

佟华,郭品文,朱跃建,等. 2014. 基于大尺度模式产品的误差订正与统计降尺度气象要素预报技术. 气象,40(1):66-75.

# 基于大尺度模式产品的误差订正与统计降尺度气象要素预报技术<sup>\*1</sup>

佟 华<sup>1</sup> 郭品文<sup>2</sup> 朱跃建<sup>3</sup> 王东勇<sup>4</sup> 刘志丽<sup>1</sup>  
陈国华<sup>2</sup> 李 莉<sup>1</sup> 盛 黎<sup>1</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081  
2 南京信息工程大学, 南京 210044  
3 美国国家环境预报中心, 马里兰 20740  
4 安徽省气象台, 合肥 230031

**提 要:** 应用自适应卡尔曼滤波方法, 对大尺度模式要素预报进行误差订正和降尺度精细化气象要素预报。并通过对订正系数科学选取的研究, 改进了滤波方法的应用效果。通过对大尺度模式系统进行误差订正, 改善了大尺度模式预报的准确率, 提高了模式要素, 如 2 m 温度、10 m 风等预报的精度, 并基于改善了的大尺度模式预报场和高分辨率观测场, 生成降尺度函数, 得到高精度的气象要素预报产品, 为精细化气象要素预报服务提供了有效的方法。

**关键词:** 模式产品误差订正, 卡尔曼滤波, 统计降尺度, 精细化要素预报

**中图分类号:** P456      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.008

## Bias Correction and Statistical Downscaling Meteorological Parameters Forecast Technique Based on Large-Scale Numerical Model Products

TONG Hua<sup>1</sup> GUO Pinwen<sup>2</sup> ZHU Yuejian<sup>3</sup> WANG Dongyong<sup>4</sup> LIU Zhili<sup>1</sup>  
CHEN Guohua<sup>2</sup> LI Li<sup>1</sup> SHENG Li<sup>1</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081  
2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044  
3 National Centers for Environment Prediction, MD 20740, USA  
4 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

**Abstract:** Using self-adaption Kalman filter method, bias correction of surface parameter products of large-scale numerical prediction system are done. Through studying the appreciated method of obtaining bias correction coefficient, the filter method is improved and the forecasts of large-scale model parameters such as 2 m temperature and 10 m wind are improved accordingly. Based on corrected large-scale model forecast field and high resolution observatory field, downscaling vector function is obtained, and refined statistical downscaling meteorological parameter forecasts are created and it is an effective way to do high resolution meteorological parameter forecasts.

**Key words:** bias correction of numerical model products, Kalman filter, statistical downscaling, refined meteorological parameter forecast

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006017)资助  
2013 年 3 月 10 日收稿; 2013 年 7 月 11 日收修定稿  
第一作者: 佟华, 主要从事数值预报模式后处理与产品的研究. Email: tongh@cma.gov.cn

## 引 言

实现气象要素的精细化预报,通常有两种方法。一是动力降尺度法,就是利用多重嵌套耦合的高分辨率的数值预报模式(薛纪善等,2008),它的优点是物理意义明确,可应用于不同的分辨率,但它的计算量大,区域嵌套模式的性能受边界条件的影响很大,应用于不同区域时需要物理过程和参数进行适应性调整,因此目前高分辨预报模式的预报效果还不能完全满足精细化预报和服务的需求,在省市一级气象业务部门应用难度较大。另一种方法是统计降尺度法,它与现有模式产品相配合,能较好地解决现有动力降尺度法的不足。常用的统计降尺度方法主要概括为包括多元线性回归方程、典型相关分析、奇异值分解及人工神经网络法等的转换函数法,它们大多数用于长期预报。如 von Storch 等(1993)较早使用统计降尺度模式预测了伊比利亚半岛的冬季降雨。Hewitson 等(1996),Zorita 等(1997)比较了多种降尺度方法及其应用。Kidson 等(1998)分别使用动力降尺度和统计降尺度方法两种方法预测新西兰的气候变化后认为,统计降尺度方法更高效,在很多方面显得较完美。还有一类是卡尔曼滤波方法,是使用二维快速同化分析场做为真值,生成降尺度矢量,这一方法已经在美国业务预报中得到广泛地使用(Cui et al, 2012; Toth et al, 2001)。以 NAEFS(北美集合预报系统)为基础的降尺度产品,目前的分辨率已达 5 km,产品包括 2 m 温度场、10 m 风场和地面气压场等。

利用统计降尺度方法进行模式产品精细化气象要素预报是在高精度的大尺度模式预报产品基础上进行的,要有一个理想的大尺度模式预报场,除了改进同化分析系统,提高模式预报能力以外,我们可以通过减小模式预报偏差和增强预报空间尺度的精细化来实现。一般的模式偏差是系统性的,有一定的趋势。因此,通过对模式结果和实况结果的统计处理可以订正这种偏差。如贺皓(1995)曾对位势高度场和温度场采用不同时间权重和空间平滑的订正方案,风场采用动力订正方案,湿度场采用平流(风场)订正方案,取得了令人满意的效果。魏文秀等(1998)用卡尔曼滤波技术对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)500 hPa 位势高度场进行多种订正试验,证明卡尔曼滤波双因子订正对于提高暴雨中期预报

