

通量和平流形式预报方程的数值预报试验 *

钱永甫

(南京大学大气科学系)

提 要

本文利用1982年5月8日和1979年6月28日两个实例,进行了四种方案的48小时数值预报试验,比较了它们的预报质量及彼此间的差异。四种方案是:经典通量、通量修正、经典平流和平流修正。试验表明,在有地形的数值预报模式中,采用平流形式的预报方程组比采用通量形式的为好,既可具有较高的计算精度,又可节省计算时间。

关键词: 数值天气预报; 数值预报模式。

一、引 言

在数值模式中加入地形时,一般在垂直方向采用地形坐标系。在大尺度天气现象中,静力平衡关系足以表达温压场之间的制约,因而地形坐标系可采用气压的函数式。例如地形坐标系 η 可表示为 $\eta=f(p, p_s)$,其中 p 和 p_s 分别为气压和地形面上的气压, p_s 作为参数出现。通常取 $f(p, p_s)=P/P_s$,即为 σ 坐标系,或在上部大气中取 $\eta=p$,而在下部大气中,取 $\eta=(p-p_c)/(p_s-p_c)=\sigma$,此即为 $p-\sigma$ 混合坐标系,其中 p_c 为上下部大气的分界面上的气压,取为常数^[1]。

在将大气动力学方程组从水平或准水平的 z 坐标系或 p 坐标系变换到地形坐标系中时,可有两种变换方法,一种为微分变换(或称经典变换)方法,另一种称为差分变换(我们称之为DDD变换)方法^[2]。这两种变换方法所得到的地形坐标系里的大气动力学方程组,只有一个差别,即在差分变换法所得到的方程组中,多了一项修正项。正是这修正项,在差分计算时增加了方程组的计算精度,改善了预报质量^[3,4]。

我们知道,在数值预报模式中,大气动力学方程组可以有两种形式,一种称之为“通量形式”,另一种则称之为“平流形式”。用经典变换方法得到的大气动力学方程组的这两种形式,在一定的差分格式约束下,是等效的。在用差分变换方法得到的方程组中,这两种形式具有不同的修正项表达式。我们已经在理论上探讨过不同形式修正项的量值差异,证明平流形式方程组中的修正项一般比通量形式方程组中的要小。因而,略去平流形式方程组中的修正项,也即完全采用经典变换方法得出的平流形式预报方程组,在有地形的情况下,也不致引进太大误差。但若略去通量形式预报方程组中的修正项,也

1989年9月5日收到,1990年2月12日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

即完全采用经典变换方法得出的通量形式预报方程组,在有地形的情况下,可能会引入一定的误差^[2]。

本文通过 1982 年 5 月 8 日和 1979 年 6 月 28 日两个实例数值预报试验,进一步讨论了通量形式和平流形式预报方程组中修正项的作用,比较了两种形式方程组的预报图差异,从而证明理论讨论的结论基本上是正确的。

二、模式与试验方案

1. 模式简介

本文所用模式的细节可参阅文献[5]。模式在垂直方向采用 $p-\sigma$ 混合坐标系,即模式中在 400hPa 以上采用 p 坐标系,划分为二层,400hPa 至 p_s-50 hPa 之间用 σ 坐标系,定义 $\sigma=(p-400)/(p_s-450)$,其中 p_s 为地面气压, σ 坐标系中也划分为二层,从 p_s-50 hPa 至 p_s ,模式也采用 σ 坐标系,以代表大气边界层,用 σ_B 表示之,定义 $\sigma_B=(p-p_s+50)/50$,不再划分层次。因此,模式大气共分为 5 层,且 σ 和 σ_B 均从 0 变到 1。为了较好地反映地气相互作用过程,模式在地面或水面以下还加了一层,用来预报地表或水表温度以及土温或水温,但在水中不考虑水流的动力作用,即假设水是静止不动的,这在海洋中显然是一种近似。

