

文章编号:1673-8411 (2016) 03-0042-06

厦门地区地面气温的多模式集成统计降尺度预报研究

苏志重^{1, 2}, 赵欢³, 周学鸣^{1, 2}, 黄惠榕^{1, 2}, 吴陈锋^{1, 2}

(1.厦门市气象台, 厦门 361012; 2. 海峡气象开放实验室, 厦门 361012; 3.武汉中心气象台, 武汉 430074)

摘 要:利用双线性插值与线性回归方法、消除偏差集合平均(bias-removed ensemble mean, BREM)和多模式超级集合预报(Super-ensemble Prediction, SUP)方法对厦门地区的地面气温进行统计降尺度分析,结果表明:在 2013 年夏季的 3 个月中,降尺度后三个单模式对厦门地面气温的预报效果显著改善。使用多模式集成预报方法(BREM 和 SUP)后,预报误差进一步减小。对比整体预报效果最好的单模式 ECMWF,降尺度后 3~96h 预报误差均在 3℃以下。此外,结合 SUP 方法的降尺度预报能最大程度的改善地面气温的预报误差。

关键词:地面气温;多模式集成;降尺度;预报;厦门地区

中图分类号:P457.3

文献标识码:A

The multi-model super-ensemble statistical downscaling forecast of the air temperature of Xiamen District

Su Zhizhong^{1,2} Zhao Huan³ Zhou Xueming^{1,2} Huang Huirong^{1,2} Wu Chenfeng^{1,2}

(1. Xiamen Municipal Meteorological Service, Xiamen 361012, China; 2. Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen, 361012, China 3. Wuhan Meteorological center, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the ensemble mean outcomes from forecasts of the surface temperature 2 m over the ground in Xiamen, which were provided by ECMWF, GFS and T639 data archive, a statistical downscaling forecast was studied by using the interpolation, linear regression in conjunction with bias-removed ensemble mean (BREM) and multi-model super ensemble (SUP). The results showed that the statistical downscaling technique significantly improved the forecast skill of four single models during three months of 2013 summer. The SUP and BREM methods further reduced the errors of the single model downscaling forecast. The improvement percentage of the 3-96h forecast error of the downscaling forecast with BREM and SUP forecast schemes of the best single model ECMWF was below 3℃. In addition, the forecast skill of the statistical downscaling with SUP forecast was superior to that with BREM forecast.

Key words: surface temperature; multi-model super-ensemble; statistical downscaling; forecast; Xiamen District

引言

地面气温是气象部门的基础预报要素之一,随

着社会的发展,公众和专业用户对天气预报的精细化要求越来越高,准确提供精细化地面气温预报产品和服务已然成为气象业务发展的必然要求

收稿日期:2015-11-18

基金项目:中国气象局气象关键技术集成与应用项目 CMAGJ2013M23。

作者简介:苏志重(1982-),男,工程师,主要从事短期天气预报。

[1]。目前有两种途径可以制作精细化预报,一种是研发更高分辨率的数值模式,另一种是采用降尺度的方法[2]。数值模式方法虽然物理意义较为明确,但其计算量较大,硬件设施和技术要求较高;相对来讲,统计降尺度方法则是建立大尺度预报因子和小尺度预报变量之间的统计函数关系[3-4],其计算量较小,硬件要求较低,操作简易,更适宜在实际业务中推广实施[5]。

气象部门在实际业务中要结合多家预报中心的数值预报产品,然而不同数值模式的动力框架、分辨率、初始场、资料同化技术及物理参数化方案等方面存在差异,使得不同模式在模拟和预报能力上存在地理差异[6],因此,多模式集成技术的发展有效的减小了模式的系统误差[7]。多模式集成技术在我国有较多的研究和探讨,李倩等[8]应用 BP 人工神经网络技术,建立了 850hPa 高度区域温度集成预报模型,预报效果比单个模式效果理想。吴振玲等采用权重分配方法开展基于混合演化算法的多模式气温集成预报方法研究,结果表明气温集成预报模型预报误差明显小于任一成员[9]。近年来,国内许多研究利用多模式集合平均、消除偏差集合平均和多模式超级集合方法对地面气温、降水以及其它地面和高空要素进行了多模式集成预报,取得了很好的结果[10-12]。

