

第八讲 国家气象中心业务预报模式

葛蔼芬 李泽椿

(北京气象中心)

随着科学技术的现代化,尤其是电子计算机的问世和迅速发展,天气预报开始向着客观化、定量化迈进。在世界上,越来越多的国家建立了数值预报业务,预报水平不断提高。我国自1954年就开始了数值预报的理论研究。1965年春,中央气象台开始发布正压的500毫巴预报图。1969年,资料、客观分析和数值预报联机试验成功。近年来,中央气象台再度组织了短期数值预报业务。1979年11月开始用原始方程三层模式在M-170机上进行运算并于1980年7月发布传真(即A模式)。但是,由于垂直分辨率比较低,计算范围小,不能适应广大气象台的需求。在提高精度、扩大范围的前提下,从业务化要求出发,在中国科学院大气物理研究所研制的原始方程北半球三层模式基础上加以改进,发展成目前的数值预报业务B模式。1982年2月16日正式代替A模式发布传真。

一、北半球原始方程五层模式——5L-NHM

1. 模式概况

(1) 基本方程组

5L-NHM采用一种修改的 σ 坐标,按地形高度取一个参考层 p_m ,该层以上具有 P 坐标的性质,下部又保持了 σ 坐标的特点。 σ 定义是

$$\sigma = \begin{cases} \frac{p}{\pi_u} \\ \frac{p - p_m}{\pi_L} + \sigma_m, \quad \pi_u = p_m / \sigma_m = \text{常数}, \quad 0 < p < p_m; \pi_L \end{cases}$$

$$= p_* - p_m / 1 - \sigma_m = \pi_L(x, y, t), \quad p_m < p < p_*.$$

p_* 为场面气压, σ_m 是与 p_m 对应的 σ 值。这种坐标对任意垂直分辨率模式来说,垂直方向格距是相等的,且与一般 σ 坐标一样,在大气上界($p=0$), $\sigma=0$, 地表面($p=p_*$), $\sigma=1$ 。参考层 p_m 可以随地形而抬升,当 p_m 抬至大气顶($p_m=0$)时, $\sigma=0$, 则还原为普通 σ 坐标。使用这种坐标系,模式大气上半部方程组中气压梯度力项与 p 坐标中的形式一样,避免了因计算大量小差而产生的误差,也减小了在形成初值、结果输出时由于插值而带来的误差。在模式大气的下半部,地表面就是坐标面,下边界条件可以取得十分简单。在修改的 σ 坐标系中,基本方程组为:

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi u}{m} \right) = -L(u) + f \frac{\pi v}{m} - \frac{\pi}{m} f v_g + \frac{\pi}{m} F_u \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi v}{m} \right) = -L(v) - f \frac{\pi u}{m} + \frac{\pi}{m} f u_g + \frac{\pi}{m} F_v \quad (8.2)$$

热力学方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c_p \pi T}{m} \right) = & -L(c_p T + \phi) - \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial \sigma} [(\sigma - \sigma_m) \phi] \frac{\partial \pi}{\partial t} \\ & + \left(\frac{\pi u}{m} f v_g - \frac{\pi v}{m} f u_g \right) + \frac{\pi}{m} c_p F_T + \frac{\pi}{m} \dot{H} \end{aligned} \quad (8.3)$$

水汽方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi q}{m} \right) = -L(q) + \frac{\pi}{m} (E - c) + \frac{\pi}{m} F_q \quad (8.4)$$

连续方程:

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\pi u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\pi v}{m} \right) \right] - m \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\pi \dot{\sigma}}{m} \right) \quad (8.5)$$

倾向方程:

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = \frac{m^2}{1 - \sigma_m} \int_0^1 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\pi u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\pi v}{m} \right) \right] d\sigma \quad (8.6)$$

静力方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p} \quad (8.7)$$

方程中 u 、 v 、 T 、 ϕ 、 q 分别为预报量风速、温度、高度及比湿, F_u 、 F_v 是摩擦扩散项, F_T 、 F_q 为扩散项, $\dot{H}$ 是加热项, E 、 c 分别为蒸发率和凝结率。

