

有限区域模式侧边界处理方案的比较试验

顾建峰

(上海市气象科学研究所, 200030)

提 要

用中尺度模式(MM5)与国家气象中心全球谱模式相嵌套,比较了三种侧边界处理方案对1997年3月华东地区27个测站地面要素预报质量的影响,发现不同侧边界条件对内域预报质量的影响存在一定的差异。

关键词: 有限区域模式 侧边界条件 地面要素 预报质量 比较试验

引言

数值预报的发展在很大程度上受到计算机资源的制约,鉴于目前的计算机条件,出现了大尺度的全球或半球模式和中小尺度的有限区域模式并存的情况。在有限区域的数值预报中,其侧边界的预报变数一般依赖于大尺度模式的预报结果,而对于有限区域数值模式,其侧边界条件的数值处理是一个既困难又重要的问题,该问题对内域是否适定,要看侧边界处理是否适当,但完全适定的侧边界条件又是不可可能的。因此,在有限区域的数值预报中,针对所要预报的区域,应选用较好

的侧边界处理方法,以便使由于侧边界处理所引入的误差在预报期间尽可能达到最小。

1 有限区域数值模式

以MM5的静力模式^[1]为基本框架,采用标准经度为125°E的Lambert地图投影,水平分辨率为37.5km,中心点在30.2°N、118.6°E,格点数为95×95。垂直方向是15层 σ 坐标,模式顶取100hPa,其中垂直速度 α 定义在整 σ 层上,其余变量定义在半 σ 层上。积分时间步长取120秒。地形资料取自 $\frac{1}{6} \times \frac{1}{6}$ 经纬度格点全球地形资料。模式中的水循环处

理采用稳定性降水和 Anthes-Kuo 型深对流参数化方案。行星边界层参数化采用高分辨行星边界层模式。地面温度预报是根据强迫~恢复薄层模式,通过地面能量收支方程计算的,在地面热量交换过程中考虑了向上和向下的净辐射通量。下垫面类型及相应物理参数是根据预报区域的实际情况确定的。模式侧边界的预报变数取自国家气象中心全球谱模式每12小时一次的预报产品。

2 侧边界条件

在 MM5 模式中有5种边界条件可供使用,即固定侧边界、时变不开放侧边界、时变流入/流出侧边界、时变海绵侧边界和张弛逼近侧边界。本文就后3种侧边界处理方案作比较试验。

2.1 张弛逼近侧边界条件

这种侧边界处理方法包含牛顿项和扩散项^[3]:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_n = F(n)F_1(\alpha_{LS} - \alpha_{MC}) - F(n)F_2 \nabla^2(\alpha_{LS} - \alpha_{MC}) \quad n = 2, 3, 4 \quad (1)$$

$$F(n) = \begin{cases} (5-n)/3 & n = 2, 3, 4 \\ 0 & n \geq 5 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_1 = \frac{1}{10\Delta t} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{(\Delta S)^2}{50\Delta t} \quad (4)$$

式中 ΔS 和 Δt 分别是模式的水平分辨率和积分时间步长。在这种方案中,侧边界上的预报变数受到一种强迫,这种强迫约束预报变数按一定时间尺度向外定场张弛。

2.2 时变流入/流出侧边界条件

这种侧边界是开放的,即容许大尺度波动进入模式的有限预报区域,但不允许从边界出去的大尺度或中小尺度扰动再以一定的振幅反射回来破坏预报结果。对于气压和温度,在气流流入和流出的边界上,均作为随时间平滑变化的函数而给定;对于速度分量,在

气流流入边界上的值类似于气压和温度的方式给定,而在气流流出边界上的值是从内域向外按外推法获得。

2.3 时变海绵侧边界条件

这种侧边界条件由大尺度时变趋势和模式计算出的趋势这两部分时变趋势的线性组合构成^[2],对任意变数 α 可写作:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_n = \omega(n) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_{MC} + [1 - \omega(n)] \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_{LS} \quad (5)$$

