

黄治勇, 张文, 陈璇, 等. 湖北省乡镇温度预报方法初探[J]. 气象, 2011, 37(12): 1578-1583.

湖北省乡镇温度预报方法初探^{*1}

黄治勇¹ 张 文² 陈 璇² 孟英杰² 王继竹²

1 武汉暴雨研究所, 武汉 430074
2 武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 为了提高精细站点温度预报水平, 本文在中尺度模式精细化温度预报的基础上, 结合 MOS 分县客观预报结果, 采用带海拔高度的距离权重温度插值方法, 经过灰色预测模型修正温度预报误差, 对湖北省 717 个四要素自动观测站的 72 小时内日高低温度进行了精细化预报, 并且利用乡镇自动站温度观测进行了检验。结果显示: 对于没有历史观测资料的站点, 采用此预报方法, 预报效果明显高于模式预报结果, 基本接近客观预报方法, 可以进行业务应用。对湖北的四要素自动观测站温度检验的结果还表明: 鄂西北的预报误差最大, 江汉平原的预报效果最好; 从分月预报情况来看, 高低温度都是夏季和初秋预报效果最好, 低温预报冬春季预报效果最差, 湖北各个区域趋势基本都一致, 而高温的预报却没有一致的趋势。

关键词: 气温预报, MOS 方法, 中尺度模式, 灰色预测模型, 气温插值

The Study of Township Temperature Forecast in Hubei Province

HUANG Zhiyong¹ ZHANG Wen² CHEN Xuan² MENG Yingjie² WANG Jizhu²

1 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074
2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: To improve fine temperature forecasting, based on the result amending of MM5 by grey dynamic model, and using the temperature interpolation methods with altitude and distance weight, the high and low temperatures in 72 hours at 717 automatic weather stations with 4 meteorological elements in Hubei Province, are forecasted on the basis of the MOS technique and the mesoscale model and tested by observations. The results show that the test score in this method to the stations without historical data is better than that by the mesoscale model and is approximate to that by the MOS technique, thus this method can be used in actual operations. The test also indicates that the forecasting difficulty in northwestern Hubei is the most compared with other areas and is the least in the Jiangnan Plain. In this method, the forecasting errors of the lowest temperature in autumn and spring are more than those in other seasons, and the prediction errors are the smallest in summer. Meanwhile, the trends of low temperature are similar in five areas of Hubei. However, the change trends of maximum temperature forecasting are inconsistent in these areas.

Key words: temperature forecast, MOS technique, mesoscale model, grey prediction model, temperature interpolation

引 言

经济发展和 社会进步对天气预报精度需求日益

增高,开展“定时、定点、定量”的精细化预报是目前天气预报业务发展的重要内容之一。所谓精细化预报是指在数值预报产品的基础上,从时间和空间上提高天气预报的分辨率,将目前业务上以县为单位

^{*} 公益性行业(气象)科研专项经费 GYHY200906012 资助
2011 年 1 月 5 日收稿; 2011 年 4 月 11 日收修定稿
第一作者: 黄治勇, 主要从事天气预报技术研究, Email: hzyqxj@126.com

的预报精细到以乡镇为单位,“定时、定点、定量”地制作高时空分辨率的天气预报^[1]。

目前,精细化预报方法有两种,一是以数值预报产品为基础,采用统计学方法(MOS、PP 或卡尔曼滤波等方法)建立预报方程,实时制作温度、降水、相对湿度、风向风速等气象要素预报^[2-6];二是通过中尺度数值模式提高时空分辨率的方法来实现^[7-10]。这些预报方法在精细化预报业务系统方面取得了实质性进展,较原模式预报水平有显著提高。统计学方法预报准确率高于数值模式直接输出的结果,由于受历史资料限制,其空间分辨率只能到县。数值模式预报在空间上可以到乡镇,但是预报准确率满足不了业务需求。因此,在实际工作中,乡镇气象要素精细化预报成为当前天气预报的难点之一。