以上为五层原始方程模式基本方程组, 其中热力学方程取上述形式, 是便于构成总能量守恒形式的差分格式, 静力方程差分可以不受任何限制则是突出的特点。

(2) 模式结构

① 水平、垂直方向格点分布 在极射赤面投影图上取正方形积分区, 整个区域包含 51×51 个格点。 $60^\circ N$ 格点间距离为 381 公里, 格点均匀分布。水平方向, 变量 u 、 v 、 T 、 q 、 ϕ 均定义在同一格点上。在垂直方向, 模式大气按 σ 等距分成五层 ($\Delta\sigma = 0.2$), 参考层取在 600 毫巴, 与之对应的 σ_m 为 0.6, 变量 u 、 v 、 T 、 q 、 ϕ 定义在模式整层上, 而 $\dot{\sigma}$ ($= \pi \dot{\sigma}/m$) 在中间的半层上, 如图 8.1 所示。水汽仅在下三层予以考虑, 这样可以避免由于整层加入水汽造成降水量过大, 导致凝结热释放所引起的增温过高。

5L-NHM 引入的地形资料是由实际高度经降低、光滑后的地形资料。这样处理后, 我国西部高原最大高度仅 2700 米。

② 边界条件 模式大气上界 ($\sigma = 0$) 和地面 ($\sigma = 1$) 的垂直速度 $\dot{\sigma} \equiv 0$ 。水平边界取固定边界, 并对靠近边界的最外五排格点进行松弛处理, 即

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^* = \frac{\partial A}{\partial t} + k \nabla^2 (A^{l-1} - A^0)$$

A 为变量 u 、 v 、 T 、 q 、 ϕ 、 π ; $(\partial A / \partial t)^*$ 为修正后的倾向, A^0 为各变量的初值, k 是给定的系数。

③ 差分格式 为了求解大气基本方程组, 必须把微分方程写成差分方程, 然后进行计算。首先定义如下差分算子:

$$\bar{A}^x = \frac{1}{2} \left[A \left(x + \frac{\Delta x}{2} \right) + A \left(x - \frac{\Delta x}{2} \right) \right],$$

$$A_x = \frac{1}{\Delta x} \left[A \left(x + \frac{\Delta x}{2} \right) - A \left(x - \frac{\Delta x}{2} \right) \right].$$

模式大气方程中气压梯度力项 $f u_g$ 、 $f v_g$, 平流项 $L(A)$ 和散度项的差分可以写成

$$f u_g^* = -m [\bar{\phi}_x^* + k \bar{T}^y (\ln p)_y],$$

$$f v_g^* = m [\bar{\phi}_y^* + R \bar{T}^x (\ln p)_x],$$

$$L^*(A) = m [(\bar{U}^x \bar{A}^x)_x + (\bar{V}^y \bar{A}^y)_y] + [\sum \bar{A}^\sigma]_\sigma,$$

$$D^* = \bar{U}_x^* + \bar{V}_y^*;$$

其他项采用中央差分。式中 A 分别表示 U 、 V 、 q 、 $c_p T + \phi$ 。静力学方程的差分, 先将 $\partial \phi / \partial p$

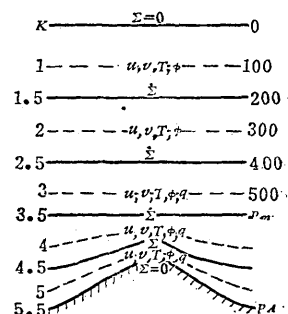


图 8.1 模式大气的垂直分层和变量分布

$= -RT/p$ 写在 1.5、2.5、3.5、4.5 层上, 取中央差:

$$\phi_k = \phi_{k+1} + \frac{R}{2} \ln \left(\frac{p_{k+1}}{p_k} \right) (T_k + T_{k+1}) \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (8.8)$$

当 $p > p_m$ 时, 静力方程也可写成另一种形式:

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} [(\sigma - \sigma_m) \phi] = \phi - \frac{RT}{\beta} \quad (8.9)$$

其中

$$\beta = 1 + \frac{p_m}{(\sigma - \sigma_m) \pi_L}, \text{ 积分后得}$$

$$\phi_5 = -\phi_4 + R \left(\frac{T_4}{\beta_4} + \frac{T_5}{\beta_5} \right) + \left(\frac{1 - \sigma_m}{\Delta \sigma} \right) \phi^*$$

ϕ_* 是地形高度, ϕ_4 可由 (8.8) 式求得。然后对静力方程进行时间微商, 以避免模式垂直分层比较少时由温度反算高度产生误差。按上述方法构成的差分方程, 在时间连续情况下, 全球积分具有总质量、平流项平方、总能量的守恒性质。

