frac{1}{T} \exp \left\{ \frac{1}{2} [Q^{-1}G(w)]^2 - [Q^{-1}\phi(w|x)]^2 \right\} g(w) \quad (3)$$

$\phi(w|x)$ 表示在已知模式预报值 x 的情况下, 预报量出现在 w 处的概率密度; 后验概率分位数函数形式为:

$$w_{p|x} = G^{-1} \left\{ Q [c_1 Q^{-1}\bar{K}(x) + c_0 + TQ^{-1}(p)] \right\} \quad (4)$$

$w_{p|x}$ 表示在已知模式预报值 x 的情况下, 预报量小于 w 的概率为 p 。在以上各式中, Q^{-1} 是标准正态分布函数 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\zeta^2/2} d\zeta$ 的逆, 两者都有近

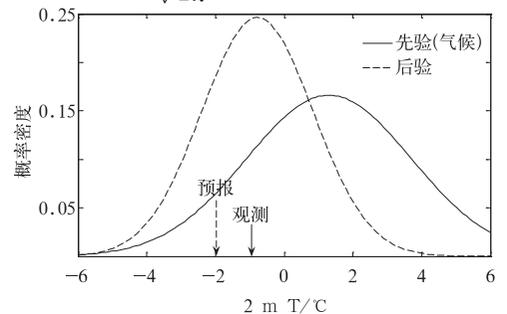


图 2 数值预报、先验(气候)概率密度函数及后验概率密度函数
Fig. 2 The NWP forecast, the prior (climatic) probability density function and posterior probability density function

似表达式, q 为标准正态分布的概率密度函数, 后验参数 $c_1 = \frac{a}{a^2 + \sigma^2}, c_0 = \frac{-ab}{a^2 + \sigma^2}, T = (\frac{a}{a^2 + \sigma^2})^{1/2}$; 其中 a, b, σ 是似然参数。预报因子的有效信息评分 IS (Krzysztofowicz 提出的贝叶斯相关评分^[20]):

$$IS = [(\frac{a}{\sigma})^{-2} + 1]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其值取决于信噪比: $|a|/\sigma$; $|a|$ 是预报信息指标, σ 是噪音指标。 IS 的值域为 $(0, 1)$, 其值越大, 则预报因子的预报能力越强^[19]。

2 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究

2.1 基于 BPO 的集合预报产品释用思路

针对模式初值或物理过程的不确定性进行扰

动, 得到的一组集合预报结果是对预报不确定性的一种离散形式的表达。由于预报不确定性的存在, 每个成员预报都有可能与实况一致, 具有一定的预报信息。同时, 对于不同地域(或站点)、时间(如 1 月份或冬季)的不同预报量, 集合预报中的某些成员会比其他成员具有更高的预报能力。这说明, 各成员具有区别于集合预报的不同预报性能, 集合预报的预报不确定性体现为各成员预报不确定性的一定形式的融合。因此, 为得到一次集合预报结果的预报不确定性, 可以基于集合成员预报能力的高低, 进行各成员预报不确定性信息的融合。具体来说就是, 对于某一次集合预报, 先利用 BPO 对各成员预报不确定性进行定量化, 得到一组成员贝叶斯概率预报, 然后基于依赖于各成员 IS 值的权重, 将这组成员贝叶斯概率预报融合为一个定量地表达本次预报不确定性的集成贝叶斯概率预报。释用思路见图 3。