目前,针对无历史资料地点的精细化温度预报研究也有一些工作^[11-13],主要以统计方法为主,而且没有观测资料的检验。本文针对缺少历史观测资料的乡镇站点,将统计学方法和中尺度数值模式相结合,建立了以统计释用产品为基础,以动力模式产品为补充的乡镇逐日最高、最低气温预报系统,并且利用近几年快速发展的乡镇自动气象观测站的温度观测结果进行检验,结果显示预报效果明显高于模式预报结果,接近客观预报方法,可以应用于精细化温度预报业务。

1 所用资料

本文研究所使用的资料为:T639 数值模式资料、湖北省 717 个四要素自动站逐时观测资料、地面常规观测资料。

2 温度预报模型的建立

2.1 预报模型概述

影响某一地点气温的因素很多,除了气象因子外,其他比较明显的因素有海拔、植被、地形坡度、地形坡向等,更精细的因素比如边界层湍流、热岛效应等^[14-15]。地面气象因子对温度的影响由 MOS 分县客观预报方法进行描述,非气象因子对温度的影响由中尺度模式进行考虑,因此,乡镇站点温度预报可以表述如下式:

$$T = T_1 + \Delta T'_1 + \Delta T'_2 \quad (1)$$

式中, T 代表乡镇站点的温度预报; T_1 为中尺度数值模式得到的乡镇温度预报; $\Delta T'_1$ 为利用 MOS 分县客观预报方法的温度预报对中尺度模式的温度预报进行修正,即客观预报误差修正; $\Delta T'_2$ 为在客观预报方法修正的基础上,结合实况观测修正站点的温度预报,即观测误差修正。

本方法将 MOS 分县预报当作最优背景场,即误差最小,在实际工作中,还可以用预报员的主观预报来代替 MOS 预报,则问题转化为:一是求取数值模式的预报误差,二是研究从格点场到预报点之间的插值技术,三是利用观测进行快速拟合。

首先,采用统计学方法建立分县气象要素预报模型,对湖北省 78 个常规观测站的 3 天日最高最低气温进行预报,作为最优背景场;其次,利用中尺度数值模式输出结果,采用带海拔高度的距离权重地面气温插值法求得乡镇站点 T_1 和常规观测站点的高低温度预报,从而得到湖北省 78 个观测站 MOS 预报与模式预报的误差;然后,对观测站点预报误差温度插值,得到模式预报误差场 $\Delta T'_1$,对乡镇站点温度预报场 T_1 进行第一次修正,对于观测站点来说,即 MOS 分县预报的结果;最后,采用灰色预测模型方法结合实况观测再次修正自动站温度预报,即得观测误差修正 $\Delta T'_2$,从而得到乡镇站点的温度预报值。图 1 给出站点预报流程图。

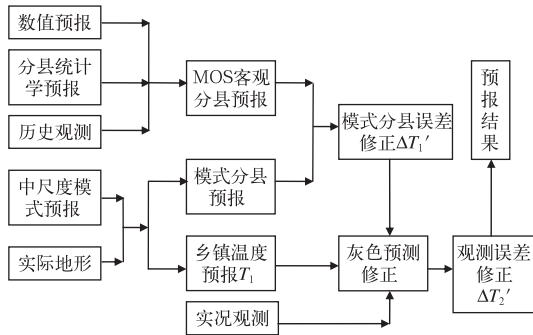


图 1 乡镇站点气温预报方法流程图

Fig. 1 The flow chart of temperature prediction method at township site

2.2 MOS 方法

2.2.1 方法思路

针对湖北省有温度观测记录的 78 个常规自动气象站,采用 MOS 预报方法^[16]建立逐站最高、最低温度预报模型:首先选取建立方程的时间段,通常根

据气候背景,按照不同的季节建立不同的方程,自然季节划分为春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12—2月)。将模式数值预报资料中选取的候选因子向量与同时间段内要预报站点的最高、最低温度实况结合,采用多元因子逐步回归的方法^[17],建立各个预报站点各时间段内与最高、最低温度对应的预报方程。最后在日常预报时,将每日 T639 预报资料插值到各个预报站点,由预报资料中各个因子值结合相应的预报方程,即可得到各常规站点的最高、最低温度预报值。

