

参考大气在中期天气预报 和气候模拟中的应用

陈嘉滨 舒静君

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文概述了根据应用参考大气概念提出的参考大气谱模式计算格式(或称静力扣除法)在国内外一些气象机构的中期天气预报、后处理和四维同化、以及气候模拟中的应用。计算表明,这种参考大气谱模式计算格式,能有效的减少截谱误差,明显地改进中期天气预报和气候模拟。

关键词: 参考大气; 谱模式计算格式; 中期天气预报; 气候模拟。

一、前 言

地形在不同时间和空间尺度上对大气运动产生重要影响,不仅产生强烈的阻碍,还起到热源(或汇)的作用。因此,在制作天气预报和气候模拟的数值模式中,处理好地形是十分重要的。

在预报模式中,由于要引入地形,人们往往采用地形坐标。在此坐标中,下边界条件变得十分简单,然而在地形上空坐标面变得十分陡峭,这就引起一系列的计算问题。例如在动量方程中的气压梯度项的数值计算。在地形坐标中,它分裂为大量小差的两项,导致计算不精确,出现较大的计算误差。热力学方程中的温度平流(垂直和水平)项也有类似的问题。曾庆存^[1-7]最早指出了上述这些问题,并提出可以用引入参考大气而扣除标准层结(Standard Stratification)的方法来加以克服,其后,他和他的合作者成功地用此法设计格点的大气环流模式^[8-11, 12],取得很大的成功。

其次,对于大气谱模式还有特殊问题出现。地形高度经截谱以后,在陡峭地形和平原或海洋之间的过渡区域,产生 Gibbs 波和海上的负地形高度。同时,截谱地形的最大高度和原始地形的最大高度所在地理位置发生位移。在低分解谱模式中,这种由截谱引起的 Gibbs 波有较大的振幅;在高分解模式中,它虽然较小,但在预报的降水分布和大小上产生明显的误差。另外,在低分解气候模拟中,在下沉区产生虚假的高气压,抑制降水发生,引起降水区域的不实际的分裂。

这些问题的影响,随着模式分解的增加而逐渐减少。但是分解的增加意味着计算量的猛增,这就要求计算机的不断更新来取得高速计算和更大的存储空间。

为了解决这些问题, 陈嘉滨、纪立人等^[13]首次在谱模式控制方程中引入了参考大气, 提出了参考大气谱模式计算格式 (或称静力扣除法)。在此计算格式中, 热力学变量不是温度本身, 而是温度与参考大气温度的偏差; 地形位势高度偏差代替了地形位势高度本身。这种偏差变量较为光滑, 且具有较小的截谱误差。实际例子计算表明, 这种参考大气谱模式计算格式能有效地克服上面提到的问题, 明显的改进预报质量。这种新的计算格式在欧洲中期天气预报中心 (简称 ECMWF) 进一步发展, 并在该中心的 10 天中期业务预报中应用^[14-18]和在汉堡大学气象系的气候模拟中应用^[12], 改进了 10 天的中期预报和长期气候模拟。这种参考大气谱模式计算格式进一步发展, 参考大气不但取作气压函数, 还取作纬度函数^[19]使截谱误差进一步减少。这种格式在澳大利亚气象局研究中心 (BMRC) 和美国国家气象中心 (NMC) 作实例对比试验^[20,21], 明显地改进了预报。

参考大气的概念, 首先由曾庆存 1963 年提出, 并进一步发展。在国外, N. A. Phillips 在 1973 年也提出类似的概念^[22]。所谓参考大气, 它是大气状态的多年气候平均, 实际大气是被看作这种平均状态的扰动^[3]。实际大气与参考大气越是接近, 它们之间的偏差就越小。利用这一点, 我们可以在谱模式中有效地减少截谱误差, 提高预报质量^[13]。

本文概述了根据参考大气概念提出的参考大气谱模式计算格式, 近年在国内外的应用和进一步发展、及取得的一些计算结果。

二、参考大气

参考大气概念首先由曾庆存^[11]提出, 以后由于计算的需要, 又进一步发展。现在给出如下几种定义。

1. 大气层结参数为常数的参考大气

文献[12]给出一种在理论分析中最为简单的参考大气, 它是

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \ln p} = -R\bar{T}, \\ \frac{R^2 \bar{T}}{g} \left(\frac{g}{c_p} + \frac{d\bar{T}}{dz} \right) = C_0^2, \end{cases} \quad (1)$$

其中大气层结参数 C_0^2 取为常数, $\bar{\Phi}$ 和 $\bar{T}$ 分别是参考大气的位势高度和温度, 其他符号为常见符号。由方程 (1) 可推得 $\bar{T}$ 和 $\bar{\Phi}$ 分别为

$$\begin{cases} \bar{T}(p) = T_a + T_b \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \\ \bar{\Phi}(p) = c_p T_b \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R}{c_p}} \right] - R T_a \ln \left(\frac{p}{p_0} \right), \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} T_a &= c_p C_0^2 / R^2, & T_b &= \bar{T}_0 - c_p C_0^2 / R^2; \\ \bar{T}_0 &= 288\text{K}, & p_0 &= 1013 \text{ hPa}, & d\bar{T}/dz &= -0.0065^\circ \text{C/m}. \end{aligned}$$

