

白永清,林春泽,陈正洪,等. 2013. 基于 LAPS 分析的 WRF 模式逐时气温精细化预报释用. 气象, 39(4):460-465.

基于 LAPS 分析的 WRF 模式逐时 气温精细化预报释用^{* 1}

白永清^{1,2} 林春泽¹ 陈正洪^{1,2} 祁海霞³

1 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074

2 湖北省气象服务中心, 武汉 430074

3 武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 为了满足湖北电力和华中电力系统对逐时气温预报的需求, 开展气温精细化预报服务, 基于局地分析预报系统(LAPS)分析融合的 WRF 模式精细化数值预报产品, 对 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日湖北省内及周边区域站点的逐时气温进行精细化预报释用。比较几种模式释用方案, 结果表明: WRF 模式预报趋势较好, 预报准确率评分 50% 左右, 日间 08—20 时预报误差小于夜间, 最高气温(T_{\max})评分 54%, 最低气温(T_{\min})评分为 44%。通过模式释用, 提高了预报准确率, 可使预报评分提高到 60%~70%, 对 T_{\max} 评分达到 57%, 对 T_{\min} 评分最高达到 74%。分时刻建立 MOS 方程能够有效降低夜间 20—07 时的预报误差。将实况最高气温引入 Kalman 滤波方程能进一步提高预报准确率。

关键词: LAPS, 模式释用, 逐时气温, 比较检验

中图分类号: P457

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.008

Product Interpretation of Refined Hourly Temperature Based on the Assimilation of WRF Model in LAPS

BAI Yongqing^{1,2} LIN Chunze¹ CHEN Zhenghong^{1,2} QI Haixia³

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

2 Hubei Service Center of Meteorological Science and Technology, Wuhan 430074

3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Based on the assimilation of refined WRF model products in Local Analysis and Prediction System (LAPS), in order to meet the needs of the power system temperature forecast, several product interpretation forecast methods of hourly temperature were designed in Hubei Province and surrounding stations from 1 April to 20 July 2011. Compared with other several forecast models, results show that the WRF model has a good simulation of temperature trend, the temperature forecast accuracy score is around 50%, the forecast error in the daytime of 08—20 BT is less than that in the nighttimes, the accuracy score of maximum temperature is 54% and the accuracy score of minimum temperature is 44%. The forecast accuracy can be further improved through product interpretation of model output, so that the accuracy score reached to 60%—70%, that of maximum temperature got 57% and that of minimum temperature reached 74%. In addition, the MOS equation established hourly time can effectively reduce the forecast errors in nighttime of 20—07 BT. Furthermore, bringing maximum temperature factor into Kalman system equations can be further improved forecast accuracy.

Key words: LAPS (local analysis and prediction system), product interpretation, hourly temperature, comparison test

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906007)资助

2012 年 1 月 17 日收稿; 2012 年 7 月 8 日收修定稿

第一作者: 白永清, 研究方向为数值预报、数值模式产品释用. Email: 2007byq@163.com

引言

随着气象科学的进步和经济社会的发展,公众尤其是专业气象用户对天气预报的要求及气象服务的需求越来越高,对于气象业务来说,精细化预报已经成为业务发展的必然趋势。

精细化预报是高分辨率天气预报的深入应用,高分辨率的数值模式是进行精细化预报的基础(谷湘潜等,2007)。云南省气象研究所利用中尺度 WRF 数值模式及 WRF 三维变分同化系统建立了本地化的中尺度数值预报业务系统,该系统能较好地刻画本地地下垫面的动力和热力状况,预报能力有明显改善(段旭等,2011)。武汉暴雨研究所已成功将局地分析预报系统(local analysis and prediction system, LAPS)移植到本地(李红莉等,2008;2009),并且利用该系统融合了 NCEP 资料、S 波段多普勒雷达资料、卫星云导风资料、地面观测资料、探空资料以及 GPS 水汽资料等,实现了利用 LAPS 为中尺度数值模式提供初始场进行中尺度数值预报。

