

用中尺度非静力模式制作北京气温和风预报

梁 丰 王迎春

(北京市气象科学研究所, 北京 100089)

提 要

利用国家气象中心与北京市气象局联合开发的“北京地区中尺度数值天气预报业务系统”针对业务预报需要,开发了2米温度、10米风的要素预报。通过近一年的预报效果检验表明,该系统不仅对一般性天气有比较好的预报效果,同时也可以预报出转折性的大风、升(降)温等天气过程。与NCEP的eta模式相比,该系统的温度预报误差与之基本相当,而风速预报误差略小于eta模式。

关键词: 中尺度 非静力 数值预报 2米温度 10米风

引 言

随着人类社会的进步,对定时定点天气预报的需求也越来越高,数值预报产品的解释与应用将成为今后业务天气预报的主要手段和依据。然而,以高分辨率中尺度数值预报模式产品为基础的释用技术研究目前国内还很缺乏。为了适应首都气象服务和保障的需要,国家气象中心与北京市气象局联合开发并于1999年建成“北京地区中尺度数值天气预报业务系统”(以MM5模式为核心)。作为第一阶段开发成果,于1997年6月初步建成了—个北京地区中尺度数值预报试验系统,并进行了夏季实时运行试验^[1]。在此基础上,1998年我们又进行了2米温度和10米

风这些近地面要素预报的开发。

近地面要素场预报历来是数值预报的难点,同时也是预报员作定时定点预报的最有价值的参考,由于MM5模式本身不提供2米温度、10米风预报,因此需要在模式的后处理部分根据边界层理论进行插值计算而得到。有关这方面的工作目前还比较少,国外有一些文献提到,比如FSL的工作人员利用LAPS--RAMS系统为1996年亚特兰大奥运会提供气象预报,其中采用了Louis相似理论计算了1.5米的温度和10米风^[2];Paul A. Nutter和John Manobianco^[3]曾经分析了NCEP的eta模式2米温度、10米风预报在1997年暖季(5~8月)的误差情况:2米温度

预报的偏差在 1~6℃ 之间,均方根误差 (RMS)最大接近 6℃,最小在 1℃ 以上,绝对误差在 1~3℃ 之间;10 米风预报的偏差在 1~2m·s⁻¹ 之间,均方根误差最大为 3.5m·s⁻¹ 左右,绝对误差平均为 2m·s⁻¹ 左右。

1 基本原理和方法

1.1 模式简介

采用 PSU/NCAR 的非静力中尺度数值模式 MM5V2 版,两层嵌套网格,外层 101×101 个网格点,水平格距 45km,内层 103×103 个网格点,水平格距 15km,中心点经纬度为 40°N、116°E(图略),垂直方向为 23 层(σ 面)。模式的地形、地表资料选用 NCAR 提供的全球经纬度网格资料,外层区域分辨率为 30'×30',内层 10'×10'。使用国家气象中心 T106 模式的输出场为背景场和侧边界,外区为时间流入流出边界条件,内层采用时变边界条件。模式的主要物理过程包括简单冰相显式湿方案,Kain-Fitsch 积云参数化方案,云辐射方案和 MRF 边界层方案。

1.2 2 米温度 10 米风的计算方法

我们选择了与欧洲中心 T63 模式基本相同的方案^[4],主要利用莫宁-奥布霍夫理论中常值通量层中的风速及温度的垂直梯度定律插值计算得到。其基本方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa(z+z_0)} \Phi_v\left(\frac{z+z_0}{L}\right) \\ \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S_*}{\kappa(z+z_0)} \Phi_S\left(\frac{z+z_0}{L}\right) \end{cases}$$

式中 L 为 Monin-Obukhov 长度, $\kappa = R_d/c_{pd}$ 为 Karman 常数, z_0 为粗糙度高度(具体取值

$$\nu(10) = \nu_{NLEV} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{c_d}}{\kappa} \ln \left[1 + (e^{\kappa/\sqrt{c_d}} - 1) \frac{z_0(h-10)}{h(10+z_0)} \right] \right\} \quad (3)$$