能力是有效的。杨松等(2003)通过分析误差的特性,根据不同的物理量建立回归模型,去除模式的随机误差,取得了较好的效果。另外业务预报单位目前广泛使用的是 MOS(model output statistics)方法,它利用数值预报的输出结果通过回归方程来预报局地天气要素(Klein et al, 1974; 陈豫英等, 2005),这种方法需要利用长期稳定的模式预报结果来进行统计分析。在当前数值预报模式频繁的进行改进升级的实际情况,通常得不到一个相当长时间稳定不变的模式系统运行结果,使得统计分析的效果不能达到最优。取而代之目前在业务部门通常采用可以使用较短时间的模式历史结果就能进行的模式误差订正方法。美国环境预报中心(NCEP)的 NAEFS(北美集合预报系统)在对外发布模式产品之前对绝对大多数的要素产品通过使用自适应的卡尔曼滤波订正方法进行了误差订正,效果有显著提高,如 2 m 温度预报准确性提高近 3 d。而 ECMWF 通常在误差订正时采用卡尔曼滤波双因子订正方法(Persson, 1991; Persson et al, 1995),使得在地形陡峭或海陆交界处模式地形与实际地形差距较大的站点近地面要素的预报效果明显改善。李莉等(2011)和邱学兴等(2012)分别对 T213 全球集合预报系统和 T639 模式预报系统进行了卡尔曼滤波误差订正的研究,也取得了较好的效果。本文通过订正系数的研究,发展了利用卡尔曼滤波方法进行误差订正和降尺度预报,得到了可以在各省级业务部门应用的大尺度模式产品的误差订正方法、降尺度预报技术及精细化的气象要素预报方法,提高了精细化预报的服务能力。

## 1 卡尔曼滤波方法进行模式误差订正

卡尔曼滤波方法算法简捷,处理快速,具有订正系统误差的能力。系统误差是通过对模式预报偏差不断更新,并对不同时段预报偏差值加权平均而得到的(Kalman, 1960)。其由于不需要模式误差较长时间的统计规律而非常适用于模式系统的频繁升级和误差规律的不断变化,使得其在气象业务部门得到广泛的应用。因此采用卡尔曼滤波方法,对具有高斯分布特性的变量进行偏差估算后,做相应的一阶偏差订正。首先对此方法对误差订正的效果进行分析和试验。

1.1 方法介绍

一阶自适应的卡尔曼滤波方法,是通过不断对模式误差进行更新,而获得当时时刻的误差估计值,来降低偏差尺度。误差订正的步骤如下:

(1) 模式预报偏差估算值

$$b_{i,j}(t) = f_{i,j}(t) - a_{i,j}(t) \tag{1}$$

式中, $b_{i,j}(t)$ 为格点预报偏差,定义为检验区格点预报场资料  $f_{i,j}(t)$ 与对应的分析场场资料  $a_{i,j}(t)$ 的差异。 $b_{i,j}(t)$ 是随预报时效变化的。

(2) 逼近法确定权重平均的模式预报偏差

$$B_{i,j}(t) = (1 - \omega)B_{i,j}(t - 1) + \omega b_{i,j}(t) \tag{2}$$

式中, $B_{i,j}(t)$ 定义为权重平均后的模式预报偏差估算值,是通过两个不同时段的模式预报偏差加权平均而获得。使用离散逼近法,模式预报偏差估算值随时被更新。对这种时变加权预报平均误差研究表明,选择合适的权重因子  $\omega$  可帮助提取有用的预报偏差信息,确定最优系统平均加权误差,极大地提高预报准确率。

(3) 模式预报误差订正

$$F_{i,j}(t) = f_{i,j}(t) - B_{i,j}(t) \tag{3}$$

利用系统平均加权误差  $B_{i,j}(t)$ 对最新模式预报  $f_{i,j}(t)$ 进行预报误差订正,模式预报误差订正过程是针对不同预报时效,所有网格点进行的。

1.2 误差订正方法比较结果

使用上述误差订正方案,对 2010 年 6—7 月的 T639 全球预报模式的 2 m 温度预报进行误差订正比较试验,因为对模式格点场的订正是假定模式分

析场为真值,而实际上 2 m 温度的分析场因为是与模式地形密切相关的诊断量也会存在与模式预报场相近的系统误差。因此采用观测作为真值的站点场来进行比较试验。站点包括全国 995 个观测站。其中误差权重系数  $\omega$  参考 NCEP 的取值为 0.02。从 2 m 温度 1~7 d 预报的全国站点平均的均方根误差以及 24 h 预报均方根误差全国站点逐日平均可见(图 1),对于 24 h 预报,误差减小了 1.48℃,而对于 7 d 预报则减小 1.1℃。进一步分析此方法对于 2 m 温度的逐日订正效果,每天的 2 m 温度均方根误差订正效果都非常明显。对于全国各具体观测站而言(图 2),各个观测站都有不同幅度的改善,最大改善幅度为 10.7℃,从新疆阿合齐站 2010 年 6 月逐日的 2 m 温度预报订正前后与观测值比较为例,订正后预报值与观测非常接近,整体较订正前改善 6℃左右。

通过以上的的基础和成功经验,使用上述方案对国家气象中心全球集合预报业务系统 T213 进行模式误差订正。T213 集合预报系统是基于增长模繁殖法的 7 对扰动成员加控制预报共 15 个成员的集合预报系统,为中期天气预报特别是 5~10 d 的天气形势和地面要素预报提供了较好的参考。对每个成员的 2 m 温度和 10 m 风场分别对观测站点进行误差订正,误差订正系数依上述研究仍取为 0.02,订正时段为 2010 年 9 月至 2011 年 1 月。图 3 为 2011 年 1 月 2 m 温度预报集合平均订正前后的均方根误差比较。从图中可以看到,T213 集合预报 2 m 温度订正后的集合平均的均方根误差都较订正前有不同程度的减小;以 2010 年 12 月和 2011 年 1