发展数值预报模式的释用订正技术,提高数值预报模式输出的气象要素预报水平,是开展精细化预报重要环节(矫梅燕,2007)。基于模式输出统计(MOS)、神经元网络、卡尔曼(Kalman)滤波等统计释用技术已被充分利用。辜旭赞(2008)基于 T213 模式产品,利用 Kalman 滤波技术建立湖北省多站多要素 MOS 预报方程,具有一定的评分水平。但是预报时间分辨率较粗,不能达到精细化要求,且预报效果受限于模式性能。郭虎等(2008)利用支持向量机和半周期函数拟合方法制作北京奥运演练气象要素客观精细化预报产品,空间精细化到场馆,时间精细化到 3 h,为奥运演练做好气象保障服务。张华等(2003)尝试用最新的大气运动实况资料修正 MOS 预报方程系数,改善了 MOS 方程预报效果。吴君等(2007)基于 MM5 模式产品,利用 BP 神经网络模型建立了气温预报模型,时间分辨率 3 h,表明 BP 模型的气温预报准确率高于模式直接预报,可应用于业务中制作气温的精细化预报。王辉赞等(2006)利用 Kalman 滤波方法对 T106 数值预报产品进行误差修正和预报优化,结果对副热带高压(以下简称副高)预报误差修正效果良好。邱学兴等(2012)统计订正了 T639 模式预报系统误差,表明“递减平均法”总体表现为正的订正技巧,对于地面 2 m 温度预报场,冬半年订正能力明显高于夏半年。

钱莉等(2010)基于 ECMWF 数值预报产品利用最优子集神经网络分月建立了武威市逐日最高、最低温度预报模型,结果表明该模型能较好地反映日极端温度的变化,对明显的升降温过程反应灵敏,对升降温趋势和幅度预报较为准确。张礼平等(2008)利用遗传神经网络技术释用气候模式预测产品,证明海气耦合模式预测产品经释用后,可在业务中发挥更大的作用。

气温要素与人民生活、生产密切相关,尤其是电力行业中的电力负荷、用电量等对气温变化极为敏感。研究电力指标与气象因子的关系,建立电力负荷、用电量与气温等要素的评估预测模型已成为焦点(胡江林等,2002)。新疆气象服务中心依托数值预报产品制作电力负荷预报,实现为专业用户提供指导性的专项服务产品(杨静等,2010),但是准确率明显受 T213 模式预报能力所限。电力部门需要更精确、更精细的气温预报,以做到供电量的合理调度,达到电网安全稳定、优质经济地运行。本文基于武汉暴雨研究所开发的 LAPS 分析融合的 WRF 模式,主要对湖北省内及华中区域部分用电量高峰地区代表站进行气温精细化预报释用研究,每日为区域站点提供次日 00—23 时逐时气温精细化预报产品。

1 基于 LAPS 分析融合系统的 WRF 模式

利用武汉暴雨研究所引进的局地分析预报系统(LAPS)作为分析融合系统,WRF 模式作为高分辨率预报模式,根据区域气候、地形特点及系统建设要求,进行本地化移植及调试,自动化运行保障等工作,建立每 3 h 启动一次的精细化数值预报系统,提供高时空分辨率的精细化数值预报产品。

利用全球 GFS 每 3 h 一次的预报场作为 LAPS 系统背景场,将长江流域各省市多普勒雷达基数据、常规探空观测资料、常规地面观测资料、加密自动站观测资料、GPS 水汽资料、风云二号卫星资料等观测资料进行融合同化,每 3 h 为中尺度数值模式 WRF 提供初始场。

WRF 模式版本利用 WRF V3.1,预报区域采用 WSM6 显式云物理方案,关闭对流参数化方案,利用 YSU 边界层方案进行设定,侧边界条件为时变边界。预报区域中心点为 30.5°N、110.5°E,水平分辨率 3 km,范围为 24°~37°N、104°~117°E,包括湖北、湖南、河南和重庆等省(市、区),预报时间分辨

率为 1 h。

2 资料方法

为了满足湖北电力、华中电力系统对逐时气温预报的需求,开展气温精细化预报服务,依据专业用户指定湖北省内及华中区域主要城市用电量高峰地点,挑选区域 55 个自动气象观测站(图 1),进行气温精细化预报,开展专业气象服务。选取资料长度为 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日。