2.2.2 预报因子的选取

从 T639 数值预报模式的历史资料中,挑选出一部分具有鲜明物理意义的基本因子,经过组合、加工以及对非线性要素进行线性化处理,得到 888 个因子作为初选预报因子场。对这些不同站点、不同时间段的预报因子,分别采用内插法将格点预报值插值到站点,形成各个站点的初选因子资料。预报量则选取相对应的同时次湖北省 78 个常规自动站最高、最低温度观测资料。为保证因子质量,提高所建方程的准确度,根据相关分析和相关检验原理,计算初选因子与预报量之间的相关系数,按能通过 0.05 显著性 t 检验的标准对初选因子进行排序筛选,同时控制入选因子的数量,不同站点、不同时间段分别建立最优预报因子库,最后建立与实况高低温度对应的分季逐站逐日回归方程。其中,观测实况按照 1 个站 1 年的标准建立 1 个文件;数值预报因子按照 1 年 1 个因子 1 个层次 1 个时效的标准建立 1 个文件。

2.3 中尺度模式(MM5)

对于精细化预报的站点,由于缺乏相应的温度观测资料,不能直接采用 MOS 方法建立预报方程来得到预报结果,因此,以 MOS 方法为基础,采用数值预报产品插值为补充的方法来得到这些非常规站点的温度预报。

T639 运用于湖北省数值预报业务系统,在业务工作中取得了良好的效果,但模式的分辨率 30 km × 30 km,仍然达不到精细化站点气象要素预报的要求,而中尺度数值模式 MM5 采用非静力平衡动力框架,网格点密度较大,经双向嵌套,水平格距可提高到 10 km,因此有必要将 T639 资料与 MM5 相结合,提高空间分辨率实现乡镇站点温度预报。MM5 模式运行以 T639 预报资料作为模式运行的初始场和边界场,并将每天地面常规观测资料和高空探空资料

进行同化处理,用作初始场的订正,经模式运行,得到网格点较细的预报值,然后将预报值插值到各个站点上,基本能反映出各个站点的气象信息。

2.4 地面气温插值

2.4.1 气温插值方法介绍

在格点和站点温度的转换过程中,采用了带海拔高度的地面气温插值方法——根据最近邻域法和反向距离法的基本原理,利用空间卷积算法,采用结合中国大陆气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重方程,适合中国陆地区域的地面气温插值方法^[18]。

插值算法将高斯滤波算子作为距离权重方程,并且出于计算效率的考虑,设定一个有效作用距离,即截断距离,如果一个测值点与插值目标点的距离大于算子的截断距离,则其测值对目标点的贡献为 0。因此,最终的权重方程为:

$$W_{(r)} = \begin{cases} 0 & r > R_p \\ \exp\left[-\left(\frac{r}{R_p}\right)^2 a\right] e^{-a} & r \leq R_p \end{cases} \quad (2)$$

式中, $W_{(r)}$ 为当测值点与目标点水平距离为 r 时测值对目标点的贡献权重; R_p 为截断距离; a 是一个与气象要素的距离相关性衰减率有关的参数,即高斯形态系数, a 越大,表明该气象要素的距离相关性的衰减率越高。

湖北省东西部地形差别大,常规测站分布密度不均匀,中东部测站一般距离 20~30 km,西部的一般距离 50 km 左右,按照最近邻域法原理,不同站点的截断距离 R_p 应该不同,测值点密集地区过大的 R_p 不是很有必要,而在测站稀少的地区则有可能造成插值结果的可靠性降低,因此,要求对每一个目标点采用递归算法来计算截断距离 R_p 。