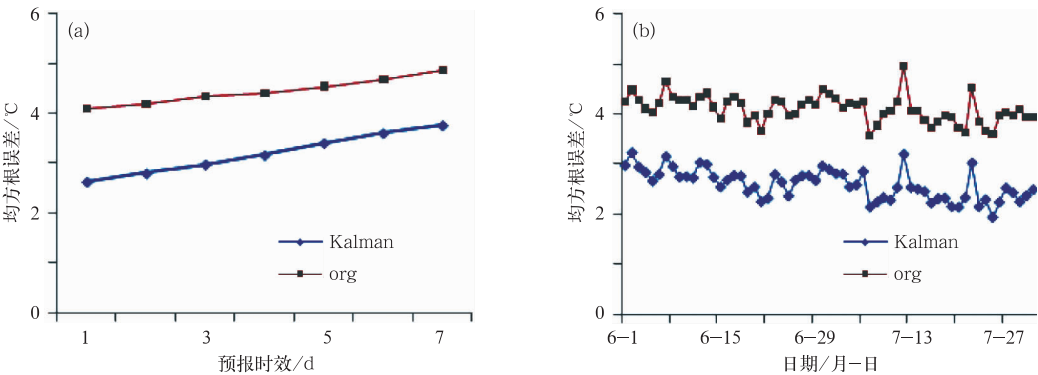


图 1 2010 年 6—7 月 T639 模式 2 m 温度预报均方根误差  
(a) 全国平均,(b) 24 h 预报逐日变化

Fig. 1 RMS error for T639 2 m temperature in June—July 2010  
(a) average in the whole country, (b) daily variation of 24 h forecast

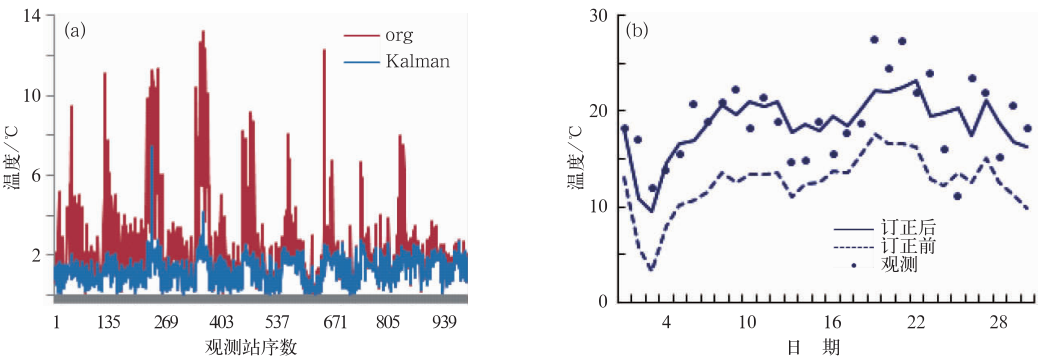


图 2 2010 年 6—7 月 T639 模式 2 m 温度 24 h 预报  
(a) 各站温度, (b) 新疆阿合奇站 6 月逐日温度

Fig. 2 24 h forecast for T639 2 m temperature in June—July 2010

(a) temperature in observation station, (b) daily variation in Xinjiang Aheqi Station

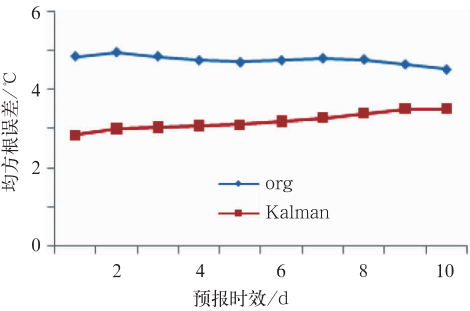


图 3 2011 年 1 月 T213 集合预报 2 m 温度  
集合平均订正前后的均方根误差比较  
Fig. 3 Comparison of RMS error for T213  
EPS 2 m temperature ensemble mean  
before and after calibration in January 2011

月的 2 m 温度预报为例,集合平均对 24 h 预报的均方根误差改善了 2℃,随着预报时效延长,误差订正

的幅度逐渐减小,到第 10 天订正使得误差改善了 1℃。

另外为度量系统的可靠性我们采用 Talagrand 方法对集合预报效果进行检验。根据集合预报的原理,在统计学意义上,系统中每个成员的出现是等概率的。那么如果在由  $k$  个成员按非降序排列后构成的  $k+1$  个区间(包括两侧的开区间)中,实况值落在上述每个区间的概率是相等的。基于这一思想, Talagrand 等(1995)构造了一种直方图,用实况值落在上述每个区间的时空累积频率来描述集合预报系统可靠性,一般称之为 Talagrand 分布。图 4 是 2011 年 1 月 T213 集合预报 2 m 温度 120 h 预报 Talagrand 分布及预报概率和理想概率偏差。从图中可以看到,2 m 温度集合预报存在冷偏差,即温度预报偏低。对照订正后的 Talagrand 分布可以看