模式中包含了青藏高原大地形的影响,最大地形高度为 5000 m。模式中还包含了各种非绝热物理过程,如长短波辐射、干对流调整和积云对流参数化等,太阳辐射还具有日变化,模式的积分区域为 $0-80^\circ\text{N}$ 和 $0-180^\circ\text{E}$,水平方向采用格距为 $5^\circ\times 5^\circ$ 的经纬度网格系统,时间步长为 10 min,采用 1 小时欧拉后差、5 小时中央差交替进行的时间积分方法。

在 σ 坐标系中,用 DDD 变换方法得出的通量形式的方程组可表示为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\mathcal{L}(u) + fv + PGF_x + F_u + R_u(u), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\mathcal{L}(v) + PGF_y - fu + F_v + R_v(v), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathcal{L}(T) + \frac{RwT}{c_p p} + \frac{\varepsilon}{c_p \rho} + F_T + R_o(T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathcal{L}(q) - C + E + F_q + R_o(q), \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_s^*}{\partial t} = -\nabla \cdot p_s^* \mathbf{V}_s - 2(50\nabla \cdot \mathbf{V}_s - p_s^* \sigma \frac{\partial}{\partial \sigma}) + R_o(p_{s0}^*), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -p_s^* RT / (\sigma p_s^* + 400), \quad (6)$$

式中 $\nabla(A) = \left(\nabla \cdot p_s^* A \mathbb{W} + \frac{\partial p_s^* A \sigma}{\partial \sigma} + A \frac{\partial p_s^*}{\partial t} \right) / p_s^*$, 是非线性项微分算子, $p_s^* = p_s - 450$, 是 σ 坐标系的气压厚度, PGF 是气压梯度力矢量, 其计算方法见文献 [5], C 和 E 分别表示凝结和蒸发引起的混合比 q 的变化率, F 为湍流扩散项, 包括水平和垂直扩散, ϵ 为单位体积的非绝热能通量, 下标 4, 5 和 $1/2$ 分别表示模式第 4, 5 层及 $\sigma=1/2$ 面上的量, $R_o(A)$ 为差分变换法得出的修正项, 其表达式为

$$R_o(A) = - \frac{\partial}{\partial \sigma} \nabla_o \cdot [(\phi - \phi_0)(\rho A - \rho_0 A_0) \mathbb{W}] / p_s^*, \quad (7)$$

其中 A 代表 u, v, T, q 或 p_s^* , 下标 0 表示差分点上的量值, 因而是参数, 对于差分点为常数, 以上公式中未加说明的符号为常用.

当 $R_o(A)$ 取为零时, (1)–(5) 式变为经典通量形式的方程组, p 坐标系和 σ_b 坐标系中的方程组也可由 (1)–(6) 式得出^[9].

平流形式的方程组可表示为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -D(u) + fv + PGF_x + F_u + R'_o(u), \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -D(v) - fu + PGF_y + F_v + R'_o(v), \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -D(T) + \frac{R\omega T}{c_p p} + \frac{\epsilon}{c_p \rho} + F_T + R'_o(T), \quad (10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -D(q) - C + E + R'_o(q) + Fq, \quad (11)$$

地面气压倾向方程及静力方程与通量形式相同, 但 (5) 式中 $R_o(p_{s0}^*)$ 一项取为零, 修正项 $R'_o(A)$ 具有以下形式:

$$R'_o(A) = - \frac{\partial}{\partial \sigma} \nabla_o \cdot [\rho(\phi - \phi_0)(A - A_0) \mathbb{W}] / p_s^*, \quad (12)$$

$D(A)$ 是非线性项微分算子, 具有平流形式:

$$D(A) = \mathbb{W} \cdot \nabla A + \sigma \frac{\partial A}{\partial \sigma}, \quad (13)$$

其中 A 可为 u, v, T 和 q .

有关预报方程组中各项的差分表达式可参见文献 [1], [2] 和 [5], 此处不再赘述.