在多模式集成和统计降尺度综合应用方面, Von Storch 等[13]最早提出了降尺度的概念并研究了如何将全球尺度气候变化降尺度到区域尺度。Krishnamurti 等[14]首先提出了统计降尺度与多模式超级集合(Multi-model Super-ensemble)相结合的方法,并将该方法应用到印度季风区降水预报中,显著提高了预报准确率。Frias 等[15]将多模式集合的统计降尺度方法对伊比利亚半岛的月最高温度进行预测,发现多模式集合的结果优于单模式。王亚男等[16]利用多模式集成预报进行降水量的统计降尺度试验研究,有效改进了各中心模式直接插值的预报效果和单中心集合平均预报场的降尺度预报效果。陈晓龙等[17]利用 TIGGE 资料对北半球地面气温进行统计降尺度试验,研究表明统计降尺度不仅能提高预报的分辨率,预报精度相比双线性插值的预报精度也有显著提高。王海霞等[18]利用逻辑回归方法首先对降水量预报进行处理,然后对降水量进行统计降尺度预报,进一步改善了预报效果,明显改善了降雨的空报现象。

以上前人的研究结果为厦门地区统计降尺度预

报提供了研究思路和可靠的技术方法。本文基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)、中国气象局(CMA)三个单模式的 2m 气温预报资料,采用统计降尺度法对厦门地区的地面气温进行精细化预报试验,从而为厦门市气象业务部门开展精细化预报提供有益的指导。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括 ECMWF 细网格预报产品、NCEP 的 GFS 和 CMA 的 T639 预报资料以及厦门市高精度的自动站观测资料。

多模式预报资料:ECMWF 的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、GFS 的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 和 T639 的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 预报产品,研究时间段为 2013 年 6 月 1 日—8 月 31 日逐日 08 时(北京时)起报的地面 2m 气温的预报资料,预报时段为 1-4d (2013 年 9 月 1 日—9 月 4 日),间隔 3h,预报区域为厦门地区(117.5°E — 118.5°E , 24°N — 25°N)。

观测资料:2013 年 6 月 1 日—9 月 4 日 117°E — 120°E , 23.5°N — 26.5°N 范围内 773 个区域自动站地面 2m 气温,该资料为福建省气象信息中心收集处理,经过了气候界限值检查、要素主要变化检查、要素内部一致性检查、要素时间和空间一致性检查等质量控制。利用中尺度气象资料客观分析系统[19],采用 Multiquadric 方法[20]将气温站点资料插值成网格分辨率为 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 的格点资料。

1.2 统计降尺度方案

地面气温的统计降尺度运算方法有以下三个步骤:

首先,采用双线性插值方法将上述三个模式的预报结果降尺度到细网格上,即在指定的预报区域内,将各模式预报值统一插值到 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 经纬网格上。

其次,在每一个格点上,建立起预报值与“实况值”的回归关系,订正降尺度之后的误差。考虑到气温的连续性并服从正态分布,经试验后,采用一元线性回归方法进行降尺度之后的误差订正。

$$Y_i = aX_i + b \quad (1)$$

其中: X_i 是插值后的模式预报序列; Y_i 是相对应的细网格观测值序列;在训练期中确定回归系数 a 、 b 。在预报期中,根据插值后的数据 X_i ,利用回归方程(1)可以算得预报值 Y_i 。

最后,将降尺度订正后的各模式结果再进行多

模式集成。集成方案分为消除偏差集合平均(bias-removed ensemble mean, BREM)和超级集合预报(Super-ensemble Prediction, SUP)^[22]。

