

质量守恒律在国家气候中心 气候谱模式中的应用*

陈嘉滨

高学杰

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

(中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘 要 概述了在国家气候中心气候谱模式中, 引入参考大气和大气质量守恒律, 消除了原模式由于模式大气质量不守恒引起的气候漂移计算误差, 改进了气候模拟, 提高了预报精度。

关键词: 谱模式; 参考大气; 质量守恒

1 引言

当今世界各国使用的大气谱模式存在一个共同的问题, 即模式大气总质量不守恒。这对于中短期数值天气预报来说, 可能不是一个问题, 但是对于气候应用的长期数值模拟, 可能会引起严重问题。Machenhauer^[1]报告说, 大气模式质量不守恒引起严重的气候漂移。在 17 个模式月的数值积分中, 全球平均地面气压单调地增加约 34 hPa。用 ECMWF 的半隐式半拉格朗日业务谱模式数值积分 3 个模式月, 造成大气质量的系统误差约 4.5 hPa。这种误差仅是对全球平均地面气压而言, 它的三维结构、地域特征和对其他场, 如温度场和高度场的影响都不清楚。

造成谱模式大气质量不守恒的原因是, 使用了地面气压的对数 $\ln p_s$ 作为预报变量, 地面气压倾向方程变为

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = - \int_0^1 (\mathbf{V} \cdot \nabla \ln p_s + \nabla \cdot \mathbf{V}) d\sigma,$$

这方程在全球上积分不为零, 这就导致大气总质量不守恒。

如果将地面气压 p_s 本身作为一个预报变量, 地面气压倾向方程在全球上积分为零, 保持大气总质量守恒。但是, 气压梯度项的第二项变为三阶变量, 即 $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{RT}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial x} \right)$, 这将引起气压梯度项计算的混淆混误差 (aliasing)。

本文是将文献[2,3]的研究结果应用到国家气候中心的业务气候谱模式, 将 $\ln p_s$ 改变为 p_s 作预报变量, 保持大气总质量守恒。同时, 为克服由此引起的气压梯度力计算的

1999-08-10 收到, 1999-10-12 收到再改稿

* 国家“九五”重中之重项目“我国短期气候预测系统的研究”(96-908-02-02-01) 和国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”(G1998040900) 的研究”共同资助

混淆误差, 引进参考大气谱模式计算格式^[4]。在第 2 节中, 给出参考大气的定义; 在第 3 节中给出控制方程; 计算结果在第 4 节; 第 5 节给出结语。

2 参考大气的定义

按照文献[4]使用的参考大气^[5], 定义如下: 参考大气温度 $\bar{T}$ 和位势高度 $\bar{\varphi}$ 满足

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \ln p} = -R_d \bar{T}, \\ \left(\frac{g}{c_{p,d}} + \frac{d\bar{T}}{dz} \right) \frac{R_d \bar{T}}{g} = C_0^2 \equiv \text{常数}, \end{cases} \tag{1}$$

其中, R_d 为干空气气体常数; $c_{p,d}$ 为干空气定压比热; g 为重力加速度; $\ln p$ 是气压的对数; 而 C_0^2 是常定的大气层结参数。由 (1) 式, 可得到参考大气温度 $\bar{T}$ 和地面气压的对数 $\ln p_s$ 的分布为

$$\begin{cases} \ln p_s = \ln p_0 + \ln \left[1 - \left(\varphi_s - Y \ln p_0 + Y \frac{\ln p}{X} \right) \right] \frac{c_{p,d}}{R_d}, \\ \bar{T} = X_0 + Y_0 \exp \left(\frac{R_d}{c_{p,d} \ln p} \right), \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} X_0 = \frac{c_{p,d} C_0^2}{R_d^2}, & Y_0 = (\bar{T}_0 - X_0) / \exp \left(\frac{R_d}{c_{p,d} \ln p_0} \right), \\ X = (\bar{T}_0 R_d - Y) \frac{c_{p,d}}{R_d}, & Y = \frac{c_{p,d}}{R_d} C_0^2, \end{cases} \tag{3}$$