式中 n 是从边界开始向内的格点数(在边界上, $n = 1$),对于 cross-point, $n = 1, 2, 3, 4$; 对于 dot-point, $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 。下标 MC 和 LS 分别表示模式计算的趋势和大尺度趋势。 $\omega(n)$ 是权重系数,对于 cross-point,从边界向内分别取 0.0, 0.4, 0.7, 0.9; 对于 dot-point,从边界向内分别取 0.0, 0.2, 0.55, 0.8, 0.95; 对其它所有内域格点, $\omega(n) = 1$ 。

3 模式初值和侧边界资料

从实时资料库中读取1997年2月27日~3月30日每天08时的常规资料和非常规资料。常规资料有地面报、探空报(包括船舶报和测风报),非常规资料有卫星测风、卫星测厚及可降水报。同时读取国家气象中心全球谱模式每天20时预报的间隔12小时一次的预报产品,其中,12小时的预报产品用作客观分析的初估场,12~60小时的预报产品经空间和时间内插得到有限区域模式侧边界的预报变数和时间倾向值。客观分析采用三维最优插值方法,分析层次为11层(1000hPa~100hPa)标准等压面。分析场经插值转换到模式层次,形成有限区域模式的初值。

4 预报产品

有限区域模式以08时为初始时刻,从1997年2月27日至3月30日每天积分48小时,每间隔6小时输出一一次预报结果。预报产品以单站地面要素预报为主要形式,包括降水、气

温、风向、风速、海平面气压和相对湿度等。地面要素场由模式最低二个层次垂直外插得到^[4]。

设气温与气压对数成线性关系,则地面气温 T_s 由下式计算

$$T_s = \frac{1}{2}(T_N + T_{N-1}) + \frac{T_N - T_{N-1}}{2 \ln(P_N/P_{N-1})} \cdot \ln \frac{P_s}{P_{N-1}} \quad (6)$$

式中下标 N 表示模式最低层,下标 S 表示地面值。

地面比湿 q_s 由下式得到

$$q_s = q_N \left(\frac{P_s}{P_N} \right)^{G_N} \quad (7)$$

$$G_N = \ln \left(\frac{q_N}{q_{N-1}} \right) / \ln \left(\frac{P_N}{P_{N-1}} \right) \quad (8)$$

再由 T_s 可求得地面饱和比湿,最后求出地面相对湿度。

海平面气压 (SLP) 的表达式为:

$$SLP = P_s \exp$$

$$\left\{ \frac{2gz_s}{R} / \left[T_s + \left(T_s^2 + \frac{2gz_s}{R} \frac{T_N - T_{N-1}}{\ln(P_N/P_{N-1})} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (9)$$

地面风场由风场与气压成线性关系求出。

以上地面要素场和降水场经双线性内插得到测站上地面要素的预报值。

5 检验方法

由于预报产品是每天08时起报,预报48小时每6小时一次的单站地面要素,我们选取华东地区27个国家基本站作为检验对象。检验所用实况资料取自实时资料库中的地面报,检验时段为1997年3月1~31日,包括08时~08时的24小时降水量和与预报输出时次相对应的每天02、08、14和20时4个时次的气温、风速、风向、海平面气压和露点温度,实况相对湿度是由露点温度和气温推算出来的。

降水的检验采用时间序列的 TS 评分方法,即针对每一个测站:

$$TS = \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c} \quad (10)$$

$$NH = \frac{N_b}{N_a + N_b} \quad (11)$$

$$PO = \frac{N_c}{N_a + N_c} \quad (12)$$

$$EH = \frac{N_a + N_d}{N_a + N_b + N_c + N_d} \quad (13)$$

式中, N_a 是一个月中实况有雨预报正确的天数, N_b 和 N_c 分别为一个月中空报和漏报的天数, N_d 是一个月中实况无雨预报正确的天数, NH 为空报率, PO 为漏报率, EH 为预报效率。