而当 $\bar{T} = \bar{T}_0$ 时, 层结参数 C_0^2 是与方程(1)的第二式 C_0^2 的值相同, 即 C_0^2 为一常数。

以 (2) 式定义的参考大气温度, 在 200 hPa 层以下, 与国际标准大气分布大致相同; 在 200 hPa 层以上, 温度 $\bar{T}$ 随着气压 p 的减少而减少并趋于常数 T_a (≈ 94 K)。这显然同大气的多年气候平均相差甚远。为此, 在文献[4]中将 200 hPa 层以上的温度 $\bar{T}$ 取为一个常数 216 K, 这样可减少高层的计算误差。

2. 大气层结参数为气压函数的参考大气

为了描写大气温度分布在平流层的逆转特征, 在 (2) 式中 C_0^2 取为气压 p 的函数。在文献[19]中, 是以国际标准大气温度分布的离散值为基础, 用线性插值方法求出所需层次上参考大气的 $\bar{T}$ 和 C_0^2 。显然, 这时的 $\bar{T}$ 和 C_0^2 都不可能是一个解析表达式。在文献[23]中是用 Spline 函数拟合国际标准大气, 这时的参考大气的温度 $\bar{T}$ 和层结参数 C_0^2 是分段的解析函数。在文献[24]中, 在大气的下层和上层分别各用一个二次函数来拟合国际标准大气, 得到的参考大气温度 $\bar{T}$ 和层结参数 C_0^2 显然是解析函数, 这就使得计算更为有效。计算公式为

$$\bar{T} = \bar{T}_c + (\ln p - \ln p_c)^2 / 2q_c,$$

其中 $\bar{T}_c = 216.65$ K, $p_c = 130$ hPa。当 $p > p_c$, $q_c = -0.02948521$ K⁻¹; 当 $p \leq p_c$, $q_c = 0.278482416$ K⁻¹。另外可推出层结参数为

$$C^2 = \frac{R^2}{c_p} \bar{T} - \frac{R}{q_c} \ln(p / p_c).$$

3. 纬度函数的参数大气

在文献[19]中把参考大气发展为纬度函数。这时运动方程中气压梯度项就多出一项:

$$-\frac{1-\mu^2}{a} \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \mu} \right)_p,$$

其中 $\mu = \sin \varphi$, φ 是纬度; a 为地球半径; 角码 p 表示在等压面上取值。而热力学方程增加了如下项:

$$\frac{1}{a} \left(V \frac{\partial \bar{T}}{\partial \mu} \right)_p.$$

4. 地面位势高度偏差 Φ'_s

引入参考大气后, 地表面位势高度 Φ_s 为地表面位势高度偏差 Φ'_s 所代替, 它是一个时空函数, 定义为

$$\Phi'_s = \Phi_s - \bar{\Phi}(p_s),$$

这用在文献[16]的计算中。在参考文献[19]和[13]中, 以 $\ln p_s$ (地面气压 p_s 的对数) 作为变量, 参照文献[3]的办法, 将 $\bar{\Phi}(p_s)$ 在 $\ln p_s$ 处展开, 求得 Φ'_s 的近似为

$$\Phi'_s = R \overline{T_s} (\ln p_s - \overline{\ln p_s}),$$

其中, $\overline{T_s}$ 和 $\overline{\ln p_s}$ 是参考大气在地面的温度和地表气压的对数。

三、预报方程组

温度和位势高度变量分裂为两部分:

$$\begin{aligned} T_v &= \overline{T}(p) + T'_v(\lambda, \mu, p, t), \\ \Phi &= \overline{\Phi}(p) + \Phi'(\lambda, \mu, p, t), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\overline{T}$ 和 $\overline{\Phi}$ 分别是参考大气的温度和位势高度, T_v 是虚温; T'_v 和 Φ' 分别是温度和位势高度的偏差部分。

采用一般的地形垂直坐标^[25]

$$\eta = \eta(p, p_s),$$

这里 $\eta(0, p_s) = 0$ 和 $\eta(p_s, p_s) = 1$, p_s 是地表气压, 预报方程组^[9]可写为

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial \mu} + K_\xi, \quad (4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial \mu} + \nabla^2 G + K_D, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{V}{a} \frac{\partial q}{\partial \mu} - \left(\dot{\eta} \frac{\partial q}{\partial \eta} \right) \frac{\partial q}{\partial p} + P_q, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} &= -\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial T'}{\partial \lambda} - \frac{V}{a} \frac{\partial T'}{\partial \mu} - \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial T'}{\partial p} \\ &\quad + \left(\frac{R_d}{C_{pd}} T' + \frac{R_d}{C_{pd}} T_q + \frac{C^2}{R_d} \right) \frac{\omega}{p} + P_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left(V \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0, \quad (8)$$

$$d\Phi' = -R_d T'_v d \ln p, \quad (9)$$

地面气压倾向方程可由连续方程 (8) 求得

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = -\frac{1}{p_s} \int_0^1 \nabla \cdot \left(V \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta. \quad (10)$$

如果以 p_s 作预报变量则为

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\int_0^1 \nabla \cdot \left(V \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta. \quad (10')$$