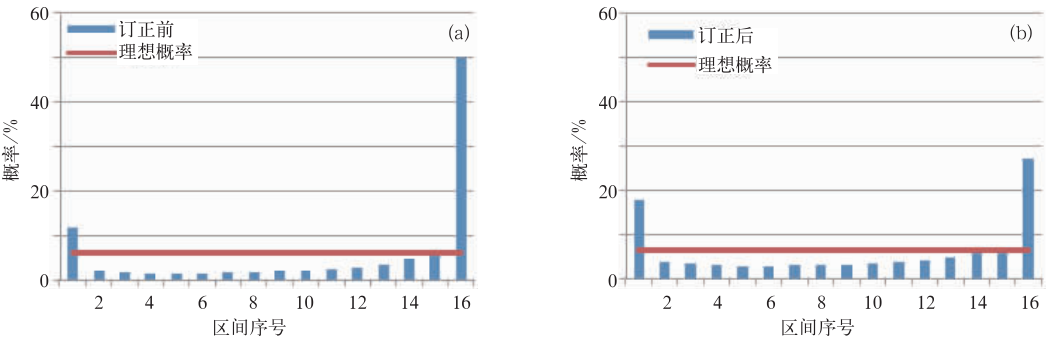


图 4 2011 年 1 月 T213 集合预报 2 m 温度 120 h 预报 Talagrand 分布  
及预报概率和理想概率偏差  
(a) 订正前, (b) 订正后

Fig. 4 Talagrand distribution of 120 h forecast for T213 EPS 2 m temperature before and after calibration in January 2011 and biases between forecast and ideal probability  
(a) before calibration, (b) after calibration

到,订正后的冷偏差明显减小,“真值”落在最大预报值外的概率由 50%减小到 28%,订正前第 1 区间和第 16 区间的预报概率高于理想概率,订正后的预报概率减小,比订正前接近理想概率。第 2~14 区间预报概率,订正后比订正前更加接近理想概率;第 15 区间,订正前后效果相似。可以认为,订正后 2 m 温度集合预报中绝大多数成员的预报概率都比订正前更加接近理想概率,集合概率预报的可靠性得到了改善。这说明各个集合成员预报等同性和“冷偏差”现象都得到了改善。2010 年 12 月结果相似。

对 10 m 风的检验表明此误差订正方法对近地面的风速也有类似 2 m 温度类似结论的改善(图 5~7)。10 m  $u$  风 10 d 预报的控制预报和集合平均的均方根误差都较订正前改善  $0.2\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 10 m  $v$  风则较订正前改善  $0.1\sim 0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而就 10 m 风的 120 h 预报 Talagland 分布则表明订正后

集合预报中绝大多数成员的预报概率比订正前更加接近理想概率,集合概率预报的可靠性得到了改善。

2 误差订正系数选取研究

2.1 选取方法

对于自适应的卡尔曼滤波的订正方程  $B_t=w\times (F-A)+(1-w)\times B_{t-1}$ ,式中  $w$  决定了近期多长时间的样本将对当天的预报订正产生影响,不同的  $w$  对应不同的权重变化曲线,对于不同的  $w$ ,曲线衰减速度是不同的, $w$  越大,衰减越快;另外,对不同的  $w$ ,同一天的样本资料对递减平均偏差的影响是不同的, $w$  越大,临近日期的样本所占的权重越大,距离订正日期时间较长的样本所占的权重越小;反之亦然。模式的不同网格点、不同的预报时次、不

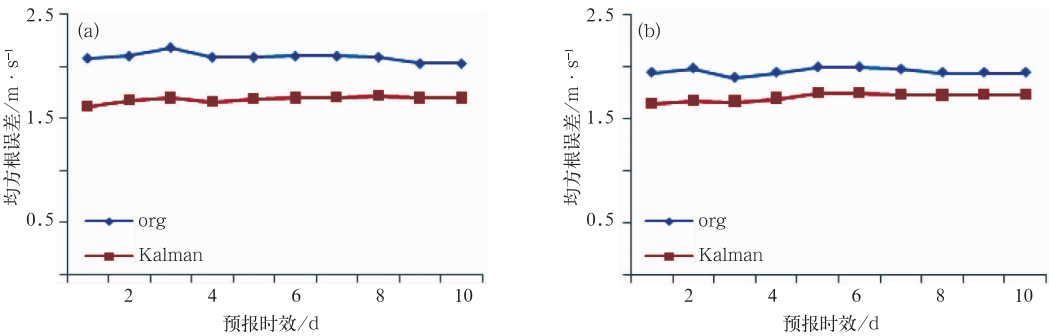


图 5 10 m 风集合平均订正前后的均方根误差比较  
(a)  $u$  风, (b)  $v$  风  
Fig. 5 RMS error of T213 EPS 10 m wind ensemble mean in January 2011  
(a)  $u$  wind, (b)  $v$  wind

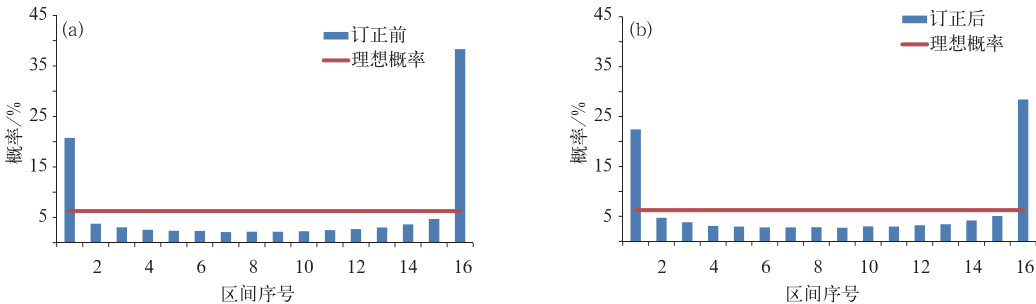


图 6 2011 年 1 月 T213 集合预报 10 m  $u$  风 120 h 预报 Talagrand 分布及预报概率和理想概率偏差  
(a) 订正前, (b) 订正后  
Fig. 6 Talagrand distribution of 120 h forecast for T213 EPS 10 m  $u$  wind before and after calibration in January 2011  
(a) before calibration, (b) after calibration