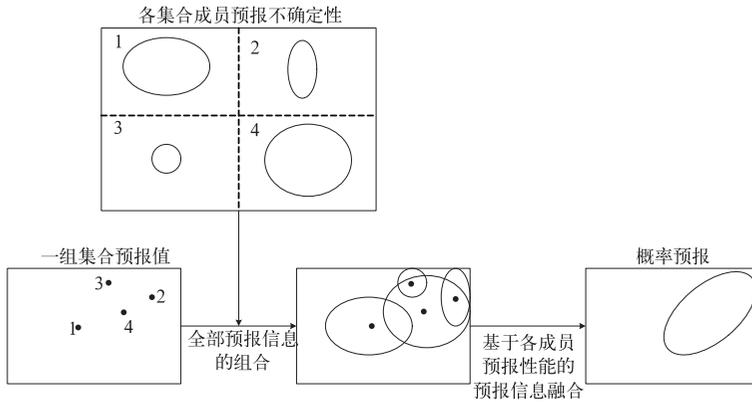


图 3 基于 BPO 的集合预报产品释用思路示意图

Fig. 3 Sketch map of the interpretation scheme for ensemble prediction based on BPO

2.2 温度集合预报产品释用公式

将每一个集合成员视为一个单一的数值预报进行 BPO 建模, 利用历史观测资料、集合预报资料, 建立集合预报的一组成员贝叶斯概率预报公式。首先利用这组预报公式, 将一次集合预报的温度预报值 (x_1, \dots, x_n) 转化为一组概率预报:

$$\bar{X} = (x_1, \dots, x_n) \rightarrow \{\phi_i(\omega | x_i) | i = 1, \dots, n\} \quad (6)$$

然后基于各成员的有效信息评分 IS 值, 将体现各成员预报不确定性的成员贝叶斯概率预报 $\{\phi_i(\omega | x_i) | i = 1, \dots, n\}$, 融合为一个可以反映集合预报整体预报不确定性的概率预报——集成贝叶斯概率预报:

$$\phi(\omega | \bar{X}) = \sum_{i=1}^n \phi_i(\omega | x_i) r_i(IS_i) \quad (7)$$

根据基于 BPO 的集合预报产品释用公式(7), 预报量在 ω 处的概率密度(集合预报的预报不确定性)是各成员概率密度(各成员预报不确定性)的加权平均, 权重系数 $r_i(IS_i)$ 依赖于成员 i 的预报能力 IS_i 。

3 初步试验

3.1 试验资料

在对基于 BPO 的集合预报产品释用方法进行验证的初步试验中, 预报量 W 选为武汉站 00:00 UTC 地面气温, 预报因子 X 选为 NCEP 集合预报

成员(共 20 个集成员,记控制预报为第 21 个集成员)对武汉站 00:00 UTC T_{2m} 的 120 h 预报。

为预报量 W 选定的气候资料为:1980—2008 年,每年 1 月份武汉站每日 00:00 UTC T_{2m} 历史观测值(预报系统开放实验室提供);为预报因子 X 选定的历史预报资料为:2008 年 1 月 6 日至 2008 年 2 月 5 日(其中 1 月资料用于建立成员贝叶斯概率预报公式,2 月资料用于独立试验),武汉站每日 00:00 UTC T_{2m} 的 NCEP120 h 集合预报资料(来自 TIGGE 资料)。

由于 T_{2m} 具有明显的年周期性,记一年中第 k 天的预报量为 W_k (1 月 1 日, $k=1$),其逐日气候概率分布 $G(W_k)$ 随时间 k 变化。为符合 BPO 对预报量统计平稳性的要求,将 W_k 进行标准化^[19]:

$$W = \frac{W_k - m_k}{s_k} \quad (8)$$

其中, m_k, s_k 分别为 T_{2m} 在第 k 天的气候均值、标准差。

3.2 试验结果

3.2.1 贝叶斯概率预报

利用以上历史观测资料、集合预报资料,针对 NCEP 集合预报每个成员,建立成员贝叶斯概率预报公式,并得到各成员预报能力指标 IS 。在本次试验中,将释用公式(7)中的权重系数取为:

$$r_i(IS_i) = \frac{IS_i^3 - \min(\vec{IS}^3)}{\sum_{i=1}^{21} IS_i^3 - 21 \cdot \min(\vec{IS}^3)} \quad (9)$$