T_0 和 P_0 分别为海平面气温和气压, 它们均为常数。

实际的大气温度 T 和位势高度 Φ 分裂为参考大气部分和其偏差部分, 即

$$\begin{cases} T = \bar{T}(p) + T', \\ \varphi = \bar{\varphi}(p) + \varphi'. \end{cases} \tag{4}$$

很容易证明, 对参考大气有如下等式成立,

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x(y)} + R_d \bar{T} \frac{\partial \ln p_s}{\partial x(y)} = 0. \tag{5}$$

3 控制方程

使用地形垂直坐标 η ,

$$\eta = \eta(p_1, p_s), \tag{6}$$

这里 $\eta(0, p_s) = 0$ 和 $\eta(p_s, p_s) = 1$ 。

引入参考大气、且满足大气质量守恒的控制方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial \lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial \mu} + K_\xi, \quad (7)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial \mu} + \nabla^2 G + K_D, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & -\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial T'}{\partial \lambda} - \frac{V}{a} \frac{\partial T'}{\partial \mu} - \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial T'}{\partial p} \\ & + \left(\frac{R_d}{c_{p,d}} T' + \frac{R_d}{c_{p,d}} T_q + \frac{C^2}{R_d} \right) \frac{\omega}{p} + P_T + K_T, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{U}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{V}{a} \frac{\partial q}{\partial \mu} - \left(\dot{\eta} \frac{\partial q}{\partial \eta} \right) \frac{\partial q}{\partial p} + P_q + K_q, \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\int_0^1 \nabla \cdot \left(V \frac{\partial p_s}{\partial \eta} \right) d\eta, \quad (11)$$

$$d\varphi' = -R_d T'_v d\ln p, \quad (12)$$

其中 η 面的垂直速度为

$$\left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = -\frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^\eta \nabla \cdot \left(V \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta,$$

等压面的垂直速度为

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

其他符号为

$$F_u = (f + \zeta)V - \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial U}{\partial p} - \frac{R_d T'_v}{a} \frac{\partial \ln p}{\partial \lambda},$$

$$F_v = -(f + \zeta)U - \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \frac{\partial V}{\partial p} - \frac{R_d T'_v}{a} \frac{\partial \ln p}{\partial \mu} (1 - \mu^2),$$

$$G = \varphi' + E,$$

$$E = \frac{1}{2(1-\mu^2)} (U^2 + V^2),$$

$$T'_v = T_v - \bar{T},$$

$$T_q = qT \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) - (\delta - 1)}{1 + (\delta - 1)q},$$

$$\mu = \sin \varphi,$$

$$(U, V) = (u, v) \sin \varphi.$$

在 (9) 式中的 C^2 是依赖于参考大气温度的垂直分布, 一般讲它是气压的函数。 P_v 、 P_T 、 P_u 和 P_q 是参数化倾向, 而 K_ξ 、 K_T 、 K_D 、 K_q 是扩散项。 T_v 是虚温, $\varepsilon = R_d / R_v$, $\delta = c_{p,v} / c_{p,d}$, 其他符号是气象中常用符号。

这套方程组和原气候中心气候模式方程组的区别在于, 前者引入了参考大气, 且以

地面气压 p_s （而不是其对数 $\ln p_s$ ）作为预报变量，保持了大气总质量守恒。垂直差分和水平谱展开，与气候中心的谱模式完全一样。这里就不重复。

4 主要计算结果

4.1 个例中期数值预报

上节提到的参考大气和大气质量守恒方案，引进了气候中心谱模式，对原计算程序进行了很多的修改。为保证程序修改的正确性，我们首先在微机上用 T21 分解作了个例的中期预报。个例的时间是 1979 年 1 月 22 日 12 时，制作了 5 天的预报。将预报结果同实际观测作比较，计算出统计平分。图 1 给出北半球和南半球 T21 500 hPa 高度预报场方根误差（RMS）。图中 CONTROL 表示气候中心模式的预报；RPL 表示引入了参考大气的预报；MASS 表示引入了参考大气和质量守恒的预报。由图可以看到 RPL 和 MASS 方案的预报都较 CONTROL 的预报有明显的改进，特别是南半球预报尤为突出。MASS 和 RPL 方案相比，在北半球，MASS 方案的预报略好一些。