同样可得 2 米温度的计算公式。

稳定情况:

$$S(2) - S_{sur} = (S_{NLEV} - S_{sur}) \left\{ \frac{2}{h} + \frac{c_h}{\kappa \sqrt{c_d}} \left[\ln \left(\frac{2+z_0}{z_0} \right) - \frac{2}{h} \ln \left(\frac{h+z_0}{z_0} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

不稳定情况:

见表 1), $S = gz + c_p T [1 + (\delta - 1)q]$ 是静势能, u_* 和 S_* 是由动量和热量通量导出的尺度参数。

对于 $z_0 \ll z < h$ (最低模式层的高度), 积分上式可得:

$$\begin{cases} y(z) - y_{sur} = \frac{y_*}{\kappa} \int \Phi_y(x) \frac{dx}{x} \\ x = \frac{z+z_0}{L}; y \equiv \nu, S \end{cases} \quad (1)$$

在稳定和不稳定情况下 $\Phi(x)$ 的廓线是不同的。

稳定情况:

$$\Phi(x) = 1 + ax \Rightarrow \int \Phi(x) \frac{dx}{x} = \ln x + ax \quad (a \text{ 是常数})$$

代入式(1),有

$$\nu(h) = \nu_{NLEV} = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{h+z_0}{z_0} + \frac{a}{L} h \right]$$

可得

$$\frac{a}{L} = \frac{1}{h} \left[\frac{\kappa}{\sqrt{c_d}} - \ln \left(\frac{h+z_0}{z_0} \right) \right]$$

所以

$$\nu(10) = \nu_{NLEV} \left[\frac{10}{h} + \frac{\sqrt{c_d}}{\kappa} \left(\ln \frac{10+z_0}{z_0} - \frac{10}{h} \ln \frac{h+z_0}{z_0} \right) \right] \quad (2)$$

不稳定情况:

$$\Phi(x) = \frac{1}{1-ax} \Rightarrow \int \Phi(x) \frac{dx}{x} = \ln \left(\frac{1}{1-ax} \right)$$

类似地,可得

$$S(2) - S_{sur} = (S_{NLEV} - S_{sur}) \left\{ 1 - \frac{c_h}{\kappa \sqrt{c_d}} \ln \left[1 + (e^{\delta} / \kappa \sqrt{c_d} - 1) \frac{z_0(h-2)}{h(2+z_0)} \right] \right\} \quad (5)$$

$$T(2) = [S(2) - 2g] / \{c_{pd}[1 + (\delta - 1)q_{NLEV}]\} \quad (6)$$

其中 c_d, c_h 分别为动量和热量拖曳系数, $\delta = c_{pv}/c_{pd}$, 下标 NLEV、sur 分别代表最低模式层和地面上的变量。

式(2)~(6)即为稳定和不稳定情况下的 10 米风速和 2 米温度的计算公式。

表 1 模式中的粗糙度高度 z_0 / cm

	冬季	夏季		冬季	夏季
城区	50	50	森林	50	50
农田	15	5	水面	0.01	0.01
草地	12	10	沙漠	10	10

1.3 拖曳系数的定义

在 2 米温度、10 米风速的计算中,我们选用了如下方法定义拖曳系数 c_d 和 c_h 。此方法最早由 Louis(1979)^[5]提出,后经 Louis 等

$$f_d = 1 - \frac{2bRi}{1 + 3bc \left[\kappa / \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) \right]^2 \sqrt{\left(1 + \frac{z}{z_0} \right) (-Ri)}}$$

$$f_h = 1 - \frac{3bRi}{1 + 3bc \left[\kappa / \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) \right]^2 \sqrt{1 + \frac{z}{z_0}}}$$