首先定义一个插值目标点邻域内测值点数量的统计平均值 N ,并且设定 R_p 的初始值 R_0 ,其次计算以目标点 p 为中心, R_p 为半径的区域内测值点分布密度 D_p ,

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\pi R_p^2} \quad (3)$$

式中, W_i 是式(2)中的权重, n 为邻域内测站数, \overline{W} 为邻域内测站的权重的平均值,其计算公式为:

$$\overline{W} = \frac{\int_0^{R_p} W_{(r)} dr}{\pi R_p^2} = \left(\frac{1 - e^{-a}}{a}\right) - e^{-a} \quad (4)$$

然后计算 R_p ，将其作为平均测站数量 N 与站点分布密度 D_p 的函数，其表达式为：

$$R_p = \sqrt{\frac{N^*}{D_p \pi}} \tag{5}$$

在递归循环中， $N^* = 2 \times N$ ，在最后一次循环中 $N^* = N$ ，然后将计算出的 R_p 代入式(3)，在式(3)~(5)之间循环 M 次。经过递归循环计算后的 R_p 代入式(2)重新计算各测站对目标点的插值权重。

由此，目标点气象要素 x 的插值结果 x_p 由以下公式计算：

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{6}$$

其中， x_i 为测值点 i 的要素测值， w_i 为测值点 i 对目标点 p 的插值权重， n 为目标点 p 的 R_p 邻域内的测值点总数。

对于气温来说，除了平面上的空间相关外，还有随高度的变化。取气温的垂直递减率 β 为其平均值 $-0.006^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ，这一数值是通常观测到的环境温度垂直递减率，同时也是许多大气环流等数值模式所选取的温度垂直递减率。经过插值站点和观测站点的高程数据修正之后的气温空间插值计算公式最终为：

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i [T_i + \beta(z_p - z_i)]}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{7}$$

其中， T_p 和 T_i 分别为目标点和测值点的气温； z_p 和 z_i 分别为目标点和测值点的高程。

上述关于气象要素空间插值算法中有 4 个参数，分别是初始截断距离 R_0 、计算截断距离 R_p 的递归循环次数 M 、目标点邻域内平均测站数 N 以及高斯形态系数 a 。经过对我国中东部地区气温的分析和检验，选取的参数如下：

$$R_0 = 250 \text{ km}; M = 3; N = 20; a = 6.0。$$

2.4.2 气温插值步骤

- (1) 应用公式(2)~(5)采用递归算法计算湖北省乡镇自动站点的截断距离 R_p ；
- (2) 将目标点和计算点的间距和截断距离 R_p 进行比较，在截断距离之内的计算点才可参与计算；
- (3) 依据公式(2)计算截断距离内所有计算点对某一目标点的权重系数；
- (4) 比较目标点和计算点之间高程差，利用温

度的平均垂直递减率 β 对计算点的温度进行高程修正；

- (5) 依据公式(7)计算目标点的插值温度。

2.5 灰色预测法观测误差修正

经过客观预报方法修正后的模式预报还存在两个问题：(1)模式对实际地形、地貌等的描述不够精确；(2)温度插值的平滑作用削弱了高低温度的预报精度。灰色预测方法可以将实际地形、地貌、边界层湍流等无法准确描述的信息作为灰色系统，把站点的实际温度作为已知的系统元素特征量，建立某站点和附近站点之间高温和低温实况的灰色预测模型^[19-20]。

首先采用灰色关联度分别分析了湖北省任一观测站点(包括自动站)和一定区域内的其他站点的高温、低温的相关程度；其次在灰色系统理论的 $GM(0, h)$ 模型的基础上，建立了湖北省有观测站点的高低温度预报方程；然后从数据库中提取前期时间序列长度为 n 的预报因子和预报量样本资料(3 个月份资料)。样本长度采用有限记忆法，即每增加一天新资料，就删除样本第 1 天资料，保持样本长度为一个定数。根据经验，取样本长度为 30 天左右即可。在此项工作中，取定数 n 为 31 天，将实时更新的样本资料代入灰色预测模型。最后，将经过 MOS 方法修正的乡镇站点温度预报代入预报方程，得到站点温度预报。