若把27个测站视作一个整体,则整体 TS 评分 WTS 、整体空报率 WNH 、整体漏报率 WPO 和整体预报效率 WEH 定义如下:

$$WTS = \frac{WN_a}{WN_a + WN_b + WN_c} \quad (14)$$

$$WNH = \frac{WN_b}{WN_a + WN_b} \quad (15)$$

$$WPO = \frac{WN_c}{WN_a + WN_c} \quad (16)$$

$$WEH = \frac{WN_a + WN_d}{WN_a + WN_b + WN_c + WN_d} \quad (17)$$

式中, $WN_a = \sum_{i=1}^N N_{a_i}$, $WN_b = \sum_{i=1}^N N_{b_i}$, $WN_c = \sum_{i=1}^N N_{c_i}$, $WN_d = \sum_{i=1}^N N_{d_i}$, N 为测站数。

其余地面要素的预报效果视其与实况的误差绝对值大小。27个测站预报误差绝对值平均的月平均值 ERR 定义为:

$$ERR = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |\alpha_f - \alpha_o|}{MN} \quad (18)$$

式中, α 代表气温、风速、风向、海平面气压和相对湿度的任一要素,下标 f 表示预报值,下标 o 表示实况值, N 为测站数, M 是当月天数。

6 预报效果比较

我们把张弛逼近侧边界处理称为 B1 方案,把时变流入/流出侧边界处理称为 B2 方案,把时变海绵侧边界处理称为 B3 方案。

对于有/无降水的检验,三类侧边界方案单站预报效果由式(10)~(13)分别进行检验,整体预报效果由式(14)~(17)进行检验。比较逐站的 TS 评分,对于不同的侧边界处理方案,24小时预报只有3个测站的 TS 评分没有发生变化,其余24个测站的 TS 评分均发生了不同程度的变化,其中变化较大(\geq

5%)的测站有9个,2个测站的 TS 评分变化达到10%;对于48小时预报,所有测站的 TS 评分均发生了不同程度的变化,其中,有14个测站的 TS 评分发生了较大($\geq 5\%$)的变化,有5个测站的 TS 评分变化 $\geq 10\%$ 。从整体预报效果(表1)来看,24小时 TS 评分最高的是 B3 方案,最低的是 B1 方案,两者相差0.9%, B2 方案与 B3 方案相差0.3%;48小时 TS 评分最好的是 B1 方案,最差是 B3 方案,两者相差1.5%, B2 方案与 B1 方案相差0.9%。

表1 有/无降水的整体预报效果检验

预报时间	24小时				48小时			
	WTS	WNH	WPO	WEH	WTS	WNH	WPO	WEH
B1方案	0.674	0.308	0.038	0.777	0.598	0.358	0.103	0.713
B2方案	0.680	0.310	0.020	0.776	0.589	0.384	0.069	0.689
B3方案	0.683	0.306	0.023	0.782	0.583	0.393	0.064	0.679

表2是三类侧边界处理方案对 $\geq 10.0\text{mm}$ 降水的整体预报效果检验,24小时 TS 评分最高的是 B2 方案,最低是 B3 方案,两者相差6.7%;48小时 TS 评分最好的是 B3 方案,最差是 B1 方案,两者相差4.5%。1997年3月19日08时~20日08时的一次中雨过程,实况有12个测站出现 $\geq 10.0\text{mm}$ 的降水, B3 方案仅报对5个测站, B1 方案报对6个测站, B2 方案报对7个测站。

表2 $\geq 10.0\text{mm}$ 降水的整体预报效果检验

预报时间/小时	B1方案		B2方案		B3方案	
	24	48	24	48	24	48
WTS	0.137	0.010	0.186	0.046	0.119	0.055

表3是由式(18)计算的三类侧边界处理方案在各预报时次上的温度(T)、风速(WS)、风向(WD)、海平面气压(SLP)和相对湿度(RH)的平均预报误差(ERR)。从平均状况来看,不同侧边界处理方案之间的差

异不大。

7 小结

通过以上有限区域模式与全球谱模式相嵌套的3种侧边界处理方法对华东地区27个测站地面要素预报质量影响的对比分析,可以得到以下几点初步结论:

7.1 张弛逼近、时变流入/流出和时变海绵3种侧边界处理方法对内域预报质量的影响存在一定的差异,主要体现在降水预报方面,而对气温、风速、风向、海平面气压和相对湿度等地面要素的预报质量影响不大。

7.2 对降水预报质量的影响,不同侧边界处理方法之间的差异随预报时效的增长而增大。

7.3 对有/无降水的预报,24小时预报效果最好的是时变海绵侧边界条件,最差的是张弛逼近侧边界条件;48小时预报效果最好的却是张弛逼近侧边界条件,最差的是时变海绵侧边界条件。

表3 平均预报误差统计

时次	02时		08时		14时		20时		平均	
	18	42	24	48	06	30	12	36		
B1方案	<i>T</i>	2.14	2.93	1.94	2.62	2.29	2.91	1.83	2.72	2.42
	<i>WS</i>	1.93	2.39	1.69	2.08	1.45	1.74	1.74	2.12	1.89
	<i>WD</i>	61.25	63.19	62.98	65.65	51.53	64.43	55.46	60.12	60.58
	<i>SLP</i>	4.47	7.67	5.01	7.94	3.51	6.89	4.26	7.69	5.93
	<i>RH</i>	11.03	12.75	9.98	15.17	13.82	16.15	11.44	13.31	12.96
B2方案	<i>T</i>	2.16	2.88	1.94	2.55	2.29	2.86	1.84	2.65	2.40
	<i>WS</i>	1.97	2.47	1.65	2.09	1.44	1.70	1.71	2.23	1.91
	<i>WD</i>	60.98	64.05	63.07	66.42	50.15	63.67	54.17	61.74	60.53
	<i>SLP</i>	4.59	6.95	5.00	7.51	3.77	7.15	4.38	7.78	5.89
	<i>RH</i>	10.90	12.65	9.72	14.56	13.78	15.49	11.32	12.86	12.66
B3方案	<i>T</i>	2.18	2.86	1.97	2.59	2.30	2.87	1.87	2.65	2.41
	<i>WS</i>	2.07	2.48	1.71	2.06	1.44	1.69	1.81	2.15	1.93
	<i>WD</i>	60.38	64.70	63.93	65.92	50.65	61.99	52.62	62.81	60.37
	<i>SLP</i>	4.19	6.89	4.68	7.36	3.84	6.90	4.27	7.34	5.68
	<i>RH</i>	10.84	12.81	9.66	14.79	13.84	15.45	11.37	13.15	12.74

注: *T* 表示温度误差(°C), *WS* 为风速误差($m \cdot s^{-1}$), *WD* 为风向误差(度), *SLP* 为海平面气压误差(hPa), *RH* 为相对湿度误差(%)

7.4 对于 $\geq 10.0mm$ 的降水,预报效果相对较好的是时变流入/流出侧边界条件。

参考文献

1 Georg A. Grell, Jimmy Dudhia and David R. Stauffer. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR TECHNICAL NOTE, June 1994.

2 Perkey D. J. and C. W. Kreitzberg. A time-dependent lateral boundary scheme for limited-area primitive equation models. Mon. Wea. Rev., 1976,104:744~755.
 3 Davies H. C. Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. Mon. Wea. Rev., 1983,111:1002~1012.
 4 钱永甫,颜宏,王谦谦等. 行星大气中地形效应的数值研究. 北京:科学出版社,1988:69~71.

Numerical Experiments with Lateral Boundary Conditions for Limited-area Model

Gu Jianfeng

(Shanghai Meteorological Institute, Shanghai, 200030)

Abstract

The hydrostatic model of MM5 is nested to the global spectral model of NMC. It is compared with three lateral boundary conditions on prediction quality of surface elements of 27 observational stations in east China in March 1997. It is shown that effects with different lateral boundary conditions on prediction quality are fairly difference.

Key Words: limited-area model lateral boundary conditon surface element prediction quality numerical experiment