其中, $\vec{IS}^3 = (IS_1^3, \dots, IS_{21}^3)$ 。

利用建立各成员贝叶斯概率预报公式和释用公式(7),以及独立的 NCEP 集合预报资料,对 2008 年 2 月 1 日—2 月 5 日武汉站每日 00:00 UTC T_{2m} 进行 120 h 概率预报试验。图 4 所示为, NCEP 集合预报第 1、15 个成员对 2008 年 2 月 1 日武汉站 00:00 UTC T_{2m} 的 120 h 预报、对应的贝叶斯概率预报、NCEP 集合预报平均、先验(气候)概率密度函数、集成贝叶斯概率预报及集合预报值的正态分布拟合结果。

由图 4 可以看到,集合预报的一组预报值所表达的预报不确定性(图 4 正态分布拟合结果 Ensemble)与成员贝叶斯概率预报及集成贝叶斯概率预报(图 4 正态分布 Integrated)的预报不确定性是很不

相同的,前者的概率密度具有不太合理的高集中度。NCEP 集合预报第 1、15 个集成员预报值为 -2.0 $^{\circ}\text{C}$ 、 -3.1 $^{\circ}\text{C}$,分别被这两个成员的 BPO 处理为均值 -0.8 $^{\circ}\text{C}$ 、 -1.4 $^{\circ}\text{C}$,标准差均为 1.6 $^{\circ}\text{C}$ 的正态分布形式的概率预报,观测值为 -0.8 $^{\circ}\text{C}$,集成贝叶斯概率预报为均值 -1.8 $^{\circ}\text{C}$ 、标准差为 1.2 $^{\circ}\text{C}$ 的正态分布。独立试验结果(略)表明各成员贝叶斯概率预报均值相对于各成员预报值均有调整;各成员贝叶斯概率预报具有不同的标准差,第 1 个成员的最大,为 1.6 $^{\circ}\text{C}$,第 4 个成员的最小,为 0.7 $^{\circ}\text{C}$,这说明各集成员具有明显不同的预报不确定性。集成贝叶斯概率预报的标准差居于各成员贝叶斯概率预报标准差的中间位置附近,表明各成员预报不确定性对集合预报的预报确定性都有一定程度的贡献。

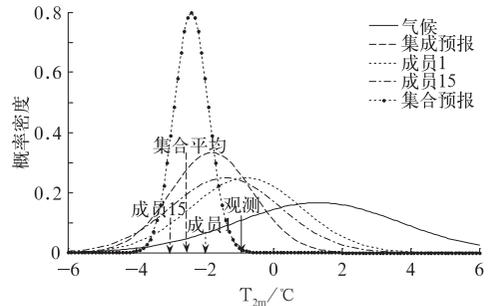


图 4 NCEP 集合预报第 1、15 个成员对 2008 年 2 月 1 日武汉站 00:00 UTC T_{2m} 的 120 h 预报、对应的成员贝叶斯概率预报、集合平均、气候分布、集成贝叶斯概率预报及集合预报值的正态分布拟合结果

Fig. 4 The first and the 15th 120 h member forecast of NCEP ensemble prediction, member Bayesian probabilistic forecast, ensemble mean, climatic distribution, the integrated Bayesian probabilistic forecast and the normal distribution fitted for ensemble forecasts of 00:00 UTC T_{2m} at Wuhan Station on February 1, 2008

3.2.2 集成员预报性能

为检验各集成员及其贝叶斯概率预报的预报性能,利用已经建立各成员贝叶斯概率预报公式及所有集合预报样本,对 2008 年 1 月 6 日至 2008 年 2 月 5 日(检验期)武汉站 00:00 UTC T_{2m} 进行 120 h 概率预报试验,利用历史观测资料对预报结果进行检验,部分检验结果如图 5 所示。从图 5 中可以看到,本次试验中第 1 个成员的 IS 值最小,为