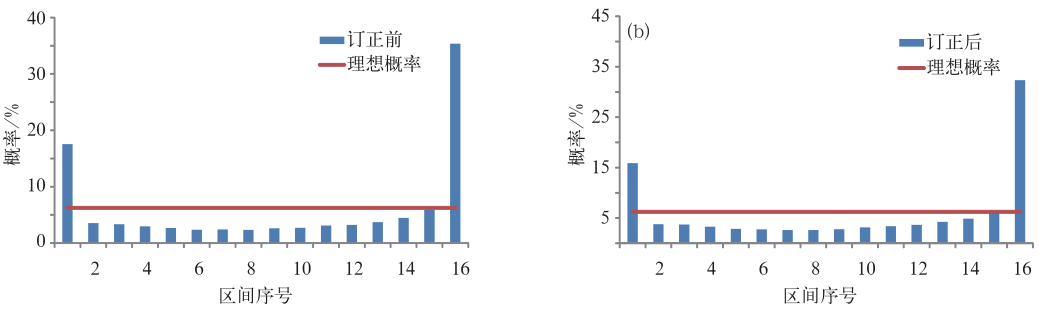


图 7 2011 年 1 月 T213 集合预报 10 m  $v$  风 120 h 预报 Talagrand 分布  
及预报概率和理想概率偏差  
(a) 订正前, (b) 订正后  
Fig. 7 Talagrand distribution of 120 h forecast for T213 EPS 10 m  $v$  wind  
before and after calibration in January 2011  
(a) before calibration, (b) after calibration)

同的物理量以及不同的天数都对应不同的递减平均偏差。

目前  $w$  通常的取法如下:通过试验分别取  $w$  为 0.01、0.02、0.03...0.99,比较所有点总的预报误差,使其达到最小来确定  $w$ ,它是不随时间、预报时效和位置改变的常值。依此方法使用 2009 年观测和预报资料,得到全国全年平均的  $w$  为 0.12。但这样处理对于 2 m 温度等受下垫面的环境和地形高度影响较大的量并不尽合理,因此改进订正系数  $w$  的取值方法,将其视为时间( $t$ )和空间( $n$ )的函数,分季节

使得各个观测站点上季节平均的预报误差最小来确定  $w$  的分布。使用 2009 年的 T639 模式预报与全国国家基本站 995 个站点的观测,得到分季节的  $w$  分布情况。

图 8 和图 9 分别为依此方法 1 和 4 d 预报的各季节  $w$  在全国观测站点的空间分布图。由图显示,不同季节、不同观测站点以及不同预报时效的误差订正系数都不相同,其中夏季的订正系数总体较小,而冬季平均而言最高。对于观测站而言中东部的系数较小,而在中国西部和南方部分站点的订正系数

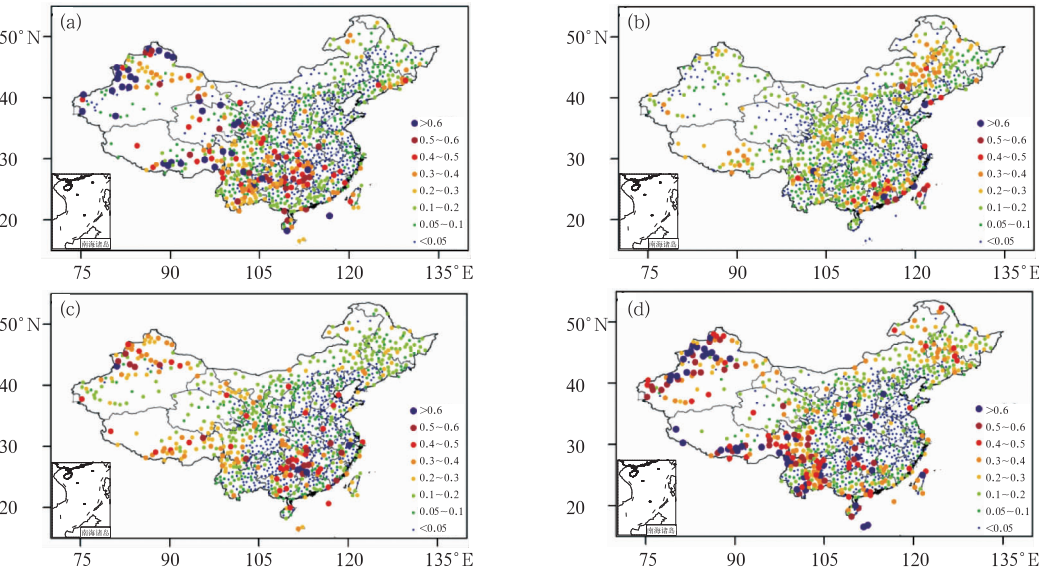


图 8 T639 模式 2 m 温度 24 h 预报各季节权重因子  $w$  在全国观测站点的空间分布  
(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季  
Fig. 8 Distribution of decaying weight in Chinese observation station for T639 2 m temperature 24 h forecast  
(a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter



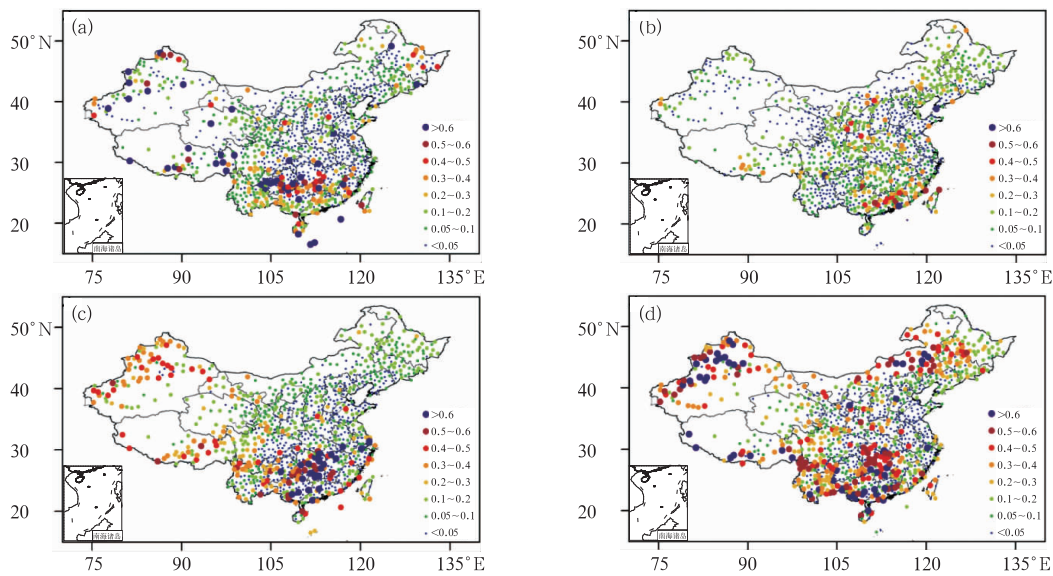


图 9 T639 模式 2 m 温度 96 h 预报各季节  $w$  在全国观测站点的空间分布  
(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 9 Distribution of decaying weight in Chinese observation station for T639 2 m temperature 96 h forecast  
(a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter

较高。这些都反映了由于在系数较高的地区温度的变化幅度较大,所以临近日期的样本所占的权重需要越大,距离订正日期时间较长的样本所占的权重越小。而对于不同的预报时效,各个季节总的趋势是随着预报时效的延长,订正系数有所增加,但总体的分布情况保持不变,这是因为随着预报时效的增加,温度预报的误差有所增加,临近日期的样本所占的权重也需相应的增加。

2.2 误差订正结果

根据上述研究利用卡尔曼滤波技术,使用各观

测站点、各季节平均的误差订正系数  $w$  对 2010 年一整年的 2 m 温度预报进行实际误差订正,得到 1~7 d 预报结果。图 10 为分别使用统一的最优误差订正系数以及随时间和观测站点变化的订正系数,2010 年各个季节的 2 m 温度 1~7 d 预报订正后均方根误差全国平均。由图所示,各个季节全国平均 2 m 温度均方根误差较  $w$  取定常值 0.12 时误差有所减小。温度预报误差随预报时效增加而增加,其中夏季和秋季的均方根误差在 1.8~2.6℃,冬季和春季误差为 2.2~3.3℃。图 11 为分别使用统一的最优误差订正系数以及随时间和观测站点变化的订

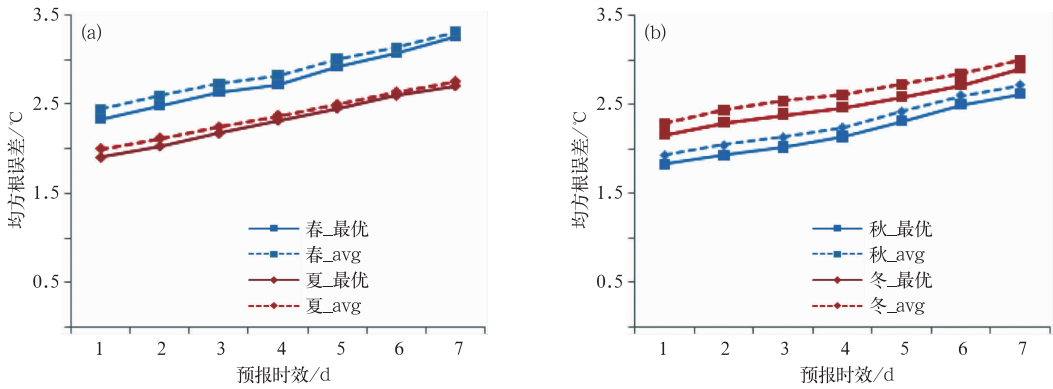


图 10 2010 年各季节使用最优系数 2 m 温度 1~7 d 预报订正后均方根误差全国平均  
Fig. 10 RMS error average in the whole country for 2 m temperature 1-7 d forecast using the optimal decaying weight in each season of 2010

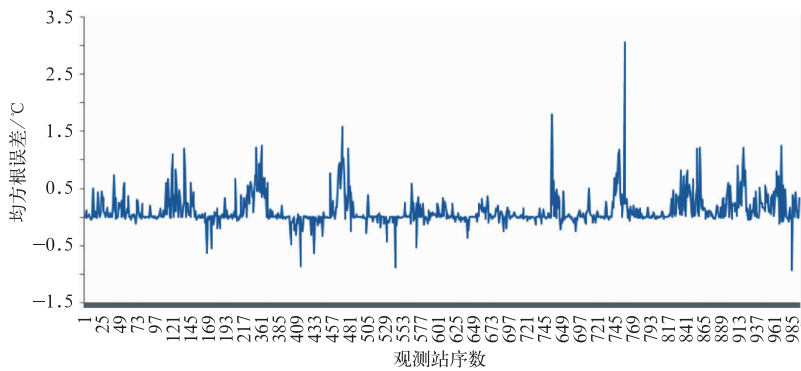


图 11 2010 年冬季全国各观测站 2 m 温度 24 h 预报  
订正前与订正后的差值

Fig. 11 The difference before and after calibration for 2 m temperature  
24 h forecast in the whole country in winter 2010