④ 时间差分 5L-NHM 积分时间步长为 12 分钟, 除运动方程中气压梯度力项差分取平均格式外, 其他项均用中央差, $A^{t+1} = A^{t-1} + 2\Delta t (\partial A / \partial t)^t$, 并进行时间光滑。

在差分方程中, 当采用显式格式时, 时间步长和空间步长要受线性稳定条件 $c\Delta t / \Delta x \leq 1$ 的限制。模式中因存在快波, 在空间步长一定的情况下, 时间步长比较短, 为了拉长时间步长, 节约计算时间, 方程 (8.1)、(8.2) 中气压梯度力项时间差分采用平均格式, 即用三个时刻的加权平均表示, 可以证明, 时间步长将拉长为中央差的两倍。

(3) 物理过程

① 扩散和摩擦 方程 (8.3)、(8.4) 中 F_T 、 F_q 为水平扩散, (8.1) 和 (8.2) 式中的 F_u 、 F_v 包含两部份, 水平扩散和摩擦。水平扩散可表示为 $F_A^H = cm^2 k_1 \nabla^2 A$ ($A = u, v, T, q$), 扩散系数 $k_1 = 2 \times 10^5 \text{ 米}^2 \text{ 秒}^{-1}$, c 的取值从边界向内逐渐减小, 以防边界附近产生计算波。摩擦仅在下两层考虑, 摩擦力可写成

$$F_A^N = - \frac{g}{\pi} \frac{\partial \tau_x(y)}{\partial \sigma}$$

在地表面切应力, $\tau_x(y) = \rho_c D |u_x(v_x)| u_x(v_x) \times 10^{-5}$, 地表面大气密度 $\rho_c = 1.1 \times 10^3 \text{ 克/米}^3$, 拖曳系数 $D = 3 \times 10^{-3}$, 地面风速 $u_x(v_x)$ 假定与模式大气第五层相同, 垂直扩散系数 $k = 10 \text{ 米}^2 \text{ 秒}^{-1}$, R 为气体常数。

② 大尺度凝结 大尺度凝结是在稳定层结下, 由大尺度上升运动引起的, 凝结率虽不如对流凝结强, 然而影响面积比较广, 持续时间长, 过程降水量比较大, 潜热释放的反馈动力作用也十分重要。5L-NHM 中大尺度降水采用饱和法计算, 其特点是不考虑降水过程的详细机制, 只要水汽超过一定程度的饱和, 则超过饱和部分的水份完全变为降水降落, 而凝结释放的潜热使空气增温, 随之影响大气中饱和水汽量。这里没有考虑水滴在降落过程中的蒸发; 故各层凝结量之和即为地面降水量。具体计算步骤参看第七讲。

③ 小尺度降水 采用了郭晓岚 1965 年提出的积云对流参数化方案, 见第七讲的介绍。

除上述物理过程外, 本模式还考虑了大气辐射和下垫面的感热、水汽交换等, 这里不一介绍。

(4) 初值及结果输出

在求模式方程的数值解时, 除需要边界条件外, 还需要初值。5L-NHM 由客观分析提供的海平面气压, 100、300、500、700、850 毫巴等压面高度以及后三层的温度露点差, 计算出场面气压, 模式大气各层的高度、温度、湿度以及风场。而风场是通过求解非线性平衡方程得到的无辐散风。最后, 为使用方便, 均将模式预报结果转换成标准等压面层上的值, 并由场面气压推算出海平面气压。

2. 业务预报效果检验

(1) 统计学检验

在日常业务中, 作为模式预报检验资料, 每天计算的统计量有偏差、均方根误差和相关系

数

$$\text{COR} = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N (Z_{fi} - \bar{Z}_f)(Z_{oi} - \bar{Z}_o)}{\frac{1}{N} \sum_1^N (Z_{fi} - \bar{Z}_f)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_1^N (Z_{oi} - \bar{Z}_o)^2}$$

技巧评分

$$S_1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N \left\{ \left| \frac{\partial Z_f}{\partial x} - \frac{\partial Z_o}{\partial x} \right|_i + \left| \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \frac{\partial Z_o}{\partial y} \right|_i \right\}}{\sum_1^N \left\{ \max \left(\left| \frac{\partial Z_f}{\partial x} \right|, \left| \frac{\partial Z_o}{\partial x} \right| \right)_i + \max \left(\left| \frac{\partial Z_f}{\partial y} \right|, \left| \frac{\partial Z_o}{\partial y} \right| \right)_i \right\}} \times 100$$