预报方程组其他符号表示为

$$\omega = -\int_0^\eta \nabla \cdot (V dp) + V \cdot \nabla p,$$

$$\begin{aligned}
 C^2 &= \frac{R_d}{C_{pd}} \left(R_d \bar{T} - C_{pd} p \frac{\partial \bar{T}}{\partial p} \right), \\
 F_u &= (f + \xi) V - \left(\eta \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial U}{\partial p} - \frac{R_d T'_v}{a} \frac{\partial \ln p}{\partial \lambda}, \\
 F_v &= -(f + \xi) U - \left(\eta \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial V}{\partial p} - \frac{R_d T'_v}{a} \frac{\partial \ln p}{\partial \mu} (1 - \mu^2), \\
 G &= \Phi' + E, \\
 E &= \frac{1}{2(1 - \mu^2)} (U^2 + V^2), \\
 T'_v &= T_v - \bar{T}, \\
 T_q &= q T \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) - (\delta - 1)}{1 + (\delta - 1)q},
 \end{aligned}$$

P_u 、 P_v 、 P_l 和 P_q 是扩散项, $\varepsilon = R_d / R_v$ 和 $\delta = C_{pv} / C_{pd}$ 。另一些符号是气象中常用符号, 方程组 (4) — (10) 采用有限差分和谐方法分别进行垂直和水平离散化, 有兴趣的读者可参阅文献[8]。

在以下的计算结果中, 我们称上面提出的方案为参考大气谱模式计算方案, 称一般谱模式方案为控制方案。

四、理想试验

1. 模式地形的比较

在文献[8]中比较了参考大气谱方案 RPL 和控制方案 EE 的模式地形。地形高度, 按 (3) 式, 可写为

$$\Phi_s = \bar{\Phi}_s + \Phi'_s, \quad (11)$$

在控制方案 EE 中, 是对 Φ_s 进行截谱, 在 RPL 方案中, 仅对 (11) 式右端的 Φ'_s

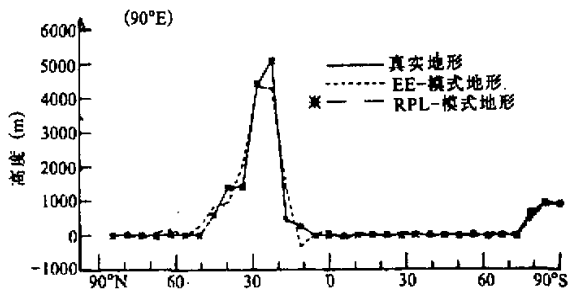


图 1 模式地形比较
(取自于文献[13])

截谱。相对于 $\bar{\Phi}_s$ 来说, Φ'_s 是一个较小量且光滑, 截谱误差显然比 $\bar{\Phi}_s$ 的小。图 1 是沿 90°E 的实际地形和模式地形的剖面。可看到在 EE 模式地形中, Gibbs 波明显出现在喜马拉雅山的南坡, 海上负地形高度 (未给出图) 可达-340m, 并且模式地形最大高度与实际地形的最大高度不相重合。在

RPL 模式地形中 Gibbs 波基本上得到消除，负地形仅为-69 m，模式地形最大高度和实际的最大高度是重合的。

2. Rossby-Haurwitz (R-H) 波的数值积分

在深水、弱不可压和弱垂直可变条件下，文献[8]分别用方案 RPL 和控制方案 EE 计算了弱斜压 R-H 波^[22]。图 2 是积分到 0 天，360 天和 510 天的 R-H 波的流函数分布图。这两种计算方案中的 R-H 波在长期数值积分中发展是十分明显的。在控制方案中波形发生变化首先出现在极地，然后向赤道地区扩展。积分到 510 天时，整个波形都发生了巨大的变化。对比之下，RPL 方案的波形变化很小。因此，RPL 方案能较好的描写 R-H 波的发展。

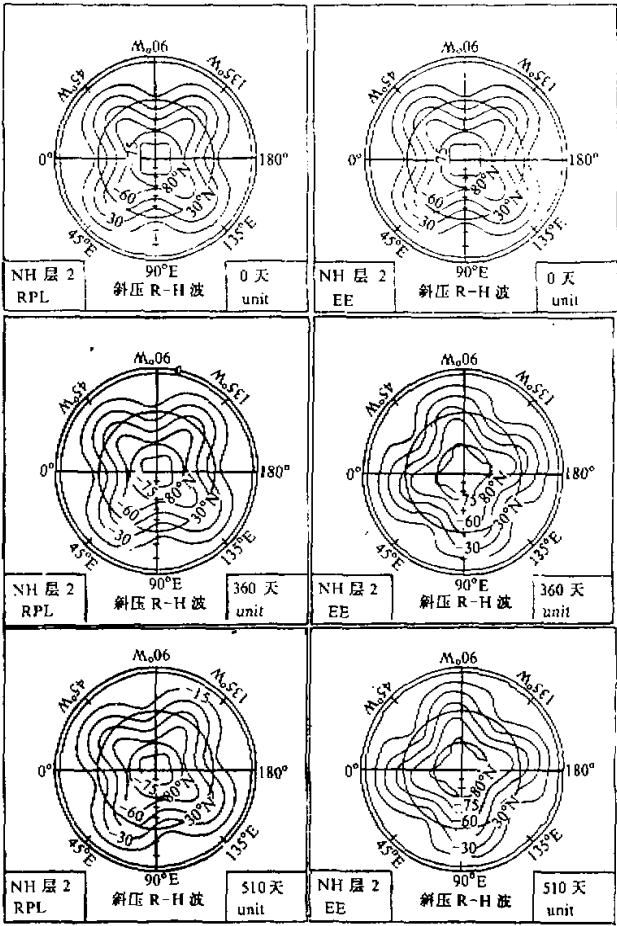


图2 RPL 和控制方案EE 的 R-H 波流函数数值积分结果
(取自文献[8]图 3 的一部分)