0.72,第4、9个成员的 IS 值最大,为 0.95。各成员贝叶斯概率预报均值相对于观测值偏差的检验期平均值,基本(除第20个成员外)都小于对应成员预报偏差的检验期平均值。在以 IS 值衡量的一个集合成员预报能力中,预报不确定性占据了非常重要的地位。随着 IS 值的增大,代表预报不确定性大小的概率预报标准差明显减小,而代表系统偏差大小的概率预报均值相对于观测值偏差的减小并不显著。集成贝叶斯概率预报均值相对于观测值偏差的检验期平均值为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其标准差检验期平均值为 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。整体检验结果(略)表明,各成员贝叶斯概率预报标准差较好地表达了各成员预报不确定性的大小。

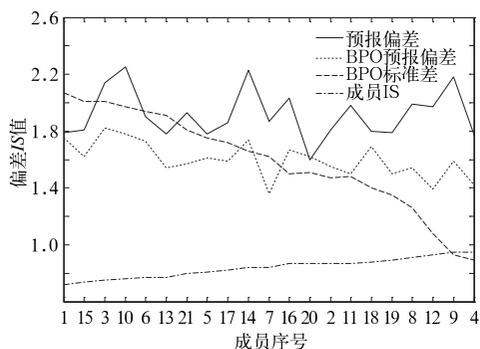


图5 NCEP集合预报各成员预报偏差($^{\circ}\text{C}$)、贝叶斯概率预报均值偏差($^{\circ}\text{C}$)和标准差($^{\circ}\text{C}$)及 IS 值在检验期的平均值

Fig. 5 Mean values of NCEP member forecast deviation, deviation of Bayesian probabilistic forecast mean, standard deviation of Bayesian probabilistic forecast and IS during verification period

3.2.3 概率预报发布形式

对于如图4所示概率密度形式的概率预报,有人很关注应该将它以何种形式发布给用户或公众,担心有些用户不能顺利接受和使用这种形式的预报信息。对于使用精细决策模型的用户来说,这种形式的预报是完善的,是可以接受并利用的;对于一些不需要如此精确、全面预报不确定性量化信息用户来说,让他们理解并利用这样的预报信息,可能还存在着现实困难,因此需要对这种概率预报形式做一些变换和解释。

概率预报所涉及的概率,即可能性的量化,表示的是对某一事件形式的认知状态:概率等于0.5,对应于所认知的事件形式是最模糊的,不确定性最

大;概率等于1或0,对应于所认知的事件形式是最清晰的,无不确定性;介于0.5与概率端点(0或1)间的不同概率值,代表着所认知事件形式的不同清晰程度,即人对事件表现为某一种形式的不同相信程度。

对于图4中所示单峰概率密度函数形式的概率预报,可以转换为如下几种简化形式的概率预报^[21]:(1)定概率中央可信区间(fixed-probability Central Credible Interval, 定概率 CCI),例如,图4中集成贝叶斯概率预报的50% CCI为 $[-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}, -1.0\text{ }^{\circ}\text{C}]$,90% CCI为 $[-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}, 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}]$;(2)定宽度中央可信区间(fixed-width Central Credible Interval, 定宽度 CCI),例如,图4中集成贝叶斯概率预报的 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ CCI为59%,即观测值出现在 $[-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}, -0.8\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 中的概率是59%;(3)累积概率,例如,根据图4中的集成贝叶斯概率预报,实况低于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的概率分别为43%、75%、93%。因此可以根据用户的特点与需求,将图4中的集成贝叶斯概率预报转换为多种简化形式的概率预报信息再提供给用户,只要他们接受概率(可能性)的概念即可。

4 结 语

通过利用历史观测资料、集合预报资料,对基于BPO的集合产品释用新思路进行试验验证,得到以下主要结论:

(1)可以通过对各集合预报成员分别进行BPO建模,确定其预报不确定性,从而将它的一个成员预报转化为一个可以表达该集合成员预报不确定性的贝叶斯概率预报。

(2)各集合成员预报能力存在差异。2008年1月6日至2月5日期间,在中国南方持续低温、雨雪的天气情况下,NCEP集合预报成员4、9、12对武汉站00:00 UTC T_{2m} 具有较高的5天预报能力。

(3)通过赋予具有不同预报能力的各成员贝叶斯概率预报一定形式的权重(依赖于各成员 IS 值),进行各成员贝叶斯概率预报信息的融合,得到预报不确定性的量化结果——连续概率密度函数形式的集成贝叶斯概率预报。

(4)可以从概率密度函数形式的概率预报提取出多种简化形式的概率预报信息。

将武汉站00:00 UTC T_{2m} 及每个集合成员的概

率分布都选定为正态分布,这是为参数估计方便而采取的权宜之计,它们应有更佳的近似分布(偏态分布);此次试验样本长度仅为 1 个月,较小的样本量可能导致存在较大的 BPO 建模偏差;由于可用样本较短,检验样本包含了 BPO 建模样本,检验结果的代表性不是很强。下一步的工作将会针对试验中存在的上述缺陷进行改进,并准备将试验范围扩展至 TIGGE 资料中的三个主要集合预报中心:NMC、NCEP、ECMWF,以对这里提出的温度集合预报产品释用新思路进行更深入的验证与检验。

参考文献

- [1] 李泽椿,毕宝贵,朱彤,等.近 30 年中国天气预报业务进展[J].气象,2004,30(12):4-10.
- [2] 矫梅燕.天气业务的现代化发展[J].气象,2010,36(7):1-4.
- [3] 杜均,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.
- [4] 陆如华,裘国庆.天气概率预报的科学性及其应用前景[J].气象,1995,21(11):3-6.
- [5] 高拴柱,张守峰,钱传海,等.基于位置误差的分布制作热带气旋路径袭击概率预报[J].气象,2009,35(9):38-43.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李小泉,刘金达,汪迎辉.集合预报及其在中期天气预报中的应用[J].气象,1997,23(8):3-9.
- [9] 陈静,陈德辉,颜宏.集合数值预报发展与研究进展[J].应用气象学报,2002,13(4):497-507.
- [10] 李泽椿,陈德辉.国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用[J].应用气象学报,2002,13(1):1-15.
- [11] 毛恒青,陈谊,陈德辉.基于神威中期集合预报系统的产品开发[J].应用气象学报,2001,13(1):47-55.
- [12] 金荣花,田伟红,矫梅燕.基于 Ward 聚类法的中国业务集合预报系统的产品开发[J].气象,2007,33(12):9-15.
- [13] 严明良,缪启龙,沈树勤.基于超级集合思想的数值预报产品变权集成方法探讨[J].气象,2009,35(6):19-25.
- [14] 陈朝平,冯汉中,陈静.基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用[J].气象,2010,36(5):32-39.
- [15] Krzysztofowicz R, Maranzano C J. Bayesian processor of output: probabilistic quantitative precipitation forecast[OL]. <http://faculty.virginia.edu/rk/BPO.htm>.
- [16] Krzysztofowicz R. Transformation and normalization of variates with specified distributions[J]. Journal of Hydrology, 1997, 197:286-292.
- [17] 张洪刚,郭生练,刘攀.基于贝叶斯方法的实时洪水校正模型[J].武汉大学学报(工学版),2005,38(1):58-63.
- [18] Kelly K S, Krzysztofowicz R. A bivariate meta-Gaussian density for use in hydrology[J]. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1997, 11:17-31.
- [19] Krzysztofowicz R. Probabilistic forecasts from the national digital forecast database[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23:270-289.
- [20] Krzysztofowicz R. Bayesian correlation score: a utilitarian measure of forecast skill[J]. Monthly Weather Review, 1992, 120(1):208-219.
- [21] Wilks D S. Statistical methods in the atmospheric sciences[M]. UK: Elsevier, 2006:302.