正系数,2010 年冬季全国各观测站 2 m 温度 24 h 预报平均均方根误差的差值。图 11 显示大多数站点使用改进的订正系数后订正效果都有改善,平均改善 0.15℃左右,改善最大的站点均方根误差减小 3℃,为新疆库什米站,计算出来的误差订正系数为 0.52,与定长值差异很大,改善明显。

3 统计降尺度精细化气象要素预报

3.1 方法和资料

统计降尺度技术是基于不同分辨率分析结果,建立低分辨率与高分辨率分析场的关系,生成降尺度矢量,通过降尺度矢量来提高低分辨率预报变量的精细化程度,满足公众对精细化预报产品的要求。因此降尺度产品依赖于大尺度模式预报的准确性以及高分辨率同化分析场的质量。降尺度矢量(即低分辨率与高分辨率分析场之间的差异)的生成借鉴了卡尔曼滤波方法,将过去时段的降尺度矢量  $DV(t-1)$  和最新时段的降尺度矢量  $DV(t)$  进行权重平均,估算出最优的降尺度矢量,并随时引入新的高低分辨率分析场差异予以更新。

$$DV(t_0) = (1 - w) \times DV(t - 1) + w \times DV(t)$$

(4)

降尺度过程是通过降尺度矢量来提高低分辨率预报变量的精细化程度。 $BF(t)$ 是低分辨率预报变量。

$$DF(t) = BF(t) - DV(t_0)$$

(5)

由于目前阶段下高精度的高分辨率地面要素分

析场技术仍不够成熟,分析场的质量不能满足要求,因此作为方法研究,仍然使用观测站点资料进行。与第 2 节保持一致,仍使用中国 995 个国家地面基准气象观测站 2009 年的温度观测数据。在全国较均匀地选取 100 站作为低分辨率预报场(F100)、500 站作为高分辨率分析场(A500)(图 12),如图所示,圆圈站为选取的低分辨率预报场站,代表粗网格已知的预报场,点站为高分辨率分析场,代表被预报的精细网格场。

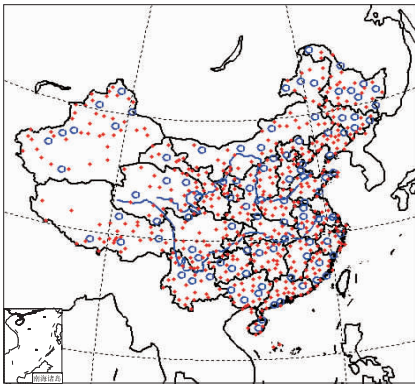


图 12 全国粗细网格观测站点示意图

Fig. 12 Schematic map of observation  
stations in coarse and fine mesh

3.2 预报结果

采用与第 1 节相同的自适应卡尔曼滤波方法对 T639 模式温度产品进行降尺度预报研究。首先,将 T639 格点模式产品插值到粗网格点上并进行误差订正作为低分辨率预报场,然后使用空间插值方法



插值到 500 站上,获取高分辨率预报场(F500)。

然后,将降尺度矢量  $DV$  定义为同一时刻  $f500$  与  $A500$  间的差值场。通过卡尔曼滤波方法对  $DV$  不断进行更新,从而获取当前时刻系统性偏差的估计值。最后,将  $t$  时刻的  $F500$  减去降尺度矢量  $DV$ ,即可得到  $t$  时刻的降尺度预报值。

同样根据 2.1 节中的研究成果,通过 2009 年全年 T639 2 m 温度预报,取全年全国预报总误差最小的  $w$  值 0.12 作为误差订正平均参数。使用 2010 年 T639 2 m 温度的预报,得到全国平均 2 m 温度预报的均方根误差随预报时效和季节的变化(图 13),由图可见,预报误差随着预报时效的增加而变大,且夏、秋季的误差明显小于春、冬两季,且均方根误差基本控制在  $1.8^{\circ}\text{C}$  以内,与 NCEP 业务化精细化预报误差水平相当。

另外我们通过分别将误差订正系数  $W$  在全国

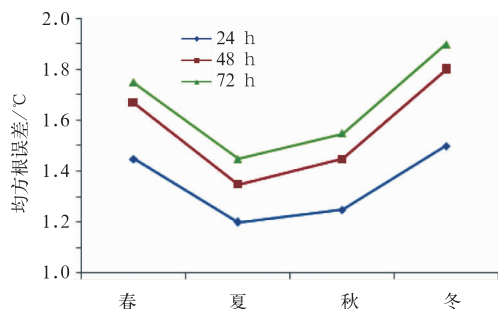


图 13 全国季节平均的 T639 2 m 温度 1~3 d 预报的均方根误差

Fig. 13 RMS error of 1~3 d forecast for seasonal average of T639 2 m temperature

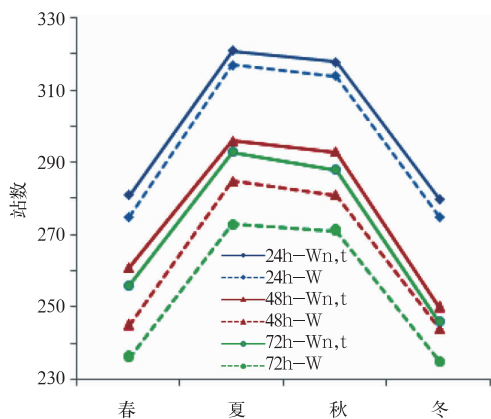


图 14 四个季节平均每日预报 绝对误差小于  $1^{\circ}\text{C}$  的站数

Fig. 14 Station number of daily average absolute error less than  $1^{\circ}\text{C}$  in four seasons