其中, $b = 5, c = 5, d = 5$ 。

2 实时预报效果评估

2.1 预报效果的统计评估

2.1.1 2 米温度预报

我们选用东直门、门头沟、房山三个自动站 1999 年的每日温度观测值对模式的 2 米

表 2 模式预报 2 米温度与观测值之间的相关系数

预报时次	0	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
房山	0.974	0.962	0.965	0.978	0.973	0.976	0.975	0.981	0.969	0.951	0.965	0.977
门头沟	0.970	0.969	0.961	0.973	0.972	0.974	0.970	0.979	0.970	0.958	0.966	0.971
东直门	0.975	0.941	0.968	0.979	0.980	0.984	0.984	0.986	0.968	0.955	0.970	0.975

表 3 模式预报 2 米温度与观测值之间的平均绝对误差 / °C

预报时次	0	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
房山	1.9	2.4	2.4	2.4	2.6	2.6	2.8	1.9	2.8	3.2	2.7	2.2
门头沟	1.8	2.3	2.4	2.2	2.3	2.4	2.5	2.0	3.1	3.3	3.0	2.3
东直门	2.0	2.7	2.5	2.2	2.2	2.1	2.2	2.3	3.0	3.3	2.8	2.6

表 2 和表 3 分别给出了模式每 3 小时预报值与观测值之间的相关系数 r 和平均绝对

(1982)^[6]修改。拖曳系数的近似数值解为

$$c_d = \left(\kappa / \ln \frac{z}{z_0} \right)^2 f_d \left(Ri, \frac{z}{z_0} \right) \text{ 和}$$

$$c_h = \left(\kappa / \ln \frac{z}{z_0} \right)^2 f_h \left(Ri, \frac{z}{z_0} \right)$$

下面给出函数 f_d 和 f_h 在不同状态下的表达式。

非常稳定:

$$f_d = \frac{1}{1 + 2bRi \sqrt{1 + dRi}} \text{ 和}$$

$$f_h = \frac{1}{1 + 3bRi \sqrt{1 + dRi}}$$

非常不稳定:

温度预报效果作检验分析(表 2、3)。由于各时次的缺测情况不同,样本数也就不同,其中最大样本数为 240 天(对应模式第 12 小时的预报值),最小样本数为 230 天(对应模式第 33 小时的预报值)。

误差 $|\Delta T|$ ，3 个站点 36 小时预报的相关系数均达到 0.94 以上，平均绝对误差在 1.9~3.3℃之间，表明模式具有较好的预报能力。模式 12~24 小时预报(对应的时段是晚上 20:00 到第二天早晨 08:00)的相关系数较高，平均绝对误差也明显低于 27~33 小时预报，说明模式对于夜间温度的预报平均要好于对第二天白天的预报。另外，模式的初始场存在着 2℃左右的平均绝对误差，这对模式的预报效果也有一定的影响，进一步提高初值精度是改善预报效果的重要手段。

一般而言，中尺度模式在不同季节的预报效果是不尽相同的，为了正确评估模式的预报效果，有必要对不同季节分别作检验。

图 1 是 MM5 模式在暖季(5~8 月)和冷

季(1、2、11、12 月)的预报误差随时间变化的曲线。在暖季偏差基本为正，冷季基本为负，也就是说在暖季模式对夜间温度的预报平均偏高 2℃左右，而冷季模式基本在所有时刻的预报都比实况低，特别是第二天白天的温度预报比实况平均低 4℃左右。这种系统误差的产生可能与模式的辐射方案设计有关，导致预报出的温度日变化曲线的斜率较小。从图中还可以看到暖季东直门站的误差最小，房山站最大，冷季正好相反。这可能与城市热岛效应有关，位于城区的东直门站本身气温要高于郊区的房山站，且日较差也比房山站小。同时这也反映出目前 MM5 的模式对下垫面参数处理比较简单，还不能很好地反映出城乡下垫面的差异。