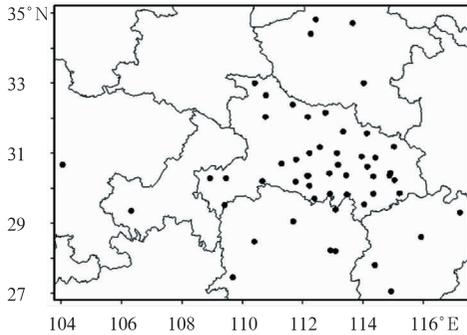


图 1 55 个气象观测站点分布

Fig. 1 Distribution of 55 meteorological observation stations in the study area

模式资料基于 LAPS 分析的 WRF 模式,输出高时空分辨率精细化数值预报产品,要素包括三维温、压、湿、风及地面 2 m 气温等。起报时间为 2011 年 3 月 30 日至 7 月 19 日每日 08 时,提取次日 00—23 时逐时物理量场。

利用数值模式释用技术,每日为区域站点提供次日 00—23 时逐时气温精细化预报产品。

将模式输出的三维温、压、湿、风场等插值到区域站点上,并设计以下几种模式释用方案:

(1)采用逐时样本“串连”,逐站建立 MOS 预报方程,记为 MOS-1 方案。

(2)去除气温日间变化影响,逐站逐时刻建立 MOS 预报方程,记为 MOS-2 方案。

(3)以模式产品为预报因子,采用卡尔曼(Kalman)滤波技术,逐站逐时刻建立 Kalman 系统预报方程,记为 Kalman-1 方案。

(4)在模式产品为预报因子的基础上,引入前一日实况最高气温为预报因子,逐站逐时刻建立 Kalman 系统预报方程,记为 Kalman-2 方案。

MOS 方法中各因子的系数一般是固定的,而实际各预报因子对预报量的权重影响是动态变化的。因此在业务运行中,可采用“滚动系数”的方式建立

MOS 预报模型。每日替换最新的实况和模式样本数据,训练一组新的方程参数,使预报模型能够适应天气、气候的变化。而 Kalman 滤波方法具有利用上一次预报误差的反馈信息来修正原预报方程参数的特点,预报系统方程本身是动态的。

气温预报的检验方法(张强等,2009)采用平均绝对误差(T_{MAE})和预报准确率(T_{T_K}):

$$T_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (1)$$

$$T_{T_K} = \frac{N_{r_K}}{N_{f_K}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, F_i 为第 i 站(次)预报气温, O_i 为第 i 站(次)实况气温, K 为 1、2,分别代表 $|F_i - O_i| \leq 1^\circ\text{C}$ 、 $|F_i - O_i| \leq 2^\circ\text{C}$, N_{r_K} 为预报正确的站(次)数, N_{f_K} 为预报的总站(次)数。文中检验预报准确率采用 $|F_i - O_i| \leq 2^\circ\text{C}$ 的阈值。

3 预报方案实现

3.1 MOS-1 方案

MOS 降水预报往往依据系统辐合抬升、水汽条件和高低层配置等结构特征选取预报因子,这些因子符合动力学原理和系统发展机制(孙永刚等,1998),如上升运动、涡散度、中低层水汽、水汽垂直输送及综合指数等。而将此类因子引入 MOS 气温精细化预报方程后,由于预报因子与预报对象近乎无相关性,试验效果反而不理想。

因此对气温预报因子的选取,先通过模式输出要素与站点实况气温的相关普查,再经过预报检验筛选,发现选取以下 8 个因子时误差检验最小,见表 1。选取的预报因子与预报对象是线性相关的,且具有一定的天气学意义。

表 1 模式输出因子与实况气温的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between model output factors and observation temperature

模式输出因子	与武汉站气温 相关系数	与区域平均气 温相关系数
2 m 气温	0.90	0.90
2 m 比湿	0.75	0.73
850 hPa 温度	0.77	0.78
850 hPa 露点温度	0.46	0.43
850 hPa+700 hPa 温度露点差	0.08	0.18
850 hPa 东西风速分量	0.26	0.17
850 hPa 位势高度	-0.55	-0.54
500 hPa 位势高度	0.61	0.60