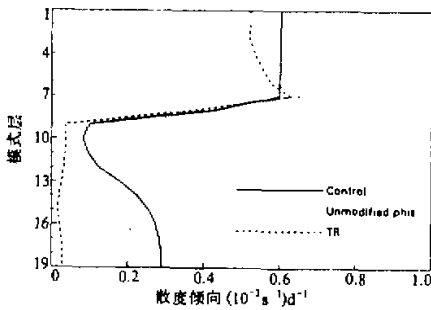


图3 各模式层最大的虚假散度倾向
(取自文献[11]的图1)

3. 气压梯度项之间的相消

在文献[16]中分别用参考大气谱模式方案 TR 和控制方案 Control 来检验气压梯度项的误差。为此, 首先定义一种处于静止的干大气, 其温度分布仅是气压函数的分析表达式。对这种大气, 初始散度倾向的大小是气压梯度项计算误差的标志。显然, 在绝对精确情况下, 这种倾向应为零。图3给出模式各层最大散度倾向误差, 由图可见, TR 方案对气压梯度项计算最精确。

五、在中期预报试验中的应用

参考大气谱模式方案, 先后在欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) [14-16]、澳大利

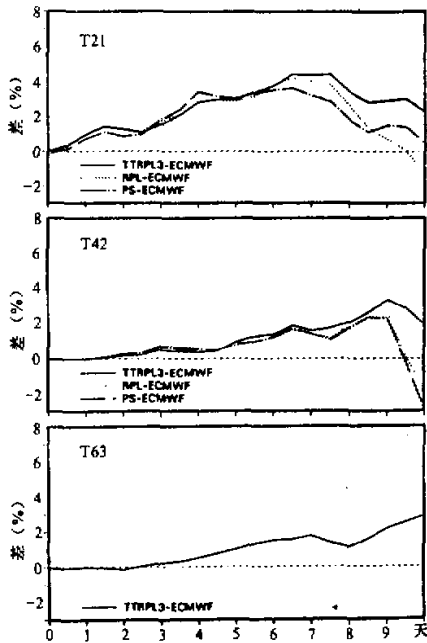


图4 在全球范围内, 参考大气方案(TTRPL3, RPL 和 PS)的10天预报1000—200 hPa 高度场12个例子平均偏差相关与控制方案的相关之差时间演变
(取自文献[14])

亚气象局研究中心 (BMRC) [20] 和中国科学院大气物理研究所(IAP) [13,9,10] 的中期预报试验中应用。在 ECMWF 的试验中, 使用了两种方案, 一种是 TR 方案, 与前面提到的 ECMWF 的试验相类似, 只是半隐式时间格式采用修改的 ECMWF 业务模式半隐式方案; 第2种是 PG 方案, 其参考大气仅应用到气压梯度项的计算中。用这两种方案分别以 T21、T42、T63 和 T106 水平分解和 19 层垂直分解计算了 12 个例子 10 天的预报。在 BMRC 试验中, 分别用平行四边形截断 R21L9 和 R31L9 的绝热方案计算了 4 个例子。在大气物理所, 以 T21 和 T42 分解分别用绝热和非绝热方案计算过多个例子, 并在 1992 年夏季作了实时预报试验 [11]。

1. ECMWF 中期预报试验

图4分别给出分解为 T21、T42 和 T63 的参考大气谱方案 TTRPL3、RPL 和 PS 与控制方案 ECMWF 的 12 个例子

10 天预报全球 1000—200 hPa 高度场平均距平相关之差时间演变图^[14]。方案 TTRPL3 和 RPL 不同在于半隐式时间光滑系数取值不同, 方案 PS 是以 p_s 作为展谱变量。由图 4 可十分清楚看出, 除去方案 RPL 的 T21 和 T42 第 10 天预报, 方案 PS 的 T42 第 10 天的预报及方案 TTRPL3 的 T63 第 2 天预报外, 参考大气谱方案的相关系数都大于控制方案的相关, 并且随着预报时间延长, 一般来讲这种差别就越大。另外由图可见, 虽然随着分解的增加, 参考大气谱方案与控制方案相关之差逐渐变小, 对分解 T63 第 10 天预报偏差相关系数仍提高 0.025 左右。

比较南半球和北半球的预报距平相关系数 (未给出图), 参考大气的引入对南半球预报的改进比北半球更大一些。

图 5 给出 ECMWF T106 和 T42 500 hPa 高度场的 12 个例子平均偏差相关^[16]。T42 500 hPa 高度距平相关给出在此图上部分, 其中北半球的在左边, 南半球在右边。对于北半球参考大气谱方案 (TR) 在 1—3 天内几乎看不出多少改进, 而更明显的改进出现在 5 天以后。相反, 在南半球 TR 格式比控制方案给出较大改进, 并且出现在整个 10 天的预报时期内。图 5 的中间部分表示北极地区 (60°N 以北) (左边) 和南极地区 (60°S 以南) (右边) T42 的 500 hPa 高度相关。可以看到在 10 天的预报时段内小的改进出现在北极地区, 而在南极地区无论是短期和中期都出现较大的改进, 可预报性