2. 试验方案

为了比较通量形式和平流形式方程组在有地形模式中的计算精度以及修正项的作用, 我们进行了四项试验.

(1) 经典通量方案(CFX): 在该方案中, 采用 (1)–(6) 式作为模式方程组, 但修正

项 $R_0(A)$ 均略去, 因此, 该方案即为经典变换方法得到的预报方案。

(2) 通量修正方案(MFX): 该方案完全采用(1)—(6)式作为模式方程组, 即修正项保留, 因此, 该方案实际为差微差一致性变换方法得到的预报方案。

(3) 经典平流方案(CAD): 在该方案中, 采用不带修正项 $R_0(A)$ 的(8)—(11)式作为模式方程。

(4) 平流修正方案(MAD): 该方案与 CAD 的唯一差别是保留(8)—(11)式中的修正项 $R_0(A)$, 因此, 也是用差微差一致性变换方法所得到的方案。

预报初始场选用 1982 年 5 月 8 日和 1979 年 6 月 28 日 20 时的资料。前者是一次极地路径冷空气活动过程, 爆发了春季寒潮; 后者是夏季中国西部的一次降水过程, 是由中纬度冷槽东移造成的。关于这两次个例的天气形势及其演变过程以及数值预报的一般结果, 可参见文献[6], 此处略去, 以节省篇幅。

三、试验结果的分析 and 比较

我们对选用的两个例子均作了 48 小时的数值预报。为了比较四种方案的差异, 在分析比较时我们主要采用差值图, 这样可以突出它们之间的主要差别以及差别所在的地区。下面分几个方面来讨论。

1. 预报场与天气演变实况的比较

将预报场与相应时刻的实况相减, 即可看出不同方案预报效果的相对优劣。但是, 这里需要指出的是, 在高原地区由于低层温度场的预报值和实况值的计算方法不同, 因此, 两者难免有较大的差异。高原地区低层温度场究竟应如何比较, 尚待进一步研究。观测表明, 初夏和盛夏高原地面及其附近大气的温度要比周围相等等压面上的温度高出许多, 但实况场中由于只用探空资料, 且高原上探空站又少, 故常常可能掩盖或缩小这一特点。

图 1 是以 1982 年 5 月 8 日 20 时作为初始场的 24 小时预报高度场与实况场在 700hPa 上的差异, 单位为位势米, 其中 a 为经典通量方案(CFX), b 为经典平流方案(CAD)。MFX 和 CFX 基本一样, 它们的预报误差量值和区域分布均十分接近(图略)。预报的最大正误差为 14.2m, 负误差为 -29.4m, 主要分布在乌拉尔山脉一带, 此处实况场上恰好是一个高压脊, 说明高压脊预报偏弱了, 而正误差主要分布在预报区东北角, 那里实况场上是低压区, 说明低压预报强度也偏弱。这是目前数值预报中普遍存在的一个问题。CFX 和 MFX 的误差量值及其分布特点如此一致, 说明 MFX 中的修正项的作用, 在 24 小时的形势预报中还反映得不充分。但这并不是说修正项不重要, 下面我们将会看到, 在温度场和流场上, 两者仍有相当大的差别。

CAD 方案的预报结果明显地较 CFX 和 MFX 的为好。我们从图 1b 可以看到, 在 CAD 中, 最大正误差为 14.6m, 与 CFX 和 MFX 基本相同, 但最大负误差值只有 -22.1m, 比 CFX 和 MFX 减少了 7.3m。预报的误差分布特点与 CFX 和 MFX 基本相同。由于 MAD 的结果与 CAD 的类似, 故不再赘述。