模式直接预报 2 m 气温与实况气温的相关系数高达 0.9,可见基于 LAPS 分析的 WRF 模式预报信度较高,预报趋势基本相一致。

由于 MOS-1 方案将逐时样本“串连”,大量扩充了样本,利于建立稳定的预报模型。利用资料前 80 d 作为拟合期,训练模型参数,后 31 d 作为预报期,检验模型预报效果。

图 2 给出 WRF 模式和 MOS-1 方案预报气温的逐日区域平均绝对误差 (T_{MAE}),由图可见, MOS-1 在拟合期、预报期预报均稳定, T_{MAE} 明显小于模式直接预报。

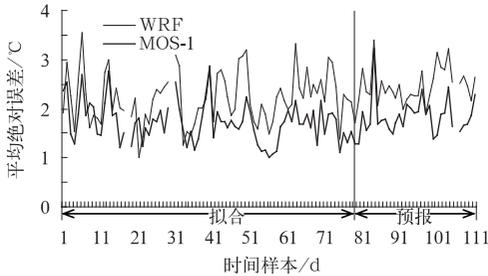


图 2 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日逐日区域平均绝对误差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Daily regional mean absolute errors during 1 April to 20 July 2011 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

3.2 MOS-2 方案

考虑到气温日间变化可能影响预报准确率,采用 MOS-2 方案,每个站逐时刻建立 24 个预报方程。由于拟合样本数量有限,方程不利于引入过多个因子。试验表明,多个预报因子引入 MOS-2 方程,可使预报的拟合期误差较小,而预报期误差较大。

通过引入不同因子进行预报检验筛选,基于业务简化原则,最后确定 MOS-2 方案的预报因子为 2 m 气温和 500 hPa 位势高度。模式直接预报气温可信

度高,位势高度具有明确的天气学意义。利用前 80 d 资料建立预报模型,后 31 d 资料进行预报检验。

3.3 Kalman-1 方案

Kalman 滤波方法是在 MOS 方程基础上,通过对系数的动态调整来达到减小误差的目的。基于滤波的基本思想,利用前一次预报误差的反馈信息来及时修正和调整预报方程,以提高下一次预报精度(陆如华等,1994)。

在 MOS-2 方案基础上,以 2 m 气温和 500 hPa 位势高度为两个预报因子,利用前 80 d 资料估算 Kalman 滤波系统递推起步的 4 个重要参数(陆如华等,1997),后 31 d 资料进行预报检验。

3.4 Kalman-2 方案

试验表明, Kalman-1 方案对午间气温预报存在较大负偏差。考虑在此基础上,引入前一日实况最高气温作为其中预报因子,记为 Kalman-2 方案,武汉站日最高气温滞后 24 h 的自相关系数达到 0.75,引入该因子有望提高预报准确率。

4 预报方案比较检验

对各方案进行预报检验,图 3 给出后 31 d 预报期逐时区域平均绝对误差。 T_{MAE} 控制在 2°C 以内为预报准确。图 3a, WRF 预报 08—11 时 T_{MAE} 低于 2°C , 夜间 23—07 时 T_{MAE} 均高于 2.5°C , 对最低气温预报准确率较低。 Kalman-1 预报 14—18 时 T_{MAE} 略大, 夜间时刻 T_{MAE} 明显降低。 Kalman-2 方案引入实况最高气温因子后, 逐时 T_{MAE} 均比 Kalman-1 低 0.1°C 。 图 3b, 午间时刻 MOS-1 和 MOS-2 误差均能控制在 2°C 以内, 并且略低于 Kalman-2; 夜间时刻 MOS-2 误差明显小于 MOS-1, 且 Kalman-2 误