(1)消除偏差集合平均(BREM), BREM 预报值由下列公式获得:

$$BREM = \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) \quad (2)$$

对于每一个格点, 其中 F_i 为第 i 个模式的预报值, \bar{O} 为第 i 个模式预报训练期的时间平均值, \bar{F}_i 为训练期观测值平均, N 为参与集合的模式个数, 为消除偏差集合预报结果。这里同样采用交叉样本检验进行消除偏差。

(2)超级集合预报(SUP)

$$S_t = \bar{O} + \sum_{i=1}^N a_i (F_{i,t} - \bar{F}_i) \quad (3)$$

其中, S_t 为超级集合预测值, \bar{O} 为训练期观测值的平均, $F_{i,t}$ 为第 i 个模式的模拟值, \bar{F}_i 为第 i 个模式在训练期的模拟值平均, a_i 为回归系数(权重), t 为时间, n 为参与超级集合的模式总数。各个模式的权重系数通过在训练期使用线性回归方法求得^[10]。

本文主要采用均方根误差(RMSE)^[21-23]和距平相关系数(ACC)^[16]来评价气温预报的技巧。

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

F_i 为地面气温的预报值, O_i 为相对应的实况值, i 、 N 分别为检验区域内的格点序号和总格点数。RMSE 的大小反映了区域内平均误差的大小, 值越小表示误差越小。

$$ACC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i)(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

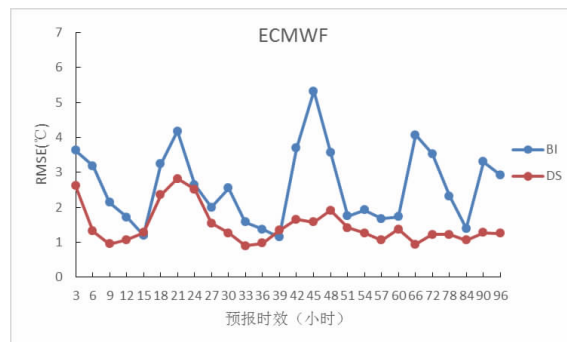
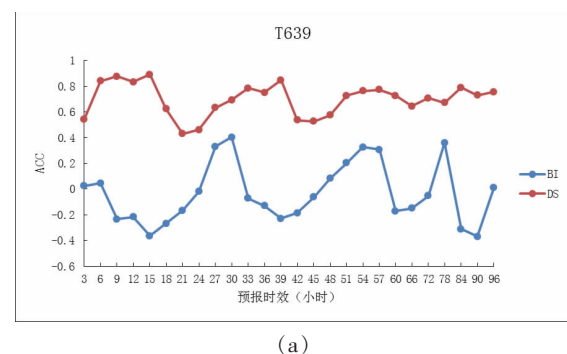
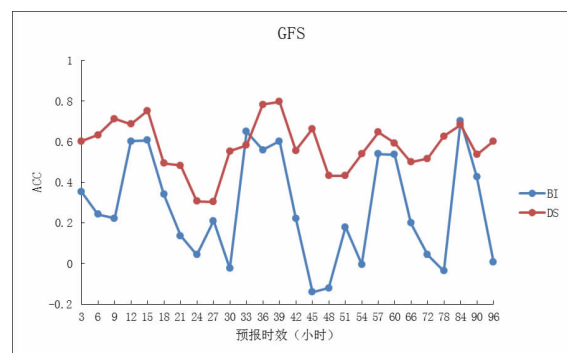
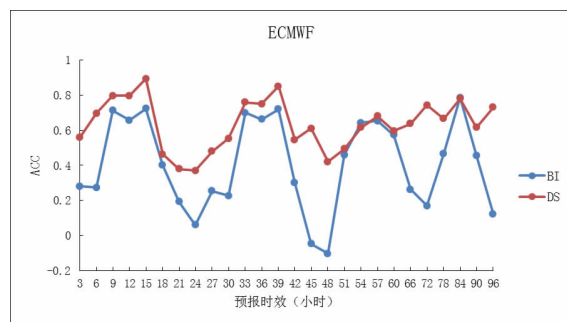
N 为总格点数, F_i 为第 i 个样本的预报值, O_i 为第 i 个样本的观测值, \bar{F} 为 N 个样本的预测值的平均值, \bar{O} 为 N 个样本的观测值的平均值, ACC 反映了预报场和观测场之间的相似程度, 值越大表示预报产品性能越好。