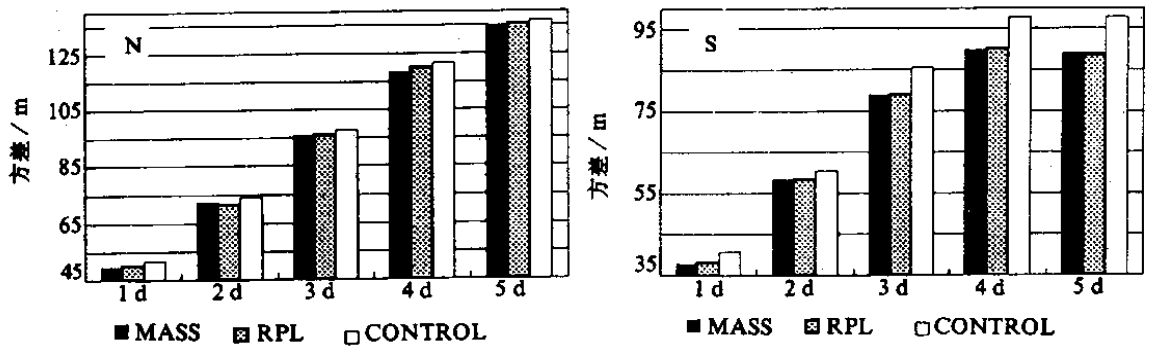


图 1 北半球 (N) 和南半球 (S) 预报的 T21 500 hPa 高度场均方根误差

4.2 30 天预报的平均

我们在高速并行计算机 SP2 上对个例（1996 年 6 月 9 日 12 时）作了 30 天预报，并制作了 30 天平均 500 hPa 预报图。图 2 是 CONTROL、RPL 和 MASS 的 T63 分解 30 天平均 500 hPa 预报图。这里，没有给出 30 天平均的实况图，我们发现对于 CONTROL 方案在青藏高原和南美的安第斯山附近，出现一些计算噪音，而 RPL 和 MASS 方案却消去了这些计算噪音。这可能是 CONTROL 方案在地形处理上仍存在一些有待改进之处。

4.3 10 年超长期的数值积分

分别用水平分解 T63 质量守恒 MASS 方案制作了 10 年的超长期的数值积分，并分析了它们的 500 hPa 高度场平均的时间演变图。为了比较，我们给出 CONTROL 方案的结果，即图 3。由图可发现预报的 500 hPa 平均高度随时间呈单调季节振动上升，这表明原国家气候中心气候模式存在气候漂移的误差。图 4 是质量守恒 MASS 方案 10 年积分的结果，这是预报的 500 hPa 高度场平均随时间演变图。可以发现，这里仅有季