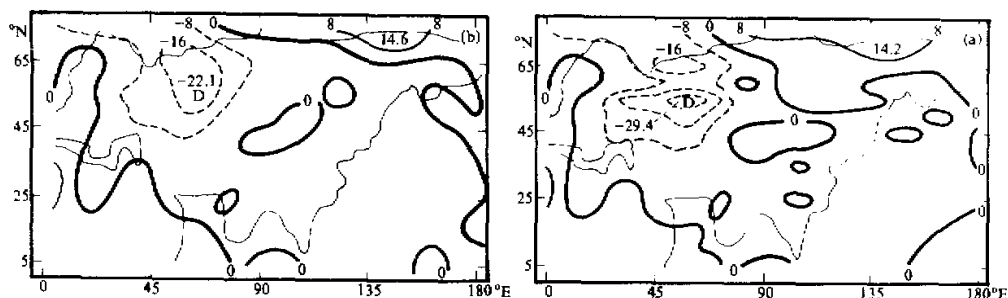


图1 1982年5月8日700hPa 24小时预报高度场与实况场的差异(单位:位势米)
(a)CFX, (b)CAD

2. MFX 和 CFX 的比较

前面指出,在700hPa 24小时高度场预报误差方面,MFX和CFX的差别很小.此处我们将从温度场和垂直环流场两方面来比较它们的差别.首先看温度场.图2是MFX减CFX 500hPa (a)和700hPa (b) 48小时温度预报差值分布,初始场为1979年6月28日20时.由图2可以清楚地看到,两种方案温度预报场的差异主要出现在高原地区.在500hPa图上,用MFX预报的温度在大陆上均高于CFX的.在高原上最多可以高出4.02℃.在700hPa图上,情况与500hPa上的类似,但高原地区温度差最大可达11.4℃.在高原以东地区,MFX的温度值反而比CFX的低,最大差值可达1.09℃.由此可见,在MFX中,将高原夏季的热力和动力作用更加突出了.1982年5月8日一例的情况与此完全相同,在700hPa上,高原地区最大温差也达到11℃,而高原东部温度偏低2.47℃(图略).

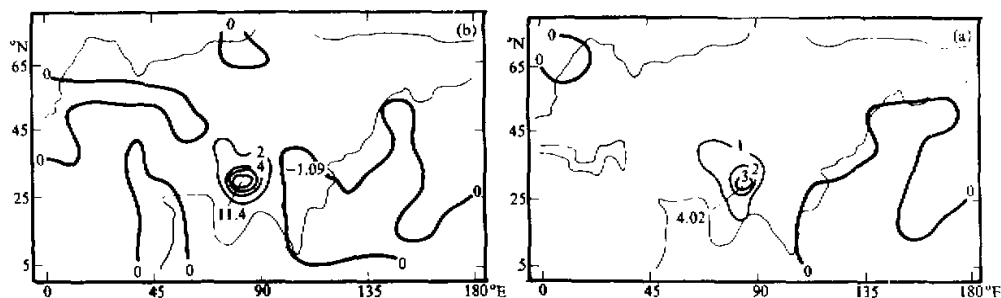


图2 1979年6月28日500hPa (a)和700hPa (b)上用MFX和CFX方案做的48小时
温度预报差值分布(℃)

温度的差异反映在垂直速度场上,则表现为垂直速度的增减.由于MFX预报温度比CFX的在高原上要高,而在高原以东要低,势必加强了东西向的垂直环流.图3是

沿 30°N 所作的纬向垂直环流差图, 用 MFX 的结果减去 CFX 的结果, 个例为 1979 年 6 月 28 日, 预报时效为 48 小时. 从图 3 可以明显地看到, 在 MFX 中, 高原西侧和高原上方的垂直速度增大, 西风分量也增大, 而高原东部对流层中层的垂直运动略有减小. 这种差值分布表明, 高原上空低层辐合高层辐散的形势显得更加清楚, 显示了夏季高原热力作用的增强.