3 预报质量评定

目前，此方法在武汉中心气象台处于业务试运行阶段，每天运行两次，预报起始时刻为 08 时和 20 时。当前进行了湖北省有温度观测的自动站点预报温度检验，检验内容为 24、48 和 72 h 的高低温度，检验标准依照中国气象局温度 TS 评分标准，检验站点有 717 个，预报检验时间从 2009 年 10 月 1 日开始到 2010 年 9 月 30 日。

3.1 四种预报方法效果比较

本温度预报方法涉及中尺度模式分县温度预报、MOS 分县温度预报、MOS 订正后乡镇预报、灰色预测方法温度修正等过程，下面将最终预报结果和以上三个中间过程预报结果进行比较，采用 TS 评分方法，检验结果图 2 所示。

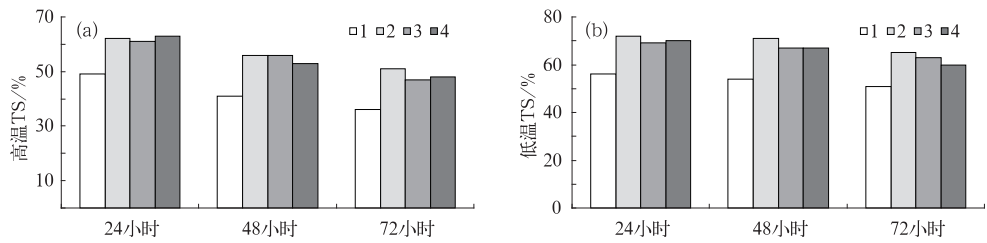


图 2 MM5(1)、MOS 分县(2)、MOS 乡镇(3)、灰色预测方法(4)高(a)、低(b)温度的 TS 检验
Fig. 2 The comparisons of test results to the high temperature (a) and low temperature (b) in 24 h, 48 h and 72 h by means of four methods

中尺度模式作为预报背景场,其预报结果最差,低温预报 TS 评分 24、48 和 72 h 从 60%~50%呈缓慢下降的趋势,高温从 50%~35%下降幅度更为明显,因此,在日常业务中,一般不直接使用中尺度模式的温度预报结果;MOS 分县客观预报方法目前在许多台站得到广泛业务应用,其使用对象为有多年历史观测资料的常规站点,准确率也在各种客观预报方法中最好,经过 12 个月的检验,低温 TS 评分 3 天内都在 65%以上,高温也都在 50%以上,和中尺度模式输出结果比较,TS 评分普遍高了 20%,预报效果增加明显;采用 MOS 预报方法对模式的乡镇预报结果进行修正,对高低温度预报的准确率都有明显改进;灰色预测模型可以利用加密观测自动站的温度观测信息,建立温度预报的快速拟合系统,对 24 小时的高低温度预报效果有所改进,随着时效的延长,预报效果略有下降。

3.2 湖北省分区预报检验结果

湖北省地形复杂,中部为江汉平原,东部为丘陵地带,西部为山地,温度预报差别较大,西部比中东部预报更难,湖北省按照多年气候特点划分为 5 个预报分区:鄂西北、鄂西南、江汉平原、鄂东南、鄂东北,下面对这 5 个分区进行乡镇站点温度预报检验。

3.2.1 分区预报结果比较

评估温度预报的改进情况采用平均绝对误差,一般认为,温度平均绝对误差 $\leq 2.5^{\circ}\text{C}$ 就具有可预报性,平均绝对误差越小,预报效果越好。