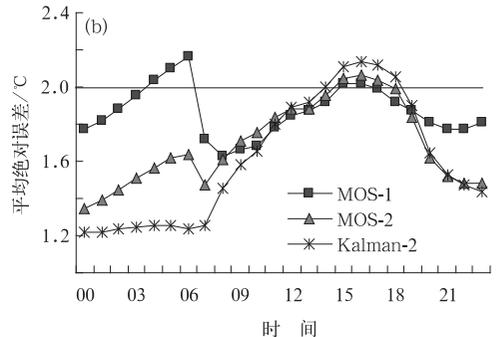
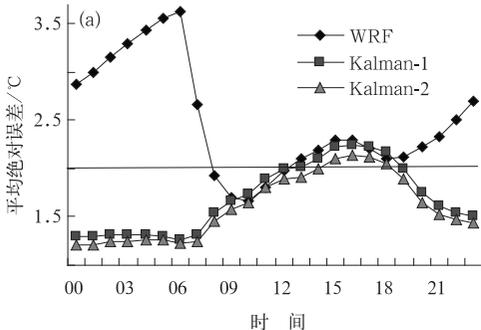


图 3 2011 年 6 月 20 日至 7 月 20 日不同预报方案逐时区域平均绝对误差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Hourly regional mean absolute errors from 20 June to 20 July 2011 by schemes WRF, Kalman-1 and Kalman-2 (a), and by schemes MOS-1, MOS-2 and Kalman-2 (b) (unit: $^{\circ}\text{C}$)

差最小。此外对 MOS-2 引入实况最高气温因子, 预报效果并无改善。

图 4 给出预报期逐站平均绝对误差, 由图可见,

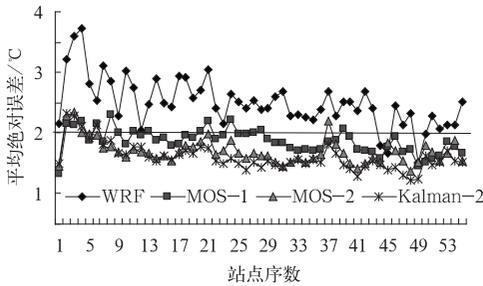


图 4 2011 年 6 月 20 日至 7 月 20 日逐站平均绝对误差(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Mean absolute errors of each station (unit: $^{\circ}\text{C}$) from 20 June to 20 July 2011

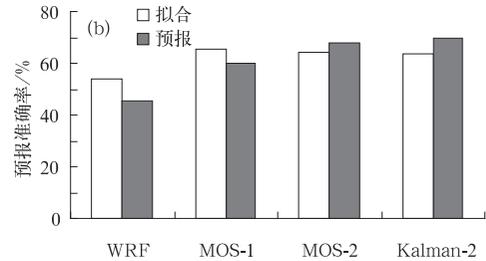
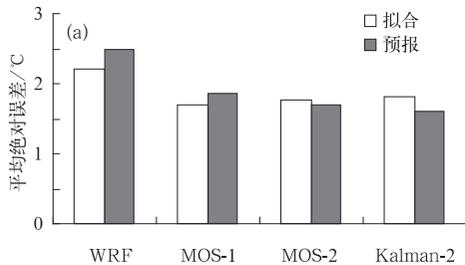


图 5 拟合期、预报期区域平均绝对误差(a, 单位: $^{\circ}\text{C}$)及预报准确率(b, 单位: %)

Fig. 5 Regional mean absolute errors (a, unit: $^{\circ}\text{C}$) and forecast accuracy scores (b, unit: %) during fitting and forecast periods

5 日最高、最低气温检验

每日提供逐时气温精细化预报的同时, 检验各方案能否提供较高准确率的日最高、最低气温预报产品。这里最高、最低气温是 24 h 预报时效的 00—23 时之间的极值。

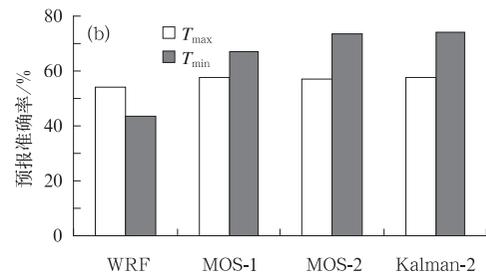
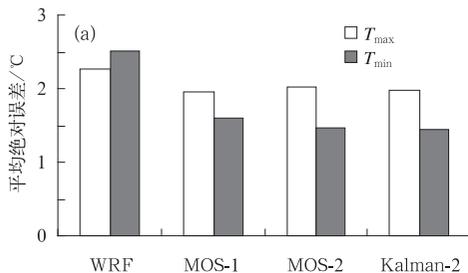