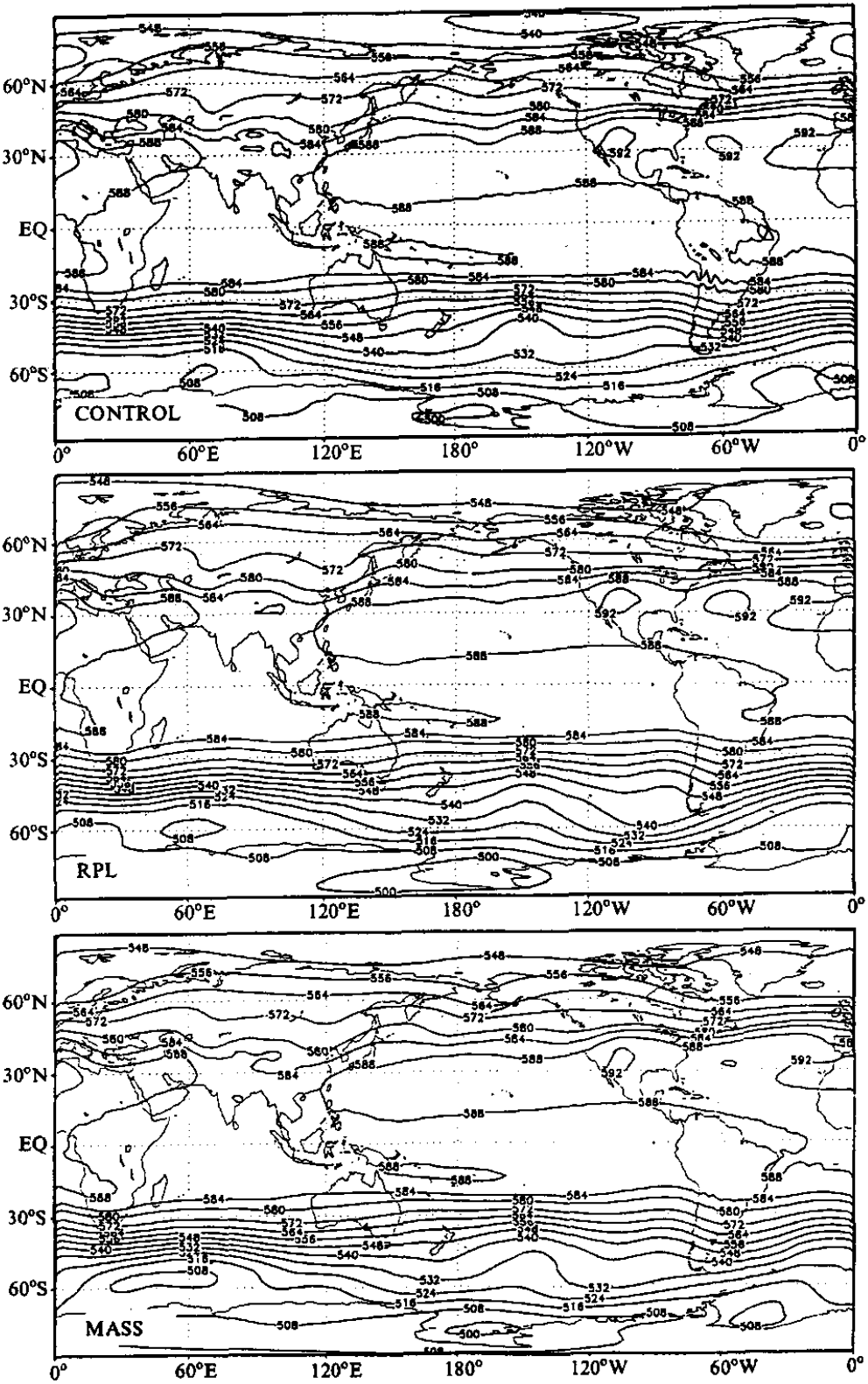


图2 分别用方案 CONTROL, RPL 和 MASS 制作的 T63 500 hPa 月平均预报图
初始场是 1996 年 6 月 9 日 12 时资料

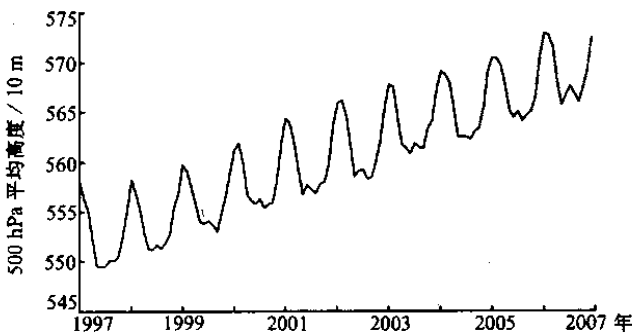


图3 用方案 CONTROL 预报的 500 hPa 高度场平均随时间变化

是在计算机 SP2 上计算结果。可以看到, 对于 CONTROL 方案, 30 天积分平均地面气压变化了约 0.92 hPa, RPL 变化了 0.1 hPa, 而 MASS 仅在小数点后第 3 位出现偏差, 这可能是微机的计算精度问题。对方案 T63MASS, 这是在计算机 SP2 上制作的, 30 天的数值积分直到小数点后第 4 位仍保持相同数值。因此, 质量守恒律在方案 MASS 的计算格式中得到很好的保持。