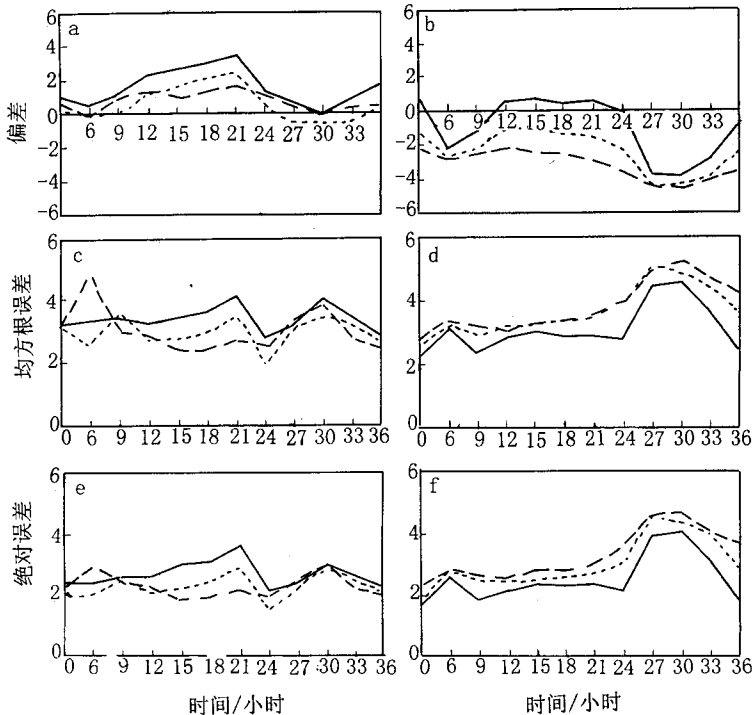


图 1 MM5 模式 2 米温度预报与实况的误差

a、b 分别为暖、冷季平均偏差，c、d 分别为暖、冷季均方根误差，e、f 分别为暖、冷季绝对误差。

实线：房山 虚线：门头沟 断线：东直门

2.1.2 10 米风的预报

由于受地形的影响，北京地区风向日变

化十分显著。图2是1999年5~8月东直门站观测的10米风向的平均日变化图,纵坐标为某种风向出现的频率。由图可知,上午风向以偏北风(NW~N~NE)为主,11:00~14:00之间偏北风转为偏南风;下午多偏南风(SW~S~SE),夜间02:00~05:00之间风