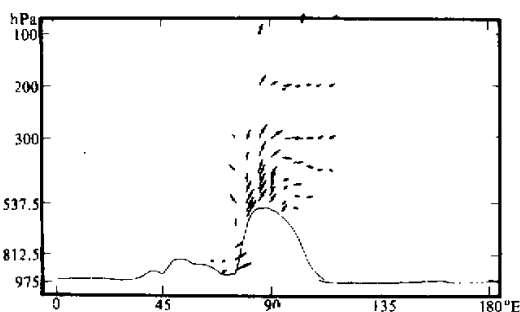


图 3 1979 年 6 月 28 日 48 小时预报 MFX - CFX 沿 30°N 的纬向环流图

3. MAD 和 CAD 的比较

MAD 与 CAD 的差别与 MFX 与 CFX 的差别恰好相反, 但是从量值上看没有那么显著. 例如, 对于 1979 年 6 月 28 日例子, 24 小时预报温度的差值分布在青藏高原南部是负的大值区, 中心值达到 -2.28°C , 高原四周均是负值. 其它地方差值很小, 最大正值差只有 0.144°C , 这是 500hPa 的情况(图 4a). 可见, 在经典平流方程组中加进了修正项 $R_{\theta}(A)$ 之后, 有地形区域内的温度预报值得到负的补偿, 这与经典通量方程组中加进修正项 $R_{\theta}(A)$ 的作用刚好相反. 高度场和垂直环流场的差值分布(图 4b), 与温度场的差值分布是匹配的, 但相差都比较小. 例如在图 4b 中, 我们可以看到高原上空的下沉气流有所增强, 但范围狭窄量值微小. 因此可以说, 这两种方案基本上得到类似的预报结果.

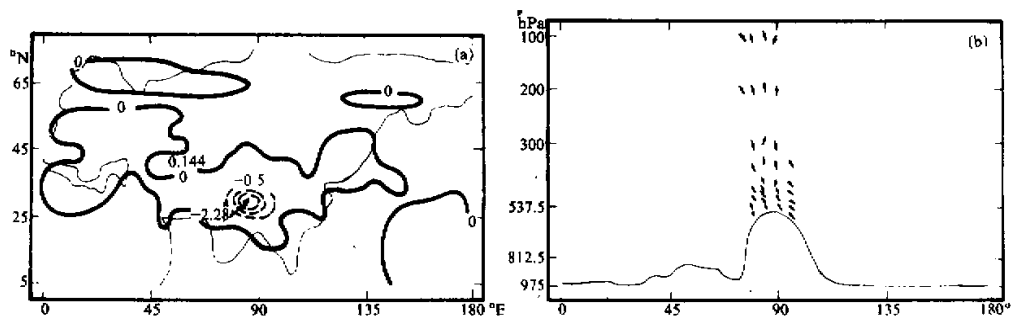


图 4 1979 年 6 月 28 日 24 小时预报 MAD - CAD 500hPa 温度差分布(a)和沿 30°N 垂直环流差图(b)

4. CAD 和 CFX 的比较

CAD 与 CFX 的差别很象 MFX 与 CFX 的差别, 无论从温度场和高度场的差值分布, 还是从垂直环流场的差值分布看, 都表现出高原热力作用被增强的特性, 从差值的区域分布看, 也很相似. 此处只给出沿 30°N 的垂直环流差值图(图 5), 个例为 1979 年 6 月 28 日, 预报时效 24 小时. 从图 5 看出, 垂直环流的差值分布与图 3 中的分布很相似, 只不过两者在强度上有差别, 图 5 中高原上的差值上升气流没有图 3 中的强. 对流层中上部甚至出现差值下沉气流.

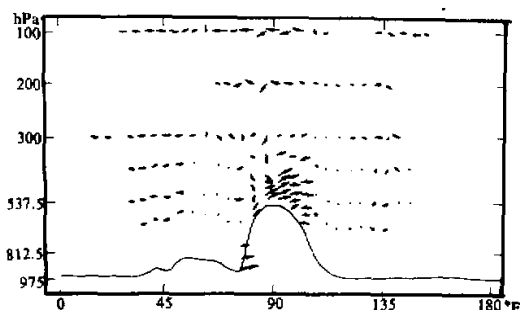


图 5 同图 4b, 但为 CAD - CFX

四、小 结

通过以上数值预报试验结果的对比分析, 我们可以得出如下初步结论:

(1) 在有高大地形的数值预报模式中, 采用经典平流形式的预报方程组要比采用经典通量形式的预报方程组为好, 因为这样可以减小地形陡坡区内的计算误差, 其原因在于(1)一(5)式中的修正项 $R_0(A)$ 比(8)一(11)式中的修正项 $R'_0(A)$ 在数量上要大.

