

# 地形坐标系数值模式中气压梯度力的计算

张玉玲

吴兴仁

(北京大学地球物理系)

(国家海洋局)

## 提 要

本文详细地讨论了 $\sigma$ 坐标模式引入地形时气压梯度力的截断误差。通过理论分析和数值计算看到,对于不同的 $\sigma$ 定义和模式变量的垂直分布,Corby格式的精度可以有很大差别。为了减小梯度力的计算误差,对于模式的垂直离散化和梯度力的差分格式提出了一些改进意见。

自1957年Phillips提出 $\sigma$ 坐标以后,考虑地形的数值模式垂直边界条件的处理变得简单多了。在模式大气的上下边界都取齐次边界条件 $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = 0$ 。但与此同时却出现了方程中其它项计算误差增大的问题,其中比较突出的是气压梯度力的计算。在比较陡峭的地形区,气压梯度力由两个相互抵消的大项组成,其中每一项都比梯度力本身大一个量级。如果每一项有10%的误差,则梯度力的相对误差可达100%。梯度力是运动方程中的重要项,对运动的发展起着重要的作用,因而在分析 $\sigma$ 坐标模式的计算误差时,人们首先注意到气压梯度力的计算。已有不少工作(Smagorinsky<sup>[1]</sup>, Corby<sup>[2]</sup>, Sundqvist<sup>[3]</sup>)讨论了这个问题。本文在这些工作的基础上,根据不同的垂直变量分布情况,着重对引起气压梯度力计算误差的因子进行分析,希望对梯度力的计算有所改进。

$\sigma$ 坐标中水平气压梯度力表示为

$$-\nabla_p \phi = -\nabla_x \phi - \alpha \sigma \nabla_x \pi$$

其中下标 $p$ 和 $\sigma$ 分别表示对 $p$ 坐标和 $\sigma$ 坐标进行运算, $\phi$ 为重力位势, $\alpha$ 为比容。对于不同的 $\sigma$ 定义, $\pi$ 的表达式也不同:当 $\sigma = p/p_s$ ,  $\pi = p_s$ ,当 $\sigma = (p - p_T)/(p_s - p_T)$ 时, $\pi = p_s - p_T$ ,式中 $p_s$ 为地形表面气压, $p_T$ 为模式大气上界的气压,为一常数。下面我们对一给定的理想大气和地形,讨论不同的 $\sigma$ 定义、不同的垂直变量分布下的计算误差。

## 一、理想大气和地形

设给定的理想温度分布为

$$T(p) = T_0 + \gamma \ln(p/p_0) \quad (1)$$

其中 $T_0$ 为 $p = p_0$ 处的温度, $\gamma$ 为温度递减率。若 $T_0$ 和 $\gamma$ 皆取为常数,则式(1)表示一种与 $(x, y)$ 无关,仅随 $\ln p$ 线性变化的温度分布。令 $Z = \ln(p/p_0)$ ,式(1)也可写成

$$T(z) = T_0 + \gamma z \quad (1')$$

如果 $\gamma$ 可随 $\ln p$ 改变,也可表示逆温层及对流层顶的存在。上式代入静力方程,对 $\ln p$ (或 $z$ )积分,得到

$$\phi(p) = \phi_0 - RT_0 \ln(p/p_0) -$$

$$\frac{1}{2} R \gamma \ln^2(p/p_0) \quad (2)$$

或

$$\phi(z) = \phi_0 - RT_0 z -$$

$$\frac{1}{2} R \gamma z^2 \quad (2')$$

$\phi_0$ 为 $p_0$ 的高度,可取 $p_0 = 1000 \text{hPa}$ 。可以看出, $\phi$ 也与 $(x, y)$ 无关,等压面和等温面都是水平的,所以 $\nabla_p \phi = 0$ 。

理想地形用地形表面气压来表示,设

$$\ln(p_s/p_0)$$

$$= -\hat{p}_m \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{D_x} x \right) \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{D_y} y \right) \quad (3)$$