Z_f 、 Z_o 分别为预报和相应的实况值, $\bar{Z}_f$ 、 $\bar{Z}_o$ 为样本平均值, i 、 N 是检验区内格点序号及总格点数, $\max(A, B)$ 表示取 A 、 B 中最大值。

图8.2给出1982年我国范围5L-NHM500毫巴24小时预报的月平均 S_1 变化。可以看出, 夏半年 S_1 值比冬半年大; S_1 是按地转风速将预报与实况地转风差规格化的量, 所以 S_1 越大预报越差。夏季比冬季约大20左右, 从全年看, 平均在30—50之间。

(2) 天气学检验

B方案投入预报业务使用以后, 收到各省市的检验报告, 尽管侧重面不同, 方法不一, 但是预报结果的评价尚可以作为检验模式预报效果的参考, 综合起来有: ①700毫巴36小时预报准确率约为76%; ②500毫巴48小时预报准确率约为75%。

西风带形势预报基本能给出演变趋势, 尤其经向调整过程, 如横槽崩溃、维持, 纬向环流转为经向环流等, 模式有较好的预报能力。但是还存在着一些问题, 如横槽和乌拉尔山阻塞高压建立预报比实况落后, 预报西风带中切断过程, 模式仍有一定困难。另外, 由于网格比较大, 国内一些中尺度系统的预报还有待提高水平分辨率来改进。关于系统预报误差也作过粗略检查, 平均系统位置偏差约4—5个经度, 比实况落后, 系统中心强度比实况偏弱, 500毫巴误差约 ± 5 —8位势什米。

此外, 目前业务客观分析中尚未加入台风资料, 故当有台风出现时, 海上环流预报或许会出现不合理的配置, 这个问题正在考虑解决。

(3) 模式运转的评价

业务模式与研究模式有显著的差别, 除预报的准确性外还需要在各种天气形势或资料条件下都能保证计算稳定, 在一定的计算机条件下要尽可能地节约计算时间, 以争取预报时效。五层北半球原始方程模式自1981年试运转以来, 未出现过由于模式计算不稳定而不能提供预报的情况; 出图率高, 并且通过程序优化差分格式的改进, 目前制作一次48小时北半球预报所需计算机时间约60分钟, 一般能赶上用户使用。

3. 物理量计算

为了更好地使用数值预报的结果, 我们还逐日计算了预报的涡度、散度、垂直速度、厚度(ΔH_{1000}^{500})、变高($\Delta h^{24} = h^{30} - h^{12}$)、假相当位温、全风速、水汽通量、饱和假相当位温(即温度露点差为零时的假相当位温)及温度露点差。

二、有限区域模式及初步效果

国家气象中心五层原始细网格模式是以降水预报为主要对象的, 目前正处在业务试验中。细网格模式采用了 σ 坐标系, 预报方程大体与北半球模式一样, 仅热力学方程写成如下形式。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi T}{m} \right) = -m \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\pi u}{m} T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\pi v}{m} T \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\pi \dot{\sigma}}{m} T \right)$$

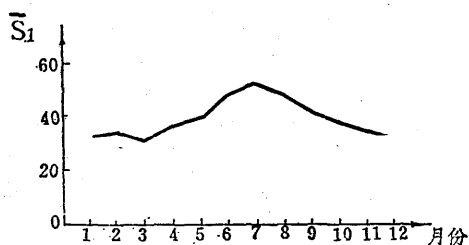


图8.2 1982年 S_1 月平均变化

$$+ \frac{R}{c_p} \left[T \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\pi}{m} \right) + uT \frac{\partial \pi}{\partial x} + vT \frac{\partial \pi}{\partial y} \right] + \frac{R}{c_p} \frac{T}{\sigma} \frac{\pi \dot{\sigma}}{m} - \frac{\pi}{m} \frac{F_H}{c_p} + D_T$$

式中 F_H 为绝热加热率, D_T 是水平扩散。积分区包括 35×27 个格点, 格距为 190.5 公里, 垂直方向按 σ 等距分成五层, $\Delta\sigma = 0.18$, ϕ 和 $\dot{\sigma}$ 定义在奇数层上, u 、 v 、 T 、 q 在偶数层上, 水汽仅在下面三层考虑。