向再次由偏南转为偏北。中尺度数值预报系统很好地预报出了风向的日变化特征(图5b),两次风向转变的时间与实况基本一致。

图3是MM5预报10米风速与观测值(资料来源同2米温度)的误差,可以看到暖

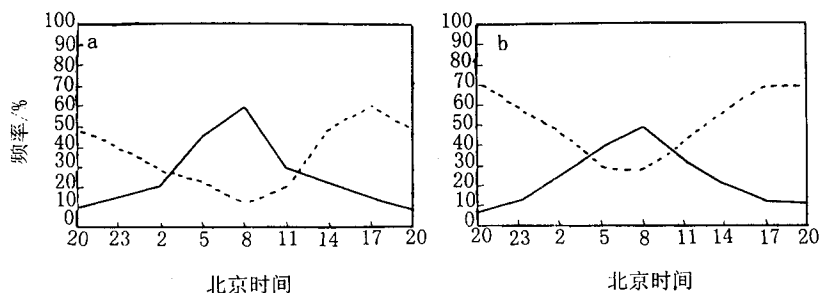


图2 1999年5~8月东直门站10米偏北和偏南风日变化图

(a)实况 (b)模式预报 实线:偏北风 虚线:偏南风

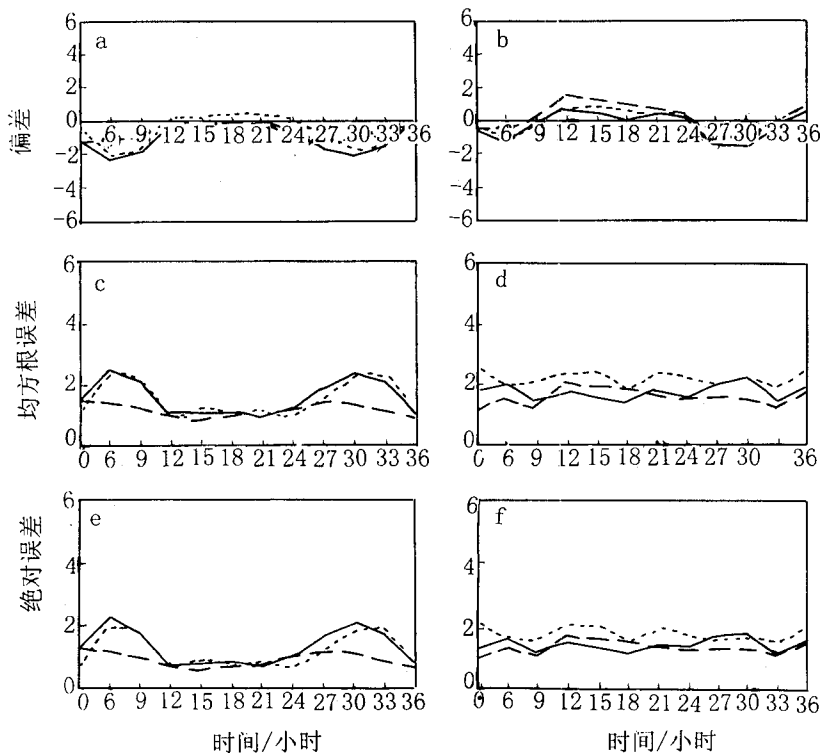


图3 MM5模式10米风速的平均预报误差

说明同图1

季偏差在 $-2\sim 0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,均方根误差最高为 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,绝对误差最大为 $2.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,各项指标略好于eta模式;白天风速预报偏小,主要为系统误差,夜间预报偏差很小,主要是随机误差。冷季预报偏差有较明显的日变化,白天为负,夜间为正。

总的来说,MM5模式的2米温度和10米风预报误差与NCEP的eta模式基本相

当,并且误差中有较大部分是系统误差,可以通过统计修正来提高预报准确性。

2.2 个例分析

为了考察模式在大幅度降(升)温及大风天气中的预报能力,我们选择几次典型过程进行分析。由于模式对各站的温度预报误差差异不大,我们仅选东直门站为代表进行说明。

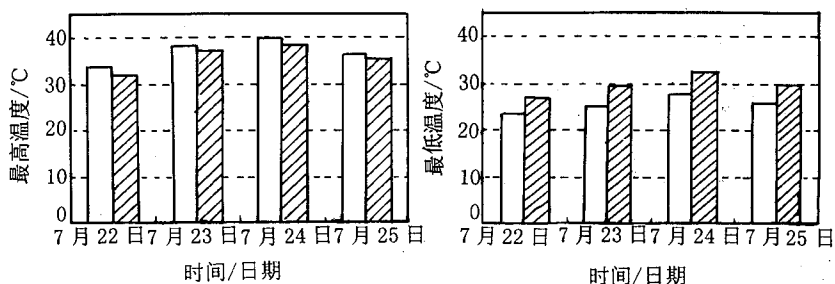


图4 1999年7月22~25日东直门站最高(左)、最低(右)温度变化
黑直方为预报,白直方为实况

1999年7月22~25日北京地区有一次明显的升温过程,从22~23日最高温度平均上升了 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$,24日温度继续上升,除了西北部山区,大部分地区自动站记录出现 40°C 以上的高温。这是近几十年来所罕见的。25日温度开始回落。模式很好地预报了这次持续高温

天气过程(图4),为预报员作出准确预报提供了很好的参考。从图中也可看出模式对夜间最低温度预报偏高。这一方面是由模式的系统误差造成;另一方面,目前模式为3小时输出一次,时间分辨率与自动站记录相比还比较粗,这也会导致最高、最低温度的误差。