其中 $D_x, D_y$ 分别表示 $x$ 方向和 $y$ 方向的地形水平域,我们取 $D_x = 2000 \text{km}$ ,  $D_y = 1600 \text{km}$ 。

$$\hat{p}_m = -\frac{1}{4} \ln 0.6$$

这相当于地形最高点气压为 600hPa。

## 二、第一种 $\sigma$ 坐标

令  $\sigma = p/p_s$ 。因  $z_s = \ln(p_s/p_0)$ ，则

$$z = \ln\left(\frac{p}{p_s} \cdot \frac{p_s}{p_0}\right) = \ln\sigma + z_s$$

$$T(x, y, \sigma) = T_0 + \gamma(\ln\sigma + z_s) \quad (4)$$

$$\phi(x, y, \sigma) = \phi_0 - RT_0(\ln\sigma + z_s)$$

$$-\frac{1}{2}R\gamma(\ln\sigma + z_s)^2 \quad (5)$$

由(4)和(5)可给出空间任一点  $T$  和  $\phi$  的准确值。

下面我们来讨论原始方程模式中最常采用的两种垂直变量分布

### 1. 变量分布 I

设变量的垂直分布如图 1 所示，取

$$\Delta\sigma_k = \sigma_{k+\frac{1}{2}} - \sigma_{k-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_k = \frac{1}{2}(\sigma_{k+\frac{1}{2}} + \sigma_{k-\frac{1}{2}})$$

模式是对  $\sigma$  等距分层的， $\sigma_k$  在  $\sigma_{k+\frac{1}{2}}$  和  $\sigma_{k-\frac{1}{2}}$  的中间位置。

Corby (1972) 提出一种计算梯度力的水平差分格式，对于 A 网格（为了简单，以下都只讨论  $x$  方向的分量，图 2）为，

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi}{\partial x} + \alpha\sigma \frac{\partial\pi}{\partial x} &= \frac{\partial\phi}{\partial x} + RT \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} \\ &\approx \left(\frac{\phi}{\sigma}\right)_x + RT \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} \end{aligned} \quad (6)$$

式中引用了算符

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

$$\alpha_x = \frac{1}{d} \left[ \alpha \left( x + \frac{1}{2} \Delta x \right) - \alpha \left( x - \frac{1}{2} \Delta x \right) \right]$$

在许多模式中采用了这种格式，或与此相近的格式。可以证明对于上述理想大气，如果图 1 的变量都有准确值，则差分格式(6)中的两项截断误差恰好相等，梯度力的差分近

似没有计算误差，也可得到梯度力为零的结果。

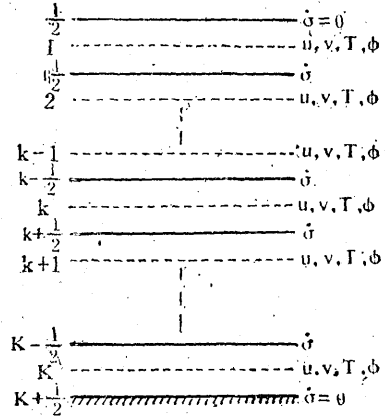


图 1 模式分层与变量分布 I

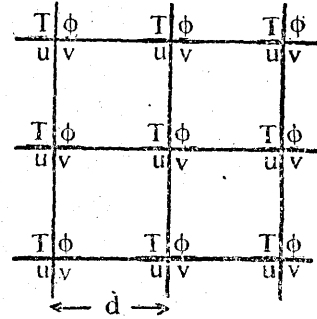


图 2 变量水平分布(A网格)