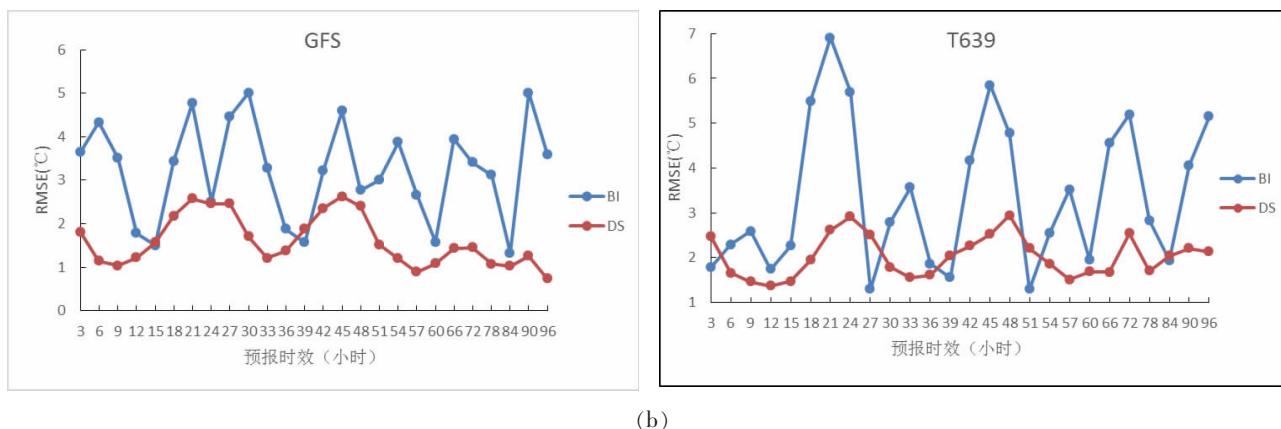
2 单个多模式的厦门市地面气温的统计降尺度预报效果检验

首先检验气温预报的 ACC 和 RMSE。利用 2013 年 6 月 1 日—8 月 31 日资料计算 3 个模式在预报时效为 2013 年 9 月 1 日—4 日地面气温在厦门市

区(117.5–118.5°E, 24–25°N) 的 ACC 和 RMSE, 0–60h 的时效间隔为 3h, 60–96h 时效间隔为 6h。如图 1 所示, 在短时效内, 对于厦门大部地区 3 个模式预报的 ACC 随着预报时效增加而减小, RMSE 随预报时效增加而增大, 在 4d 的预报时效内, 两个指标均出现振荡的变化趋势。

降尺度订正以后, 三个模式预报的地面气温与实测气温的 ACC 有较大幅度的改善, 在大部分时效





(b)

图1 2013年9月1日—4日3个单模式统计降尺度订正后厦门地区区域平均地面气温预报的ACC(a)和RMSE(b)(BI:双线性插值;DS:降尺度订正)

内,降尺度订正后的ACC小于双线性插值(图1a);三个模式的RMSE均在3°C以内(图1b),预报效果较好的ECMWF的RMSE在2°C以内,但T639降尺度订正RMSE在部分时效内反而比直接插值的大。三个模式的预报效果均有一定程度的改善,其中ECMWF降尺度订正改善效果最好。不同模式双线性插值以后的预报效果不同,可能是由于模式初始边界值的不同导致本身预报效果的不同,也有可能是模式分辨率的不同导致统一插值到 $0.025^{\circ}0.025^{\circ}$ 精度上,预报效果差别较大。T639降尺度订正效果相对不如其他两个模式,有可能是原始数据是 $1^{\circ}1^{\circ}$ 插值到较高的 $0.025^{\circ}0.025^{\circ}$ 精度的误差导致。由以上分析结果可见降尺度订正明显的改善了单模式的预报误差,提高了预报地面气温的准确率。