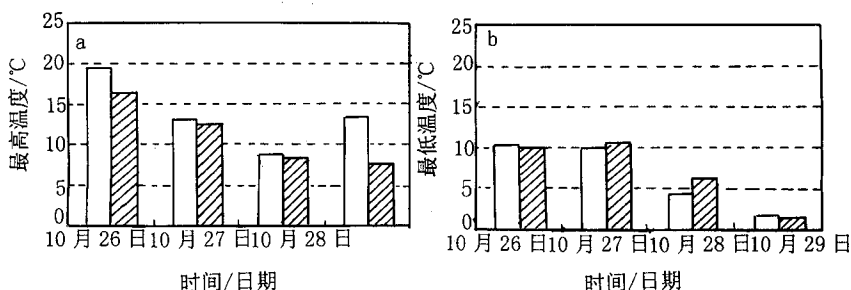


图5 1999年10月26~29日东直门站最高(a)、最低(b)温度变化
说明同图4

1999年10月26~28日,北京受东移南下的冷空气影响,出现一次明显的大风降温

天气。从26~28日东直门站的最高温度由 19.6°C 下降到 8.7°C ,最低温度从 10°C 降到

1.7℃(图5)。27日地面处于冷高压前部,受其影响入夜后风力逐渐加大。20时北部和西北部地区刮西北风,而其他地区以弱的西南风为主;23时城区开始转为西北风,并且风力增强;到28日08时前后大部分地区出现五到六级的西北风,至28日午后风力逐渐减小。通过与实测的最高最低温度的比较可以看出模式较好的报出了这次降温过程;模式基本预报出这次大风的开始、加强、减弱整个过程,但量级比实测值小(图略)。

3 结果与讨论

通过对该系统近一年的检验表明,中尺度非静力数值预报系统对北京地区2米温度和10米风的预报效果较好,温度预报误差与eta模式基本相当;模式成功地预报出北京地区风向的日变化特征,风速预报误差略小于eta模式。从一些天气过程预报的结果分析来看,系统能较好地抓住这些天气过程的特点,比较成功地预报出这些天气过程起始、盛行及结束的时间。

同时,从上面的检验也可看出,该系统还存在一些问题,如温度预报的系统误差,风速预报量级上的差异等,都有待于在今后的工

作中,通过对模式的辐射方案、下垫面参数、初始场等进行研究改进,以及在已有资料基础上对模式预报误差进行统计订正来进一步改善。

参考文献

- 1 王建捷,王迎春,崔波等.北京地区中尺度非静力数值预报系统的开发与实时预报应用.应用气象学报,1999,10(4):385~393.
- 2 John S Snook, Peter A Stamus, and James Edwards. Local-domain mesoscale model support for the 1996 Summer Olympic Games. FSL Forum, December 1996. 22~28.
- 3 Paul A. Nutter and John Manobianco. Twin-season comparison of meso-eta forecast accuracy at three select locations. 12th Conference on Numerical Weather Prediction, 1998. 139~142.
- 4 国家气象中心编译.资料同化和中期数值预报.北京:气象出版社,1991:185~187.
- 5 Louis, J. F. ,1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary Layer Meteorol. , 17, 187~202.
- 6 Louis, J. F. , Tiedtke, M. , Geleyn, J. F. , A short history of the PBL parameterization at ECMWF. ECMWF Workshop on planetary boundary layer parameterization, Reading, 25~27, 1982. 81, 51~80.

The Forecast of 2-m Temperature and 10-m Wind with Nonhydrostatic Mesoscale Numerical Forecasting System

Liang Feng Wang Yingchun

(Beijing Research Institute of Meteorological Science, 100081)

Abstract

For the prediction's requirement, the forecast of 2-m temperature and 10-m wind in Beijing area were developed with a nonhydrostatic mesoscale numerical forecasting system, which is developed by the National Meteorological Center and Beijing Meteorological Bureau. Quantitative forecast validation results show that the system runs successfully not only in general forecast but also in special weather. It predicts daily variation of wind direction in Beijing area successfully. Compared with eta model of NCEP, system's prediction errors of temperature are similar and errors of wind speed are better.

Key Words: nonhydrostatic mesoscal numerical forecasting 2-m temperature 10-m wind