首先假定模式层上的  $T$ 、 $\phi$  和  $p_s$  都是精确的，这可由第一节的公式计算。将公式(4)和(5)代入上述格式，其中两项分别为

$$\begin{aligned} \overline{(\phi)}_x &= \frac{1}{2d} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}) \\ &= -\frac{R}{2d} \left\{ T_0 [(z_s)_{i+1,j} - (z_s)_{i-1,j}] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \gamma [(\ln\sigma + z_s)_{i+1,j}^2 - (\ln\sigma + z_s)_{i-1,j}^2] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\overline{RT} \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} \\ &= \frac{R}{4d} \left\{ (T_{i+1,j} + T_{i,j}) \cdot [(\ln p_s)_{i+1,j} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (T_{i,j} + T_{i-1,j}) \cdot \left[ (\ln p_s)_{i,j} - (\ln p_s)_{i-1,j} \right] \\
 & = \frac{R}{4d} \left\{ 2T_0 + \gamma [(\ln \sigma + z_s)_{i+1,j} \right. \\
 & \quad \left. + (\ln \sigma + z_s)_{i,j}] \right\} (z_s)_{i+1,j} \\
 & \quad - (z_s)_{i,j} + \frac{R}{4d} \left\{ 2T_0 + \gamma [(\ln \sigma \right. \\
 & \quad \left. + z_s)_{i,j} + (\ln \sigma + z_s)_{i-1,j}] \right\} \\
 & \quad \cdot [(z_s)_{i,j} - (z_s)_{i-1,j}] \\
 & = \frac{R}{2d} \left\{ T_0 [(z_s)_{i+1,j} - (z_s)_{i-1,j}] \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{2} \gamma [(\ln \sigma + z_s)^2_{i+1,j} \right. \\
 & \quad \left. - (\ln \sigma + z_s)^2_{i-1,j}] \right\}
 \end{aligned}$$

以上两式右端恰好为相差一个正负号的等量，故

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial (\ln p_s)}{\partial x} = 0$$

可见对于给定的理想大气，k层的 $\phi$ 和T若是精确的，Corby格式也是准确的。但在数值模式中，静力方程截断误差也会引起 $\phi$ 或T的误差，从而导致气压梯度力的计算不准确。对于变量分布I，静力方程的差分格式可写成

$$T_k + T_{k+1} = - \frac{2}{R} \frac{\phi_{k+1} - \phi_k}{\ln \sigma_{k+1} - \ln \sigma_k} \quad (7)$$

(5)式代入右端表达式

$$\begin{aligned}
 & - \frac{1}{R} \frac{\phi_{k+1} - \phi_k}{\ln \sigma_{k+1} - \ln \sigma_k} \\
 & = \frac{-1}{R(\ln \sigma_{k+1} - \ln \sigma_k)} \left\{ -RT_0(\ln \sigma_{k+1} + z_s) \right. \\
 & \quad \left. - \frac{1}{2} R\gamma(\ln \sigma_{k+1} + z_s)^2 + RT_0(\ln \sigma_k + z_s) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{2} R\gamma(\ln \sigma_k + z_s)^2 \right\} = T_0 + \gamma \left( \frac{\ln \sigma_{k+1} + \ln \sigma_k}{2} \right)
 \end{aligned}$$

$$+ z_s) = \frac{1}{2} (T_{k+1} + T_k)$$

$\phi_{k+1}$ ,  $T_{k+1}$ ,  $\phi_k$ ,  $T_k$  都等于该层的准确值，因此对于给定的理想大气静力方程(7)的截断误差为零。但对于图1的变量分布，在最低模式层不能用(7)式，而需用单向差分，这就可能产生计算 $T_k$ 或 $\phi_{k-\frac{1}{2}}$ 的误差。最低层的误差在静力方程积分过程中也会影响到以上各层。计算表明，这种误差对低层的影响大，对高层影响稍小，一些数值计算结果下面一并给出。