节变化, CONTROL 方案的那种单调上升的气候漂移误差得到明显的克服。对比这两种方案, 可以认为原气候中心的气候模式出现的气候漂移误差, 是由于该模式计算格式破坏了大气质量守恒律造成。

4.4 质量守恒的比较

表 1 分别给出方案 CONTROL、RPL 和 MASS 的全球平均地面气压在 0 天和 30 天预报的数值。表中的前三项是在微机上计算结果, 而 T63MASS

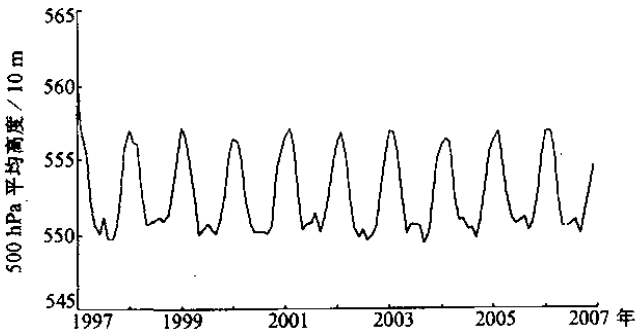


图4 用方案 MASS 预报的 500 hPa 高度场平均随时间变化

表 1 各种方案制作的初始场和预报的第 30 天全球平均地面气压

方案	初始场 (hPa)	第 30 天 (hPa)	备注
CONTROL	985.0460	985.9681	
RPL	985.0460	985.1441	以 T21 分解在微机上制作
MASS	985.0460	985.0532	
T63MASS	979.1757	979.1757	分解 T63 的方案 MASS 在 SP2 巨型机上制作

5 结语

在国家气候中心的气候谱模式中引入了大气质量守恒计算格式, 保证了模式大气的质量守恒。为了消除由于引入质量守恒带来气压梯度项计算的混淆误差, 参考大气计算格式同时也引进了该中心的模式中。我们分别制作了中期、月和 10 年的数值积分。计算结果表明, 在气候中心的谱模式中引入参考大气和质量守恒计算格式, 有效地消除了原谱模式存在的气候漂移误差, 改进了预报精度, 同时, 长期积分计算是稳定的。

致谢: 感谢叶正青先生提供了图 3。

参 考 文 献

- 1 Beunert Machenhauer, The implementation of the semi-implicit scheme in cell-integrated semi-Lagrangian models, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 156, 1995.
- 2 陈嘉滨、舒静君, 大气谱模式中质量守恒格式的研究, 大气科学, 1996, **20**, 169~179.
- 3 Simmons, A. J. and Chen Jabin, 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.*, 1991, **117**, 29~58.
- 4 Chen Jiabin, Ji Liren and Wu Wanli, Design and test of an improved scheme for global spectral model with reduced truncation error, *Adv. Atmos. Sci.*, 1987, **4**, 156~168.
- 5 曾庆存, 大气运动的特征参数和动力学方程, 气象学报, 1963, **33**, 472~483.

An Application of the Mass Conservation Law to the Spectral Climate Model of National Climate Center

Chen Jiabin

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Gao Xuejie

(National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract It is discussed in this paper that if the reference atmosphere and the law of atmospheric mass conservation are introduced in the spectral model of National Climate Center, the climate drift errors existing in the Center's model can be eliminated, and climate simulation and the forecast quality improved.

Key words: spectral model; reference atmosphere; mass conservation