3 多模式集成的厦门地面气温的统计降尺度预报效果检验

为了进一步改进降尺度预报效果,得到高精度的地面气温资料,对3个模式的降尺度订正预报进行多模式集成。多模式集成方案主要选取以下两种:消除偏差集合平均(BREM)和超级集合预报(SUP)。

研究时段与单模式的降尺度订正预报试验一致,为2013年6月1日—8月31日,预报时段为2013年9月1日—4日。由于训练期的长短对多模式集成结果有较大的影响,因此在多模式集成之前,首先要对训练期长度进行调试,选取最佳训练期。在整个资料时间序列中将训练期长度进行滑动,并分别计算不同训练期长度对应的RMSE。由图2可以看出,不同的预报时效,不同训练期长度对应的

RMSE整体趋势是一致的。10d之内,随着训练期变长,RMSE先增大后减小,10d—45d左右的训练期长度对应的RMSE变化较为平缓,45d以后,随着训练期的增长,RMSE反而有所增加了。对于大多数预报时效,45d左右的训练期对应的RMSE最小。因此将45d选定为最佳训练期,并在多模式集成方法中予以使用。

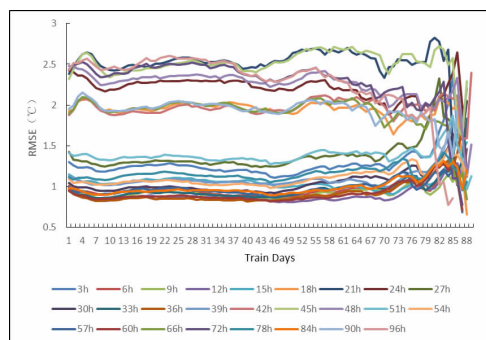


图2 2013年9月1日—4日在不同预报时效中训练期的选取

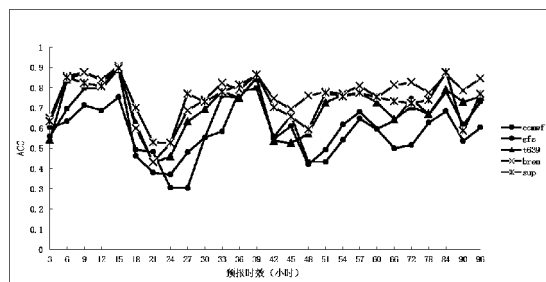


图3 2013年9月1日—4日不同预报时效内三个模式与BREM、SUP的气温的区域平均ACC图

将三个模式的降尺度结果进行消除偏差集合平均,利用自动站资料对集成后的结果进行检验。分别计算研究时段内降尺度以后三个单模式以及多模式

集成 1-4d 预报时效的地面气温预报值与“实况值”之间的 ACC, 由图 3 可知, 在整个预报时效内, BREM 和 SUP 与地面气温的“实况值”的 ACC 明显高于单模式降尺度后的值, 随着预报时效的延长, ACC 呈现波动的变化趋势, 且 BREM 的 ACC 高于 SUP, 从 ACC 发的角度看, BREM 的集成效果优于 SUP。

图 4 将三个模式分别与消除偏差集合平均的 RMSE 相减, 得到各个预报时效内区域平均的 RMSE 差值图。由图可知, 03-12h 预报时效内, BREM 的 RMSE 只小于 T639, 大于 EC 和 GFS 两个单模式, 从 15h 预报时效以后 BREM 的效果开始得到改善, 多数预报时效内的 RMSE 小于 GFS 和 T639, 但是多数预报时效的预报效果不如 ECMWF 单模式, 可能是由于 T639 单模式效果较差, BREM 集成的是平均权重的, 所以 T639 效果差对 BREM 效果有较大影响, 但在 48h、51h、72h 预报时效, BREM 的 RMSE 相比三个单模式都有较大的优势。从图中也可以看出, T639 的预报误差相比 BREM 的误差随着时效的延长是在增大的。