## 2. 变量分布II

图3给出的变量分布也是许多模式所采用的，分层与图1相同，但T和 $\phi$ 不在同

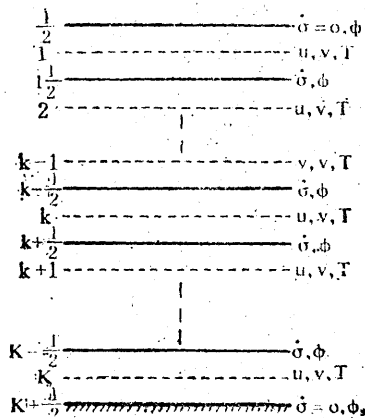


图3 垂直变量分布II

一层上。对于这样的变量分布梯度力格式可写成

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial \ln p_s}{\partial x} \approx \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_x + RT \frac{\partial (\ln p_s)}{\partial x} \quad (8)$$

静力方程为

$$T_k = - \frac{1}{k} \frac{\phi_{k+\frac{1}{2}} - \phi_{k-\frac{1}{2}}}{\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} - \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

首先讨论静力方程。(5)代入(9)式右端，则有

$$- \frac{1}{R} \frac{\phi_{k+\frac{1}{2}} - \phi_{k-\frac{1}{2}}}{\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} - \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}}}$$

$$= -\frac{1}{R} \frac{1}{\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} - \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}}} \cdot \left[ -RT_0(\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + z_s) - \frac{1}{2} R\gamma(\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + z_s)^2 + RT_0(\ln \sigma_{k-\frac{1}{2}} + z_s) + R\gamma(\ln \sigma_{k-\frac{1}{2}} + z_s)^2 \right] = T_0 + \gamma \left( \frac{\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}}}{2} + z_s \right) \quad (10)$$

$$\text{令} \quad \frac{1}{2} \ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}} = \ln \sigma_m$$

则

$$T_0 + \gamma(\ln \sigma_m + z_s) = T(\sigma_m)$$

因此式(10)右端等于 $T(\sigma_m)$ ，而不等于 $T(\sigma_k)$ ，故式(9)是有误差的。

格式(8)中 $\sigma_k$ 的高度 $\phi_k$ 用 $\phi^\circ$ 来代替，但实际上

$$\begin{aligned} \bar{\phi}^\circ &= \frac{1}{2} (\phi_{k+\frac{1}{2}} + \phi_{k-\frac{1}{2}}) \\ &= \phi_0 - RT_0 \left( \frac{\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{k-\frac{1}{2}}}{2} + z_s \right) \\ &\quad - \frac{1}{2} R\gamma \frac{(\ln \sigma_{k+\frac{1}{2}} + z_s)^2 + (\ln \sigma_{k-\frac{1}{2}} + z_s)^2}{2} \end{aligned}$$

可看出 $\bar{\phi}^\circ$ 不等于 $\phi(\sigma_k)$ ，只有当 $\sigma_{k+\frac{1}{2}}$ 和 $\sigma_{k-\frac{1}{2}}$ 之间的间隔很小时， $\bar{\phi}^\circ$ 才与 $\sigma_m$ 面的高度 $\phi(\sigma_m)$ 接近，一般情况下 $\bar{\phi}^\circ \neq \phi(\sigma_m) \neq \phi(\sigma_k)$ ，

也就是说格式(8)中的 $\bar{\phi}^\circ$ 与 $\bar{T}^x$ 并不属于同一 $\sigma$ 面上的值，这种不协调使得梯度力的两项不能相消而产生误差，这种误差在高层是相当大的，尤其当垂直分辨率低时更加严重。

### 三、第二种 $\sigma$ 坐标

在前一节的 $\sigma$ 坐标中，若取 $\sigma=1$ 和 $\sigma=0$ 为模式大气的边界，实际大气中则会遇到求 $p=0$ 的等压面高度问题，此时一般用静力方程的单向差分公式。为了避免这样处理，或取某一 $\sigma_0 (\neq 0)$ 为上边界，或取 $\sigma = (p - p_T) / (p_s - p_T)$ ，此时对变量分布I气压梯度力写成