范围内统一取为 0.12 和取为如图 10 所示的季节和空间变化的函数进行 2010 年的 1~3 d 预报对比试验。图 14 为平均每日预报绝对误差小于  $1^{\circ}\text{C}$  的站数,可见误差减小的站数明显增加,四季自适应函数方案对于常值参数方案的提高是比较明显的,平均预报误差减少 5% 左右。

## 4 结论与讨论

本文通过使用卡尔曼滤波方法进行模式结果的误差订正试验以及误差订正系数选取方法的优化改进研究,对大尺度的 T213 集合预报系统以及 T639 全球中期数值预报系统的气象要素预报进行了误差订正。并使用同样方法,根据大尺度模式产品与高分辨率的气象要素分析场,建立降尺度函数,进行统计降尺度研究,获得了高精度的精细化气象要素预报场。主要得到以下几点结论:

(1) 利用自适应卡尔曼滤波方法,对数值预报模式要素预报结果进行误差订正,效果明显,均方根误差都较订正前有不同程度的减小;订正后 2 m 温度集合预报中绝大多数成员的预报概率都比订正前更加接近理想概率,集合概率预报的可靠性、各个集合成员预报等同性和“冷偏差”现象得到了改善。

(2) 改进自适应卡尔曼滤波误差订正系数,使得各个观测站点上的预报误差最小得到分季节的不同站点的  $w$  分布情况。结果表明,不同季节不同站点不同预报时效的订正系数存在着较大差异。使用此误差订正系数以及全国平均预报误差最小时取的订正系数 0.12,对 2010 年的 2 m 温度预报进行实际误差订正,得到 1~7 d 预报各个季节全国平均 2 m 温度均方根误差较  $w$  取定常值 0.12 时误差减小,其中夏季和秋季的均方根误差在  $1.8\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ ,冬季和春季误差为  $2.2\sim 3.3^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 采用自适应卡尔曼滤波降尺度预报技术,通过将 T639 大尺度模式产品降尺度来进行精细化气象要素预报。通过改进降尺度函数,利用精细化的观测场,使得 T639 大尺度模式产品降尺度来进行精细化气象要素预报的误差明显减小。

当前天气预报与服务迫切需求高精度高分辨率的气象要素预报产品。利用卡尔曼滤波技术,使用大尺度数值预报模式产品进行误差订正,得到较准确的大尺度气象要素预报场,然后利用高精度的高分辨率分析场,进行降尺度气象要素预报是实现这

一目的的重要途径。另外降尺度技术是以高精度的高分辨率的同化分析结果为基础的,它的有效应用依赖于实时中尺度观测分析。因此需要发展区域快速同化系统工程,特别是发展实时地面要素场,温度、风场等中尺度分析。

参考文献

陈豫英,陈晓光,马金仁. 2005. 基于 MM5 模式的精细化 MOS 温度预报. 干旱气象,23(4):52-56.

贺皓. 1995. 数值预报产品系统性误差的客观订正. 高原气象,14(2):198-206.

李莉,李应林,田华,等. 2011. T213 全球集合预报系统性误差订正研究. 气象,37(1):31-38.

邱学兴,王东勇,陈宝峰. 2012. T639 模式预报系统误差统计和订正方法研究. 气象,38(5):526-532.

魏文秀,仁彪,杨海龙,等. 1998. 卡尔曼滤波技术在暴雨中期预报中的应用. 气象,24(3):46-49.

薛纪善,陈德辉,等. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京:科学出版社,67-76.

杨松,杞明辉,姚德宽. 2003. 误差订正在预报集成中的应用研究. 气象,29(12):22-24.

Cui B Z, Toth Y Zhu, D Hou. 2012. Bias correction for global ensemble forecast. Weather Forecast,27(2):396-410.

Hewitson B C, Crane R G. 1996. Climate downscaling: Techniques and application. Climate Res,7:85-95.

Kalman R E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering,82(Series D):35-45.

Kidson J W, Thompson C S. 1998. A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. J Climate,11(4):735-753.

Klein W H, Glahn H R. 1974. Forecasting local weather by means of model output statistics. B Amer Meteorol Soc, 55(10):1217-1227.

Persson A. 1991. Kalman filtering—a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical forecasts. Lectures and papers presented at the WMO training workshop on the interpretation of NWP products in terms of local weather phenomena and their verification, WMO, Wageningen, the Netherlands, XX-27-XX-32.

Persson A, Strauss B. 1995. On the skill and consistency in medium-range weather forecasts. ECMWF Newsletter, 70:12-15.

Talagrand O, Vautard R. 1997. Evaluation of probabilistic prediction systems. Workshop on Predictability ECMWF.

Toth Z, Zhu Y. 2001. The Use of Ensembles to Identify Forecasts with Small and Large Uncertainty. Amer Meteorol Soc,16(4):463-477.

von Storch H, Zorita E, Cubasch U. 1993. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime. J Climate,6(6):1161-1171.

Zorita E, von Storch H. 1997. A survey of statistical downscaling techniques. GKSS report 97/E/20.