从湖北分区可以看到(图 3),无论是高温和低温,鄂西北的预报误差最大,高温和低温的平均绝对误差都要高于其他区域 0.3°C 以上,低温的平均绝对误差大于等于 2°C ,高温的预报效果更低,48 和 72 h 的平均误差都高于 2.5°C ,超出了温度预报可参考范围,这种情况和 MOS 方法对常规站点的温度预报效果相似,可预报性差一方面和这里的山地地形紧密相关,鄂西北是秦岭山脉的南麓,地形起伏大,温度预报难度大,另一方面,影响湖北省的西北路和北路冷空气一般沿着秦岭山脉南下,首先影响鄂西北地区,因此这里温度变幅大,也增加了预报难度;鄂西南虽然也是山地地形,平均海拔比鄂西北还高,但是由于有华中第一峰神农架的阻挡作用,一般强度的冷空气不会影响到这里,因此气温变幅小,预报难度较小;平均来看,江汉平原的预报效果最好,特别是低温的 24 和 48 h 预报明显低于其他区域,平均绝对误差在 1.5°C 左右,预报的可参考程度较高,江汉平原地势平缓,加上水体众多,热容量高,气温的变幅也较小。

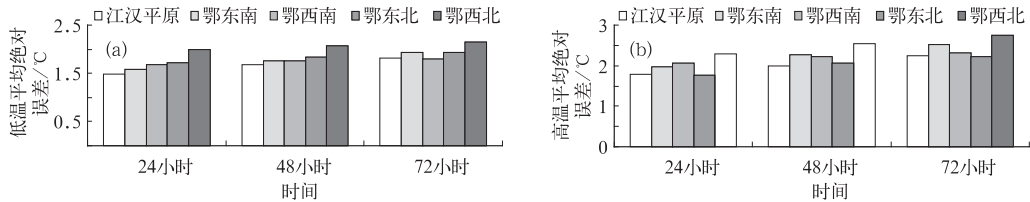


图 3 湖北省分区气温平均绝对误差检验:(a)低温,(b)高温
Fig. 3 The test of mean absolute error to the low temperature (a) and high temperature (b) in 24 h, 48 h and 72 hours in five areas of Hubei Province

3.2.2 分月预报效果评估

温度预报和季节的关系也很大,一般说来,天气

变化平稳的时候温度预报难度小,天气变化剧烈的时候气温预报难度大,对湖北省 12 个月的乡镇站点

温度预报按月分析评估预报效果,方法也是平均绝对误差;从上文分区温度评估来看,24 h 内预报效果最好,都在可预报范围内,因此,下面选取 24 h 内高低温的预报情况进行评估分析。

鄂西北的高低温预报误差普遍高于其他区域,从分月评估效果来看,鄂西北在 1、2 和 3 月的预报误差大大高于其他区域,这个时间正是冷空气从这里频繁南下的时段,气温变幅大,预报效果低于其他区域;从分月预报情况来看,低温从 10 月至 1 月呈现由好变差的变化趋势,湖北各个区域趋势基本都一致,由秋到冬冷空气势力逐渐加强,南下影响湖北的频率也逐渐增加,气温变幅逐步增大,预报的难度表现为增加的趋势,1—6 月冷空气的影响逐渐减弱,低温预报效果则表现为逐渐改善的趋势,6—9 则是盛夏少雨和初秋凉爽的季节,是 1 年中降水最少的时期,温度预报的效果也是最好的;从高温的预报效果来看,秋冬春季的预报效果没有一致的趋势,但是夏季和初秋仍然是预报效果最好的季节,各个区域也是如此(图略)。

4 小 结

本方法利用中尺度模式、MOS 分县客观统计方法及灰色预测统计模型等方法,利用带高程修正的空间距离权重插值方法,对湖北省乡镇站点进行了温度预报的研究,从 717 个自动站温度的实际检验来看,精细化预报方法明显改进了数值模式预报效果,是常规天气预报的有效补充。

(1) 中尺度模式作为预报背景场,其预报结果最差;MOS 分县客观预报方法和中尺度模式预报结果比较,TS 评分普遍高了 20%,预报效果增加明显;利用 MOS 方法对模式预报修正后,温度预报准确率明显提高,接近 MOS 预报。