方程组中非线性平流项及气压梯度力项空间差分格式与北半球模式类似。为阻尼高频振荡, 时间积分用欧拉后差与中央差交替的格式, 在中央差过程中也应用了时间滤波。时间步长为 4.5 分钟。侧边界为固定边界, 对边界内四圈进行如下修改:

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^* = \frac{\partial A}{\partial t} - k(A - \bar{A}) \quad (8.10)$$

$\bar{A}$ 为初值, k 为松弛系数。就 24 小时预报而言, 模式的稳定性比较好, 24 小时地面主要系统趋势正确, 移速偏慢 0—5 个经度, 强度偏弱, 但不超过 5 毫巴; 对国内大范围系统性降水有一定预报能力, 南方降水区容易预报偏大, 边界附近系统预报比较差, 尚需改进侧边界的处理。

三、嵌套试验

由于计算机条件所限, 目前还只能制作全球或半球的粗网格数值天气预报。采用能够表示中小尺度天气系统的细网格, 积分流体动力学方程所需计算机时间将大大超过容许条件, 至少无法适应业务预报截止时间的要求。而某些小尺度天气系统又多为局地性的 (如飓风、强雷暴等), 故将部分区域使用细网格, 随之引进了侧边界处理的问题。

有限区域模式中, 边界波动反射是影响模式稳定性的一个重要效应。侧边界处理不当, 边界附近将会产生扰动并逐渐向预报区域内传播, 最后破坏了整个预报场。目前, 通常将有限区域模式与全球或半球模式相衔接进行计算, 后者为前者提供边界值, 并把这种方法称为“嵌套”。嵌套的方法有两种, 一种是容许两个模式的影响相互作用; 另一种是全球或半球模式预报的影响能到达细网格边界区, 而细网格模式预报系统只能通过边界移出但无反射。我们按后一方案对两个业务模式用同时刻资料进行了无地形嵌套试验, 边界值由 (8.10) 给出, 其中 $\bar{A}$ 为北半球模式的预报值。24 小时有限区域预报取得良好效果,

表 8.1

资料时间 (世界时)	预报时效	内 容	资料时间 (世界时)	预报时效	内 容
12时	实 况	100毫巴高度	12时	实 况	500毫巴24小时变高
12时	实 况	200毫巴高度	12时	实 况	地面24小时变压
12时	实 况	300毫巴高度	12时	36 小时	700毫巴高度
12时	实 况	500毫巴高度	12时	48 小时	500毫巴高度
12时	实 况	700毫巴24小时变高	12时	72 小时	500毫巴高度

表 8.2

资料时间 (世界时)	预报时效 (小时)	内 容	资料时间 (世界时)	预报时效 (小时)	内 容
12时	36	500毫巴涡度	12时	36	300-850毫巴散度差
12时	48	500毫巴涡度	12时	36	850毫巴水汽通量
12时	36	700毫巴垂直速度	12时	36	850毫巴温度
12时	48	700毫巴垂直速度	12时	36	700毫巴 θ_{se}
12时	36	700毫巴水汽通量	12时	36	500毫巴 θ_{se} -850 毫巴 θ_{se}^*
12时	48	700毫巴水汽通量	12时	36	850毫巴全风速
12时	36	500毫巴 $\Delta H_{24}^{(1)}$	12时	36	700毫巴 $T - T_d$
12时	36	700毫巴全风速	00时	实况	700毫巴垂直速度
12时	36	500-1000毫巴厚度	00时	实况	500毫巴涡度

注: (1) 表示 36 小时—12 小时。

计算稳定, 无明显二倍格距波, 北半球预报系统能顺利地通过边界进入细网格区, 而细网格预报系统也能经边界流出, 大致达到嵌套的目的。但这还仅是初步的尝试。

四、产品输出和资料存贮

北半球预报结果按两种方式输出, 宽行打印和 X—Y 仪绘图; 前者除等值线外还附有格点资料以备归档改进使用; 后者主要用于传真, 为广大气象台使用。目前传真产品内容参见表 8.1 和 8.2。

作为业务化的另一部分, 也将逐日客观分析的结果, 24、36、48、60、72 小时预报记入磁带贮存, 供科研及业务改进等调用。