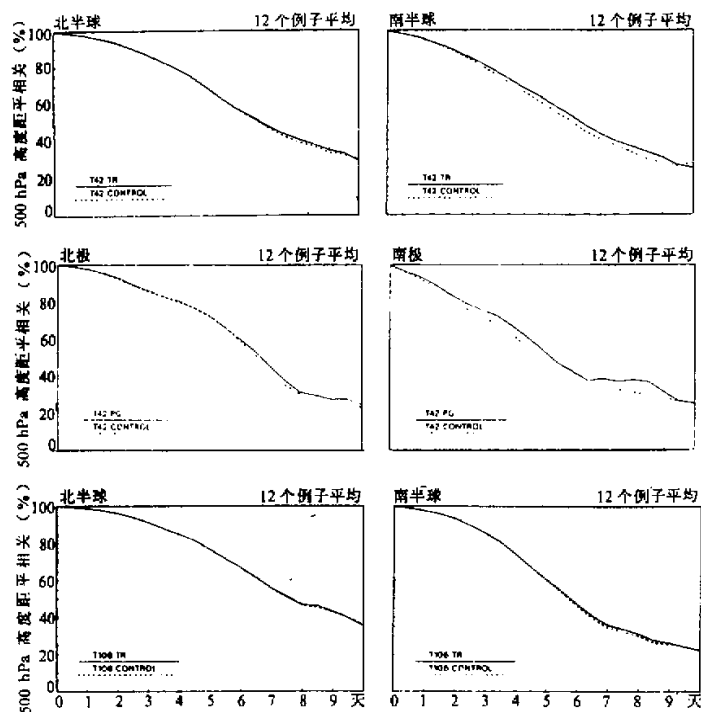


图 5 ECMWF 的 T106 和 T42 500 hPa 高度场 12 个例子平均距平相关系数
(取自文献[11]图 3 和图 4 中的一部分)

提高了约半天。T106 的结果表示在图 5 的下部分, 小的改进出现在南半球, 且在 5 天预报以后, 对于北半球, 参考大气谱方案 TR 同控制实验几乎无多大差别。

同样还检查了两个例子 T106 预报的第三天垂直速度分布图^[16] (图略), 发现在南美热带地区十分敏感。在此地区, 控制方案产生上升和下沉带状的计算误差; 而在 TR 方案预报的垂直速度图上, 不出现这类现象。

从上面 500 hPa 北半球和极地预报结果表明, 参考大气谱方案在 ECMWF 模式中, 对南半球最为敏感, 特别是对南极地区尤为突出。

2. BMRC 的预报试验

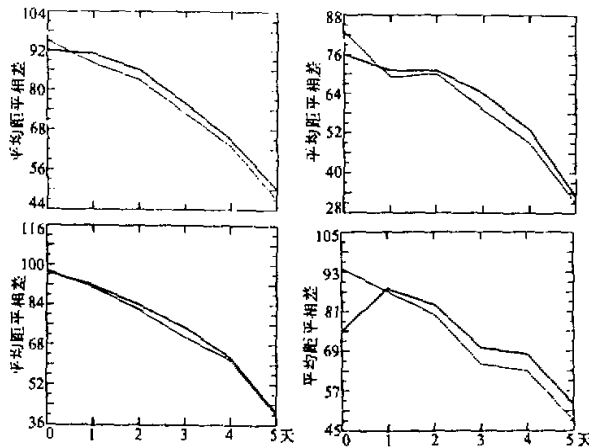


图 6 BMRC 的 R31L9 4 个例子 200 hPa 平均预报距平相关
(取自文献[16]图 2 的一部分)

图 6 给出了 BMRC 的 R31L9 4 个例子 200 hPa 平均预报偏差相关^[16]。这里参考大气如本文第二节描述的那样取为纬度的函数。图中参考大气谱方案标为 IAPB, 控制方案是 BMRC 的业务预报谱模式, 标为 BMRC。

由图 6 可看到, 在全球范围 (左上部分), IAPB 200 hPa 平均偏差相关在整个 5 天预报比控制方案要高出 0.03。改进最明显的出现在热带地区

(20°N–20°S) (右上部) 和南极地区 (60°S–90°S) (右下部), 平均高出 0.02–0.05 左右。另外, 从 200 hPa 预报距平相关分布图 (未给出图) 可看到, IAPB 方案明显地克服了控制方案在热带地区冷偏差及在南极地区暖偏差的固有缺陷, 提高了预报质量。

3. 中国科学院大气物理研究所中期数值天气预报试验

大气物理研究所首次在谱模式中引入参考大气概念, 并提出了参考大气谱模式计算方案^[8]。以后又进一步发展, 加入模式物理, 使参考大气谱模式更加完善^[19,11,26], 这里将几年来主要计算结果概述如下。表 1 给出干模式 T21L2 和 T42L9 的 4 例 5 天预报平均结果。由表看出, 对 T21L2 的绝对相关系数从第三天开始参考大气谱方案 (IAPGM) 就明显高于控制方案约 0.06; 而 T42L9 的倾向相关系数, 从第二天开始就高于控制方案约 0.02。

这个参考大气谱模式经过较为完善发展后^[25], 于 1992 年夏天作了 13 个实际例子的预报试验。其分解为 T42L9, 包括较为完善的物理参数化过程。这 13 个例子 500 hPa 平均距平相关系数列入表 2 中。