(2) 通过数值预报试验可以看出, 通量修正方案与经典通量方案在地形高大地区内有较大的差别, 修正方案使高原地区的热力作用增强, 从而增强了高原上空热低压的强度. 由此表明, (1)一(5)式中的修正项确有一定的计算上的意义, 不能轻易略去.

(3) 经典平流方案与经典通量方案的预报结果, 在青藏高原上有较大差异. 而且, 这种差异与通量修正方案和经典通量方案的差异十分类似. 这说明, 经典平流方案已具有通量修正方案的特性, 部分地补偿了经典通量方案的计算误差.

(4) 平流修正方案与经典平流方案的预报结果差异较小, 这除了表明(8)一(11)式中的修正项量值较小以外, 还表明在有地形的数值预报模式中, 完全可以采用经典平流方案, 这样既可保证较好的计算精度, 又可省去计算修正项的麻烦和计算时间.

(5) 从本文所给出的两个数值预报例子看, 经典平流方案甚至比通量修正方案还好, 这可能是与经典平流方案中平流项的差分方案比较好, 即与采用了顺流线差分法^[1]有关, 同时也表明通量修正方案中通量项和修正项的差分计算式尚有改进的余地.

以上得到的结论与文献[7]中的基本相同,但还不能说是普遍的结论,今后还拟用更多的例子进行预报试验。同时,需要说明的是,对预报质量影响最大的气压梯度力计算方法,在四种方案中都是相同的,都采用了DDD变换方法所得出的结果^[2]。

致谢:本文的计算工作由徐海明在紫金山天文台 VAX 11/780 机上完成,金仪璐绘制了插图,谨表谢忱。

参 考 文 献

- [1] 钱永甫、颜 宏、骆启仁、王谦谦, 1978, 一个有大地形影响的初始方程数值预报模式, 大气科学, 2, 91 — 102.
- [2] 钱永甫、颜 宏、王谦谦、王安宇, 1988, 行星大气中地形效应的数值研究, 科学出版社.
- [3] 钱永甫、颜 宏, 1981, 有地形数值模式中大气动力学方程组计算精度的探讨, 中国科学院兰州高原大气物理研究所集刊, 第 1 号, 科学出版社.
- [4] Qian Yongfu and Zhong Zhong, 1986, General forms of dynamic equations for atmosphere in numerical models with topography, *J. meteor. Soc. Japan*, special volume, 743 — 756.
- [5] 钱永甫, 1985, A Five-layer primitive equation model with topography, 高原气象, 4, No.2(增刊), 1 — 28.
- [6] 董安祥等, 1985, 五层原始方程模式的若干个例试报情况, 高原气象, 4 卷 第 2 期(增刊), 99 — 109.
- [7] 翟 章、王谦谦、钱永甫, 1981, 差微差一致性的大气动力学方程组的个例试报总结, 中国科学院兰州高原大气物理研究所集刊, 第 1 号, 科学出版社, 77 — 84.

NUMERICAL PREDICTION EXPERIMENTS WITH FLUX AND ADVECTION FORMS OF DYNAMIC EQUATIONS

Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Abstract

Two cases of May 8, 1982 and June 28, 1979 are used for numerical prediction experiments in which four different predicting schemes are tested in order to compare their prediction skills and differences. The results show that the adoption of the set of equations in advection form in numerical models with topography is better than that in flux form. The set of dynamic equations in advection forms can guarantee higher accuracy and save computer time.

Key words: Numerical weather prediction; Numerical prediction model.