图 6 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日日最高气温(T_{\max})、日最低气温(T_{\min})的区域平均绝对误差(a, 单位: $^{\circ}\text{C}$)及预报准确率(b, 单位: %)

Fig. 6 Regional mean absolute errors (a, unit: $^{\circ}\text{C}$) and forecast accuracy scores (b, unit: %) of maximum temperature and minimum temperature during 1 April to 20 July 2011

WRF 绝大多数站点的逐时气温 T_{MAE} 大于 2°C , MOS-1 误差明显减小, 只有少数站点的 T_{MAE} 大于 2°C 。Kalman-2 及 MOS-2 平均误差最低, 仅郑州、洛阳和孟津站点 T_{MAE} 略大于 2°C , 这与 WRF 预报误差较大有关, 也可能与选取预报因子的地域差异有关。

图 5 分别给出各方案拟合期和预报期区域平均误差及预报准确率 T_{TK} 评分。由图可见, WRF 逐时气温 T_{MAE} 高于 2°C , 预报准确率为 50% 左右, 模式预报趋势较好, 但误差偏大。通过模式释用, 各方案可使 T_{MAE} 控制在 2°C 以内的容许范围, 预报准确率也提高到 60%~70%。各方案拟合期 T_{TK} 相当, 预报期由于夜间 Kalman-2 误差最小、MOS-2 次之, Kalman-2 预报评分也因此略高于 MOS-2 及 MOS-1。

图 6 统计了 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日区域站点逐日最高气温(T_{\max})和最低气温(T_{\min}), 检验各方案极值气温预报的平均绝对误差和预报准确率。由图可见, 基于 LAPS 同化的 WRF 模式对高温预报效果优于低温, T_{\max} 误差为 2.3°C , T_{\min} 误差为 2.5°C , T_{\max} 评分为 54%, T_{\min} 评分为 44%。模式释用方案对 T_{\min} 改进明显, MOS-1、MOS-2 及 Kalman-2

可分别使 T_{MAE} 降低到 1.6°C 、 1.5°C 和 1.4°C , 预报评分分别提高到 67%、73% 和 74%。但是对 T_{max} 改进效果不明显, 各方案预报效果相当, T_{MAE} 控制在 2°C 范围, 评分达到 57% 左右。

通过计算区域站点平均系统性偏差(一段时间内实况与预报的平均差值), 模式预报最高、最低气温的系统性偏差分别为 -0.7°C 和 1.9°C , 即高温预报偏高、低温预报偏低, 并且模式对低温预报存在更明显的系统偏差, 因此对低温的偏差订正改进效果更为明显。通过模式释用, 最高、最低气温的系统性偏差分别降低为 0.3°C 和 0.4°C 。

综上所述, 现有方案能够有效降低输出分辨率为逐小时的中尺度模式预报误差, 提高预报准确率, 能够满足现阶段专业用户(湖北电力和华中电力)对气象部门气温预报分辨率及准确率的要求。随着专业用户对气象服务需求的日益增长, 如新能源产业中风电功率预报对风速预报需求、太阳能光伏发电对短波辐射需求, 以及电力负荷预报对气温预报需求等, 气象部门应当充分发挥自身数值天气预报模式的优势, 及时开展对高分辨率模式的应用, 提高模式释用水平, 尽可能满足专业气象用户对天气预报要求及气象服务的需求。

6 小 结

为了满足湖北电力和华中电力系统对逐时气温预报的需求, 开展气温精细化预报服务, 基于 LAPS 分析融合的 WRF 模式, 利用 2011 年 4 月 1 日至 7 月 20 日高时空分辨率精细化数值预报产品, 对湖北省内及周边区域 55 个站点逐时气温进行精细化预报释用, 检验比较几种模式释用方案, 得到以下结论。