表 1 500 hPa 高度场 T21L2 绝对相关系数和 T42L9 倾向相关系数
(取自文献[8]的表 2 和文献[15]的表 1)

天		1	2	3	4	5
T21L2	IAPGM	0.96	0.92	0.89	0.86	
	EE	0.96	0.92	0.86	0.80	
T42L9	IAPGM	0.86	0.86	0.78	0.72	0.66
	EE	0.86	0.84	0.77	0.70	0.64

表 2 1992 年夏季 13 个例子 500 hPa 高度场预报平均距平相关系数
(取自于文献[25])

天	1	2	3	4	5
北半球	0.947	0.877	0.773	0.664	0.534
南半球	0.929	0.844	0.774	0.709	0.662

由表 2 可见，在北半球，如以距平相关为 0.6 以上为可用预报，则可预报性可达 4.5 天左右；而南半球超过 5 天。

六、在后处理和四维同化中应用

对模式预报变量进行后处理，产生在标准气压层上的输出场，以此作为资料同化的初值场和预报诊断场。在控制方案中，模式层上的高度场 Φ 是通过静力方程求得，即

$$\Phi_l = \Phi_{sl} + B \cdot T_l$$

其中 B 是常数矩阵， T_l 是各模式层上的温度变量组成的列向量， Φ_{sl} 是地形位势高度 Φ_s 与单位列向量相乘。标准气压层的位势高度是通过内插，由 Φ_l 插值求得的。

在参考大气谱方案中，假定

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi', \quad T = \bar{T} + T'$$

其中 Φ' 和 T' 是预报变量。需插值到标准等压面的仅是 Φ' 变量，参考大气高场度 $\bar{\Phi}$ 是分析表达式，不需插值，这就省去 $\bar{\Phi}$ 的插值误差。因此在后处理和四维同化中采用参考大气谱方案，可有效的减少计算误差，提高计算精度。

为检查后处理高度场的精确度，文献[16]使用了仅是气压函数的分析温度廓线（用 ICAO 廓线），假定大气是干的并处于静止状态，其标准层上的高度场可精确求出。利用这个分析温度廓线和模式地形，计算出模式格点上的场面气压和模式坐标面上的温度，然后对得到的场面气压和温度场进行谱截断（19 层 T106 分解）。接着进行后处理，将模式坐标面上的温度场通过静力关系转变为位势高度场，并插值到标准等压面上。把这样求到的标准面上位势高度同对应的分析计算高度场作一比较，就可发现后处理的精度。图 7 给出参考大气方案（PG）和控制方案后处理高度场在标准层上的全球平均误差。由图可见参考大气方案后处理误差比控制方案小得多。在无谱截断情况下，

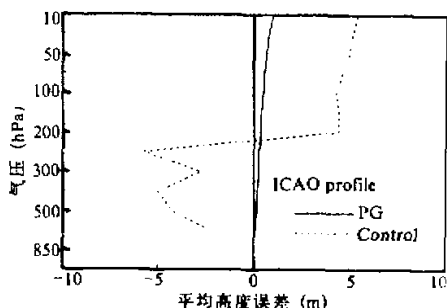


图 7 用参考大气方案 PG (实线) 和控制方案 Control (虚线) 进行的后处理得到的标准气压面上高度场全球平均误差 (取自文献[16]图 2 中的一部分)

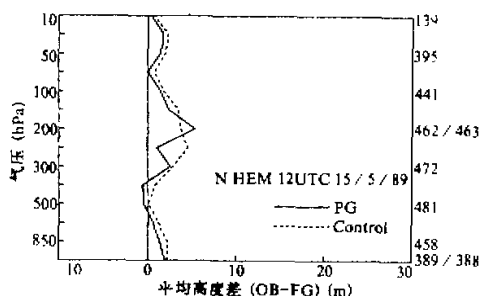


图 8 1989 年 5 月 15 日 12UTC 雷达探空高度观测和资料分析中使用的初始值高度场 (6 小时预报) 之间的平均差值 (取自文献[16]图 10 中的一部分)

这种误差应为零。

文献[16]同样给出了参考大气谱方案在四维同化中的试验。在这里给出的试验结果中, 预报模式和初估值后处理都使用了参考大气谱模式方案 PG。图 8 给出观测和分析中使用的 (6 小时预报) 初估值之间的平均差值, 可看到在同化中使用参考大气方案对观测资料的拟合有较大的作用, 即偏差减少, 分析质量提高。

七、气候模拟中试验

汉堡大学气象系过去几年是使用 ECMWF 的谱模式方案, 制作延伸气候模拟 (extended range climate Simulation) 和各种气候敏感性实验。这个模式虽然能够产生基本的气候特征, 但仍存在一些问题。例如, 低估了南半球大气环流等。为此提出了新的模式方案 ECHAM^[12] (等于 ECMWF 模式加上汉堡大学的物理) 它是根据 ECMWF 的第 31 方案得到的。此模式除了使用包络地形并包括重力波参数化和植物对蒸发传输的作用外, 还引用参考大气谱方案来计算气压梯度力项, 有效地减少地形陡峭地区的截谱误差。