(2) 利用 MOS 分县预报方法可以明显改善模式的精细化温度预报效果,对无观测的站点也适用,同时 MOS 分县预报也可以用主观预报等其他方法代替,预报效果也会随之提高。

(3) 对有观测的站点,灰色预测模型可以进一步改进 24 小时内的高低温预报效果。

(4) 从分区预报效果来看,鄂西北的预报误差最大,高温的 48 h 和 72 h 的平均误差都高于 2.5℃,超出了温度预报可参考范围;江汉平原的预报效果最好,预报的可参考程度高;其他区域介于两

者之间,但是平均绝对误差都低于 2.5℃,温度预报的可参考性较高。

(5) 盛夏和初秋降雨少,冷空气影响小,高低温预报效果都最好;而春季冷空气影响频繁,是 1 年中低温预报最难的季节,尤其是 1 月;高温预报除了盛夏和初秋其他季节则没有明显规律可循。

参考文献

- [1] 丁一汇,任阵海. 中国气象事业发展战略研究:气象与可持续发展[M]. 北京:气象出版社,2004:133-135.
- [2] 刘还珠,赵声蓉,陆志善,等. 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,2004,15(2):181-191.
- [3] 辜旭赞. 湖北省分县 MOS 预报系统建立与评分[J]. 气象,2008,34(2):43-51.
- [4] 赵玉广,李江波,康锡言. 用 PP 方法做河北省雾的分县预报[J]. 气象,2004,30(6):43-47.
- [5] 梁钰,布亚林,贺哲,等. 用卡尔曼滤波制作河南省冬春季沙尘天气短期预报[J]. 气象,2006,32(1):62-67.
- [6] 钱莉,兰晓波,杨永龙. 最优子集神经网络在武威气温客观预报中的应用[J]. 气象,2010,36(5):102-107.
- [7] 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.
- [8] 宋春远,熊传辉,罗剑琴,等. 数值预报产品在三峡坝区初夏强降水预报中的释用[J]. 气象,2009,35(6):96-99.
- [9] 王迎春,刘凤辉,张小玲,等. 北京地区中尺度非静力数值预报产品释用技术研究[J]. 应用气象学报,2002,13(3):312-321.
- [10] 许美玲,孙绩华. MM5 中尺度非静力模式对云南省降水预报检验[J]. 气象,2002,28(12):24-27.
- [11] 张洪亮,倪绍祥,邓自旺,等. 基于 DEM 的山区气温空间模拟方法[J]. 山地学报,2002,20(3):360-364.
- [12] 连志鸾,李国翠,卞韬,等. 基于多级相似-差额方法制作乡镇气温预报[J]. 气象,2008,34(5):113-117.
- [13] 李江萍,王式功. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用[J]. 气象,2008,34(6):41-45.
- [14] 李庆祥,黄嘉佑,董文杰. 基于气温日较差的城市热岛强度指标初探[J]. 大气科学学报,2009,32(4):530-535.
- [15] 袁淑杰,谷晓平,缪启,等. 贵州高原复杂地形下月平均日最高气温分布式模拟[J]. 地理学报,2009,64(7):888-896.
- [16] Facsimile Products: Max/Min temperature forecasts. National Weather Service Forecasting Handbook No. 1 (July 1979) [R]. U S Department of Commerce NOAA National Weather Service.
- [17] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2000.
- [18] 刘宇,陈泮勤,张稳,等. 一种地面气温的空间差值方法及其误差分析[J]. 大气科学,2006,30(1):146-152.
- [19] 涂松柏,李才媛. 灰色动力模型在天气预报中的应用[J]. 大气科学,1990,14(2):188-192.
- [20] 贺懿华,谌伟,李才媛,等. 武汉市盛夏高温气候特征和成因及预报[J]. 气象科技,2007,35(6):809-813.