(1) 基于 LAPS 分析的 WRF 模式预报趋势较准确, 与实况气温相关系数达到 0.9, 逐时预报准确率评分在 50% 左右。通过模式释用, 可使评分达到 60%~70%。WRF 日间(08—20 时)预报误差小于夜间, 对高温预报准确率较高, T_{max} 评分为 54%, 对低温预报准确率较低, T_{min} 评分为 44%。模式释用方案对 T_{min} 预报改进效果明显, MOS-1、MOS-2 及 Kalman-2 可使预报评分分别提高到 67%、73% 和 74%。

(2) 将前一日实况最高气温引入 Kalman 滤波方程(Kalman-2), 能使区域平均 T_{MAE} 降低 0.1°C , 提高预报准确率。而将该因子引入 MOS 预报方

程, 预报效果无改善。

(3) 去除气温日间变化影响, 逐时建立 MOS 预报方程(MOS-2), 该方案相对 MOS-1 能够有效降低夜间 20—07 时预报误差, Kalman-2 又进一步降低 00—07 时预报误差, 提高 T_{min} 预报准确率。

(4) 随着专业用户对气象服务需求的日益增长, 气象部门应当充分发挥自身数值天气预报模式的优势, 及时开展对高分辨率模式的应用, 提高模式释用水平, 尽可能满足专业气象用户对天气预报要求及气象服务的需求。

参考文献

- 段旭, 王曼, 陈新梅, 等. 2011. 中尺度 WRF 数值模式系统本地化业务试验. 气象, 37(1): 39-47.
- 谷湘潜, 李燕, 陈勇等. 2007. 省地气象台精细化天气预报系统. 气象科技, 35(2): 166-170.
- 辜旭赞. 2008. 湖北分县 MOS 预报系统建立与评分. 气象, 34(2): 43-51.
- 郭虎, 王建捷, 杨波, 等. 2008. 北京奥运演练精细化预报方法及其检验评估. 气象, 34(6): 17-25.
- 胡江林, 陈正洪, 洪斌, 等. 2002. 华中电网日负荷与气象因子的关系. 气象, 28(3): 14-18.
- 矫梅燕. 2007. 关于提高天气预报准确率的几个问题. 气象科技, 33(11): 3-8.
- 李红莉, 崔春光, 王志斌. 2009. LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用. 暴雨灾害, 28(1): 64-70.
- 李红莉, 张兵, 陈波. 2008. 局地分析和预报系统(LAPS)及其应用. 气象科技, 36(1): 20-24.
- 陆如华, 何于班. 1994. 卡尔曼滤波方法在天气预报中的应用. 气象, 20(9): 41-43.
- 陆如华, 徐传玉, 张玲, 等. 1997. 卡尔曼滤波的初值计算方法及其应用. 应用气象学报, 8(1): 34-43.
- 钱莉, 兰晓波, 杨永龙. 2010. 最优子集神经网络在武威气温客观预报中的应用. 气象, 36(5): 102-107.
- 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.
- 孙永刚, 李影俊, 孟雪峰, 等. 1998. 天气动力学组合因子在 MOS 降水预报中的应用. 气象, 24(2): 27-30.
- 王辉赞, 张初, 王彦磊. 2006. 基于 Kalman 滤波的副热带高压数值预报误差修正. 热带气象学报, 22(6): 661-666.
- 吴君, 裴洪芹, 石莹, 等. 2007. 基于数值预报产品的地面气温 BP-MOS 预报方法. 气象科学, 27(4): 430-435.
- 杨静, 陈冬梅, 周庆亮, 等. 2010. T213 预报产品在电力负荷预测中的应用. 气象, 36(3): 123-127.
- 张华, 叶燕华. 2003. 利用最近资料改进 MOS 预报的方法. 高原气象, 22(2): 127-131.
- 张礼平, 丁一汇, 李清泉, 等. 2008. 遗传神经网络释用气候模式预测产品的试验研究. 气候与环境研究, 13(5): 681-687.
- 张强, 熊安元, 张金艳, 等. 2009. 晴雨(雪)和气温预报评分方法的初步研究. 应用气象学报, 20(6): 692-698.