该新模式 T21 使用气候海温和海冰资料, 积分了 20 个季节循环。同老模式相比, 新模式在风、温度和湿度分布上有明显的改进。从 1 月份纬向风剖面图 (未给出图) 和温度剖面图 (图 9) 可十分清楚看到, 南半球近地面西风带比原来的大两倍, 并且温度分布更近于观测。例如在赤道地区, 老方案模拟的温度偏低, 仅有 20°C; 而新方案与观测的相同, 达 25°C, 在两极上空温度分布有更大的改进, 老方案在南北两极地区模拟温度偏低, 而新方案模拟的温度增高, 近于实际观测。

应该指出, 由于引入由曾庆存等提出的参考大气的概念, 在我国的许多气候模拟中使用了曾庆存等设计的差分大气环流模式, 其结果十分清楚地表明引入参考大气扣除标准层结方法的优点。

八、结 语

中国科学院大气物理研究所首次在大气环流模式(格点模式和谱模式)中引入了参考大气,并提出参考大气谱模式计算方案,有效地减小了截谱误差。尤其是在谱模式中能有效地减少了 Gibbs 误差的影响和负地形高度,提高了预报准确率。

这种参考大气谱模式计算方案部分或全部,先后为欧洲中期天气预报中心、汉堡大学气象系、澳大利亚气象局研究中心和美国 NMC 采用在中期业务预报、气候模拟或实际例子的试验中,明显地改进了预报和气候模拟。

在文献[13]中对 ECMWF 谱模式中引入参考大气的结论是:“在 ECMWF 的业务预报模式中气压梯度力项的计算已进行了修改,它是根据使用与气压函数的参考大气温度之偏差作为预报变量,因此动量方程中 $\nabla \Phi$ 和 $RT \nabla \ln p_s$ 之间就有较多的相消。这就给低分解预报带来较大的改进,特别是在南极和北极地区。T42 模式在高纬地区的系统误差已减少,与 T63 和 T106 模拟更相近。对分解 T106 作用较小,但在南半球高纬地区稍有改进。另外对资料四维同化也进行了修改。现在的气压层位势高度初始值的计算是对与参考大气温度的偏差作后处理,然后将其结果加到相应的参考位势高度上去。对 T106 而言,这就产生比模式本身引入参考大气的改进要大得多,得到的高度分析与雷达探测量有较好的一致,并且使初始化引起的与观测资料的偏差减小。在对流层高层温度系统的变暖(在 200 hPa 约 0.5 K;在对流层低层变冷,且温度更接近于观测值。经过一天和两天同化后制作的预报,在短期和中期方面给出小的改进,更长时间的预报尚未给出明确的结论。这些预报产生了较好的初始化水汽和较小的对流降水,并减少了水份循环中的不平衡约 10%到 15%”。

在汉堡大学气象系的 ECHAM 模式中,引入了参考大气谱模式方案后,新的方案明显地改进了气候模拟温度分布,使之更接近观测。

澳大利亚气象局研究中心(BMRC)在其业务预报模式中试验了参考大气谱方案,并以 R21L9 和

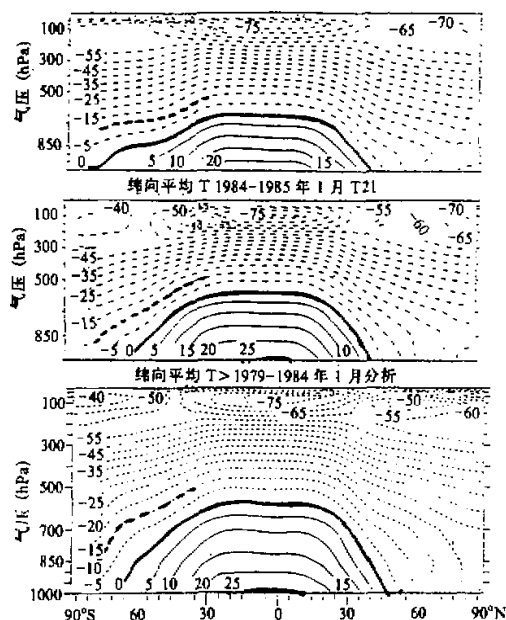


图 9 1 月份纬向平均温度

(单位 $^{\circ}\text{C}$) 上图是 ECMWF T21 (方案 17) 10 年平均;
中图是 1979—1984 ECMWF 分析; 下图是 ECHAM T21
(新物理) 5 年平均
(取自文献[12]图 2)

R31L9 分解进行了四个例子的试验。结果表明,参考大气谱方案对 BMRC 模式的作用是明显的,特别是对南半球。最大的改进出现在 200 hPa 和 100 hPa 高层,热带和南极地区,并在一定程度上克服了在热带地区上空的系统性的过多的冷偏差和南极上空过多的暖偏差。