超级集合方法区别于消除偏差集合平均的最重要一点就是按照各个模式的预报效果分配权重进行集成。图 5 位将三个模式分别与超级集合的 RMSE 相减, 得到各个预报时效内区域平均的 SUP 差值图。由图 5 可知, 不同预报时效的 SUP 效果整体优于 BREM 的效果。在某些时效上, SUP 的 RMSE 大于单模式 ECMWF, 但相比 BREM, SUP 对单模式的改善效果更加明显。在 21h、27h、42h、48h、51h 和 54h 预报时效时, SUP 的 RMSE 明显小于三个单模式。总体来看, 在一定程度上, 多模式集成能改善降尺度以后的预报效果, 使得集成后结果的准确性有

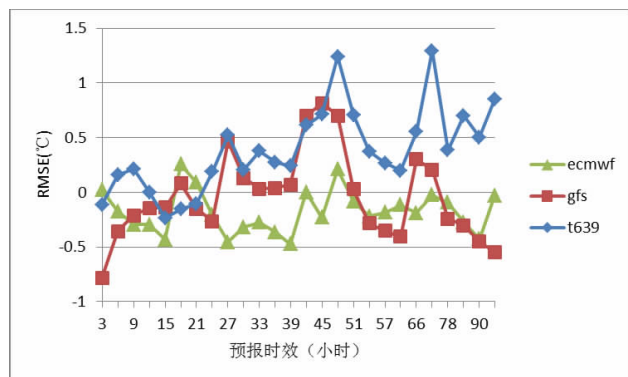


图 4 2013 年 9 月 1 日-4 日单模式与 BREM 的气温的区域平均 RMSE 差值图

较大的提高。

4 结论

本文利用 ECMWF、GFS 和 T639 三个模式 2013 年夏季厦门地面 2m 气温预报的集合平均预报资料, 采用双线性插值方法、线性回归分析结合两种多模式集成 (BREM 和 SUP) 方法进行统计降尺度预报研究, 得到以下结论:

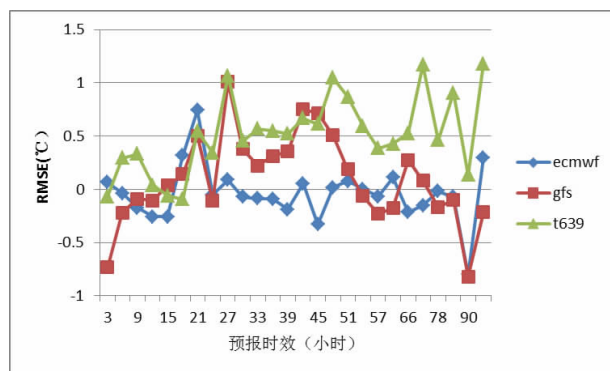


图 5 2013 年 9 月 1 日-4 日 3 个单模式与 SUP 的气温的区域平均 RMSE 差值图

(1) 三个单模式对厦门地区地面气温的预报经过降尺度处理后, 其预报误差均明显减小。统计降尺度研究后, 08 时起报 2013 年 9 月 1 日-4 日预报的 ACC 有明显增大, RMSE 维持在 3°C 以下。

(2) 把预报期内的降尺度结果进行多模式超级集合和消除偏差集合平均集成预报, 预报技巧得到进一步提高, 超级集合对降尺度的改善效果一定程度优于消除偏差集合平均。对比综合表现最好的单模式 ECMWF 的预报结果, 预报期内多数时效的统计降尺度及多模式集成预报的误差明显减小, RMSE 也有一定程度的改善。其中, 基于超级集合预报的降尺度方案预报误差小于基于消除偏差集合平均的降尺度方案。

由于本文所使用的三个的模式预报资料均是在夏季 3 个月中, 对于冬季或其他季节的预报效果检验还有待进一步研究。本文所用的降尺度预报方案均是把原始资料降到了 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 的高分辨率, 最大程度的提高预报准确率, 为厦门地区以后的预报工作提供更加准确的资料。

参考文献:

- [1] 薛志磊, 张书余. 2009. 气温预报方法研究及其应用进展综述 [J]. 干旱气象, 2012, 30 (3): 451-458.