致 谢: 本文是在曾庆存院士的建议和鼓励下完成的,成文后又经过他的修改,谨此表示衷心的感谢。另外,也要感谢王婉文女士和贺联小姐,是她们用电脑打字本文手稿。

参 考 文 献

- [1] 曾庆存, 1963, 初始方程有限差分格式的设计, 地球物理所技术报告。
- [2] 曾庆存, 1963, 大气运动的特征参数和动力学方程组, 气象学报, 33, No.4, 472—483。
- [3] 曾庆存, 1979, 数值天气预报的数学物理基础, 第一卷, 科学出版社, 1—543。
- [4] 曾庆存, 季仲贞, 袁重光, 1980, 原始方程差分格式的设计, 全国第二次数值天气预报论文集, 300—313。
- [5] 曾庆存, 袁重光, 张学洪, 包 宁, 1985, 一个大气环模式流差分格式的检验, 气象学报, 43, No.4, 441—449。
- [6] Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Zhang Xuehong, Liang Xinzong and Bao Ning, 1986, A global gridpoint general circulation model, Short and Medium Range NWP, Collection of Papers Presented at the WMO / IUGG NWP Symposium, Tokyo, 4—8 August 1986, *J. Meteor. Soc. of Japan*, Special Volume, 421—430。
- [7] Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Yuan Chongguang, Liang Xinzong, 1987, A design and test of a numerical coupled land-atmosphere-ocean model, Tenth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, *Lecture Notes in Physics*, 264, 684—688。
- [8] Zhang et al., 1985, *Approximate solution for baroclinic primitive equation on sphere*, Hydrodynamic Conference in Zhoushan Islands, China。
- [9] 陈嘉滨, 张道民, 纪立人, 吴万里, 盛 华, 1990 提高截谱精度的中期天气预报谱模式动力学框架设计和试验, “七·五”国家科技攻关课题“中期数值天气预报研究”成果汇编<二>, 气象出版社, 41—64。
- [10] 纪立人, 陈嘉滨, 张道民, 吴万里, 沈如金, 盛 华, 黄伯银, 赵高祥, 1990, 一个包含非绝热物理过程的全球谱模式及时初步试验结果, “七·五”国家科技攻关课题“中期数值天气预报研究”成果汇编<二>, 气象出版社, 27—40。
- [11] 纪立人, 张道民, 黄伯银, 李金龙, 陈嘉滨, 宋正山, 骆美霞, 1992, T42L9 谱模式的预报试验, “灾害性气候的预测其对农业年景和水资源调配的影响”预报研究论文摘要汇编。
- [12] E. Roeckner et al., 1989, The Hamburg Version of the ECMWF model (ECHAM), *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 13, 7.1—7.4, WMO, Geneva。
- [13] Chen Jiabin, Ji Liren and Wu Wanli, 1986, Design and test of an improved scheme for global spectral model with reduced truncation error, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction Collection, WMO / IUGG NWP, Symposium, Tokyo, 4—8 August, 431—440。
- [14] Chen Jiabin and A.J. Simmons, 1989, Sensitivity of medium-range weather forecasts to the use of reference atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 7, No.3, 275—293。
- [15] Chen Jiabin and A.J. Simmons, 1989, Use of a reference atmosphere in the calculation of pressure-gradient terms, Cas / JSC Working Group on Numerical Experimentation, Report No.13, WMO / TD, No.332。
- [16] A.J. Simmons and Chen Jiabin, 1991, The calculation of geopotential and the pressure gradient in the ECMWF atmospheric model: Influence on the simulation of the polar atmosphere and on temperature analyses, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 117, 29—58。
- [17] A.J. Simmons and Chen Jiabin, 1990, The calculation of geopotential and the pressure gradient in the ECMWF atmospheric model, Cas / Jsc Working Group on Numerical Experimentation, Report No.14, WMO / TD, No.396。
- [18] ECMWF, 1991, NWP progress Report 1990, Numerical weather prediction progress report for 1990, NWPP

- Report Series No.17, WMO / TD No.403,69—96.
- [19] Zhang Daoming, Sheng Hua and Ji Liren, 1990. Development and test of hydrostatic extraction scheme in spectral, *Adv. Atmos. Sci.*, 7, 142—153.
- [20] Sheng Hua, W. Bourke and T.Hart, 1992. An impact of hydrostatic extraction scheme on BMRC's global spectral model, *Adv. Atmos. Sci.*, 9, No.3, 269—278.
- [21] Sheng Hua, 1991. Improved hydrostatic extraction scheme, Ninth Conference on Numerical Weather Prediction, Denver, Colorado, Oct. 14—18, 1991.
- [22] N.A. Phillips, 1973, Principles of large scale numerical weather prediction. *Dynamic Meteorology*, P. Morel (Ed.) D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1—96.
- [23] Zhang Xuehong, 1990. Dynamical framework of IAP Nine-level atmospheric general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 7, No.1, 67—77.
- [24] 陈嘉滨、江 野, 1993. 谱模式中半隐式时间积分格式稳定性的试验和分析, 大气科学, 17, No.3.
- [25] A. J. Simmons and D. M. Burridge, 1981, An energy and angular-momentum conserving vertical finite difference scheme, and hybrid vertical coordinates, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 758—766.
- [26] Liren Ji, Jiabin Chen, Daomin Zhang, Wanli Wu, et al., 1989. A spectral model for medium-range Weather forecasts and its performance, East Asia and western Pacific Meteorology and climate, Hong Kong 6—8 July, World Scientific, 474—483.

Application of Reference Atmosphere to Numerical Weather Prediction of Medium-Range and Climate Simulation

Chen Jiabin and Shu Jinjun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, what is generalized is the use of reference atmosphere spectral model computational scheme (or hydrostatic extraction scheme) in medium-range numerical weather prediction, post-processing and data-assimilation, and long-range climate simulation in some meteorological organism at home and abroad. All the computational results indicate that this scheme can reduce truncation errors effectively and improve the medium-range numerical weather prediction and long-range climate simulation significantly.

Key words: reference atmosphere; spectral model computational scheme; medium-range numerical weather prediction; climate simulation.