- [2] Dibike YB, Coulibaly P. Validation of hydro-logic models for climate scenario simulation: the case of Saguenay watershed in Quebec [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(23): 3123–3235.
- [3] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 20 (3): 320–329.
- [4] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 等. 气象资料的统计降尺度方法综述 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26 (8): 837–847.
- [5] Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (D6): 6603–6621.
- [6] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报 [J]. *大气科学学报*, 2013, 36 (3): 257–266.
- [7] 杨学胜. 业务集合预报系统的现状及展望 [J]. *气象*, 2001, 17 (1): 3–9.
- [8] 李倩, 胡邦辉, 王学忠, 等. 基于 BP 人工神经网络的区域温度多模式集成预报试验 [J]. *干旱气象* 2011, 29 (2): 231–235.
- [9] 吴振玲, 潘璇, 董昊, 等. 天津市多模式气温集成预报方法应用气象学报 [J]. *应用气象学报*, 2014, 25 (3): 293–301.
- [10] 智协飞, 林春泽, 白永清, 等. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报 [J]. *气象科学*, 2009, 29 (5): 569–594.
- [11] 林春泽, 智协飞, 韩艳, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报 [J]. *应用气象学报*, 2009, 20 (6): 706–712.
- [12] Zhi X F, Qi H X, Bai Y Q, et al. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26 (1), 41–51.
- [13] von Storch H, Zorita E, Cubasch U. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime [J]. *J. Climate*, 1993, 6: 1161–1171.
- [14] Krishnamurti T N, Mishra A K. Improving Global Model Precipitation Forecasts over India Using Downscaling and the FSU Superensemble (Part I): 1–5-Day Forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137: 2713–2735.
- [15] Frias MD, Fernandez J, Saenz J, et al. Operational predictability of monthly average maximum temperature over the Iberian Peninsula using DEMETER simulations and downscaling [J]. *Tellus*, 2005, 57A: 448–463.
- [16] 王亚男, 智协飞. 多模式降水集合预报的统计降尺度研究 [J]. *暴雨灾害*, 2012, 31 (1): 1–7.
- [17] 陈晓龙, 智协飞. 基于 TIGGE 资料的北半球地面气温预报的统计降尺度研究 [J]. *大气科学学报*, 2014, 37 (3): 268–275.
- [18] 王海霞, 智协飞. 基于 TIGGE 多模式降水量预报的统计降尺度预报研究 [J]. *气象科学*, 2015, 35 (4) 430–437.
- [19] 何斌, 黄渊, 陈亮. Multiquadric 方法在中尺度气象资料客观分析中的应用 [J]. *高原气象*, 2014, 33 (1): 171–178.
- [20] Nuss W A, Titley D W. Use of Multiquadric interpolation for meteorological objective analysis [J]. *Mon Wea Rev*, 1994. 122: 161–1631.
- [21] 杨昌贤, 郑艳, 林建兴, 等. 数值预报产品检验和评估 [J]. *气象研究与应用*, 2008, 29 (2): 32–37.
- [22] 刘泽军, 黄嘉宏, 林振敏. 广西中尺度数值模式格点产品检验系统 [J]. *气象研究与应用*, 2007, 28 (4): 34–36.
- [23] 林建兴, 石娟. 不同物理过程组合对台风“尼格”的降水预报试验 [J]. *气象研究与应用*, 2012, 33 (1): 24–26.