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial}{\partial x} \ln p \approx \left( \bar{\phi}^x \right)_x + \overline{RT^x (\ln p)_x}$$

用式(1)，(2)代入上式，可得到与前节相同的结果，这里不再重复。

对于第二种变量分布，则有

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + RT \frac{\partial}{\partial x} \ln p \approx \left( \bar{\phi}^\circ \right)_x + \overline{RT^x (\ln p)_x} \quad (11)$$

气压梯度力在k层的运动方程中出现，表达式中 $\bar{\phi}^\circ$ ， $\bar{T}^x$ ， $\ln p$ 都应理解为k层的值。很自然 $\ln p$ 取为 $\ln(\sigma_k(p_s - p_T) + p_T)$ ，但 $\bar{\phi}^\circ$ 和由静力方程计算的T都不准确地等于 $\phi(\sigma_k)$ 和 $T(\sigma_k)$ ，故格式(11)存在误差。

根据上面的分析，为了减小梯度力的计算误差应使 $\bar{\phi}^\circ$ ， $T$ ， $\ln p$ 尽可能接近同一 $\sigma$ 面上的准确值。 $\ln p$ 应取 $\sigma_m$ 面上的值，而不是 $\sigma_k$ 上的值。因

$$\ln p_m = \frac{1}{2} (\ln p_{k+\frac{1}{2}} + \ln p_{k-\frac{1}{2}}) = \overline{\ln p}$$

故梯度力可写成以下格式

$$\left( \bar{\phi}^\circ \right)_x + \overline{RT^x (\ln p)_x} \quad (12)$$

### 四、参考大气

为了减小梯度力的计算误差，有些模式引进了一个参考大气 $\bar{\phi}(p)$ ， $\bar{T}(p)$ ，将实际大气表示为

$$T(x, y, p, t) \approx \bar{T}(p) + T'(x, y, p, t)$$

$$\phi(x, y, p, t) \approx \bar{\phi}(p) + \phi'(x, y, p, t)$$

$T'$ 和 $\phi'$ 为实际大气与参考大气的偏差。参考大气只与 $p$ 有关，并满足

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \ln p} = -R\bar{T}$$

$$\bar{\phi}(p) = \bar{\phi}(p_0) - \int_{p_0}^p R\bar{T} d \ln p$$

偏差部分满足

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \ln p} = -RT'$$

$$\phi'(p) = \phi'(p_0) - \int_{p_0}^p RT' d \ln p$$

气压梯度力

$$-\nabla_p \phi = -\nabla_p \bar{\phi} - \nabla_p \phi' = -\nabla_p \phi'$$

$$= -\Delta_s \phi' - RT' \nabla_s \ln p$$

梯度力不直接用  $\phi$ ,  $T$  进行计算, 而是首先求出偏差  $\phi'$  和  $T'$ , 再通过  $\phi'$  和  $T'$  来计算梯度力。如果所选取的参考大气及差分格式使梯度力  $\nabla_s \bar{\phi} + R \bar{T} \nabla_s \ln p$  的计算结果也为零, 则引入参考大气对减小误差并不起作用。结合前面的讨论结果, 如取式(4), (5)为参考大气, 则对第一种变量分布, 引入与不引入参考大气计算结果不会有什么差别。但对第二种变量分布, 引入参考大气则可提高计算精度。Sundqvist<sup>[3]</sup>也指出, 取等温的或随  $\ln p$  线性变化的  $\bar{T}(p)$  为参考大气(对第一种变量分布), 很难提高计算准确度, 因为温度随  $\ln p$  的高次变化才会引起差分计算的误差。

五、数值计算结果

为了了解不同因子所引起的误差的大小, 下面给出对第二种  $\sigma$  坐标所计算的一些数值结果。

变量分布 I:

温度误差主要来源于最低模式层 ( $k=K$ ) 的静力方程的截断误差。表 1 给出五层模式  $\sigma=0.9$  处山脉左侧的温度误差的分布。  $i=0$  为海平面,  $i=5$  为山脉最高点。从表中看出, 温度误差都在 2K 左右。K 层以上误差绝对值与  $\sigma=0.9$  层相等, 但逐层改变符号。由于温度误差又引起梯度力的计算误差, 如果用对应的地转风来表示梯度力大小, 表 2 给出了每层的最大地转风。可见同样大小的温度误差, 在低层影响较大, 高层影响较小。如果把最低的模式层厚度减小, 可减少各层的梯度力误差。

表 1

$i$	0	1	2	3	4	5
$\sigma$						
0.9	2.09	2.08	2.05	2.00	1.95	1.93

格点位置  $x=id, y=0$ 。单位 K

表 2

单位  $m \cdot s^{-1}$

$\sigma$	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
$ \bar{\nabla}_g $	5.2	5.0	4.6	4.0	2.4

变量分布 II:

在许多等距分层的模式中都令  $\sigma_k =$

$$\frac{1}{2} (\sigma_{k+\frac{1}{2}} + \sigma_{k-\frac{1}{2}}), \text{ 用 } \bar{\phi} \text{ 代表 } \phi(\sigma_k)。 \text{ 由表}$$

3 可看出,  $\phi(\sigma_k)$  和  $\bar{\phi}$  的差值很大, 到高层更加显著。这表明用  $\bar{\phi}$  代替  $\phi(\sigma_k)$  的误差与模式层的厚度有关。在山脉坡度大的地方, 模式层几何厚度的水平变化大,  $\phi(\sigma_k) - \bar{\phi}$

的水平变化也大, 故可使  $\left(\frac{-\sigma}{\phi}\right)_x$  包含着较

大的误差, 这是使梯度力在坡度大处误差大的一个原因。第一行  $\phi(\sigma_m) - \bar{\phi}^\sigma$  比第二行  $\phi(\sigma_k) - \bar{\phi}^\sigma$  数值小得多, 这说明  $\bar{\phi}^\sigma$  更接近  $\phi(\sigma_m)$ 。前面已经证明, 用式(9)计算的温度并不等于  $\sigma_k$  层的温度  $T(\sigma_k)$ , 第三行给出了两者的差值。这差值在低层较小, 到高层已经相当大了。用包含这些误差

表 3

$\sigma$	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
$\phi(\sigma_m) - \bar{\phi}^\sigma (m^2 \cdot s^{-2})$	21	101	172	370	1807
$\phi(\sigma_k) - \bar{\phi}^\sigma (m^2 \cdot s^{-2})$	-337	-504	-843	-1736	-6021
$T_k - T(\sigma_k) (K)$	0.22	0.34	0.60	1.35	5.64
$ \bar{\nabla}_g _1 (m \cdot s^{-1})$	0.9	1.6	3.4	9.7	54.4
$ \bar{\nabla}_g _2 (m \cdot s^{-1})$	0.2	0.3	0.7	2.3	16.3
$ \bar{\nabla}_g _{10} (m \cdot s^{-1})$	0.9	1.6	3.7	10.3	58.5
$ \bar{\nabla}_g _{20} (m \cdot s^{-1})$	0.2	0.4	0.6	2.3	16.4

的差分公式(8)所计算的地转风列于第四行(每一层的最大值)。地转风在低层较小,向上迅速增加,到达 $\sigma = 0.3$ 风速已经相当可观了。如果采用格式(12),则风速大大地减小

(第五行)。在 $\sigma = 0.5$ 以下 $|\vec{V}_g|$ 都小于 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在 $\sigma = 0.1$ 处风速虽然仍然很大,但减小至 $|\vec{V}_g|_1$ 的 $1/3.3$ 。和变量分布 I 相比,在相同的垂直分辨率情况下,在 $\sigma = 0.3$ 以下 $|\vec{V}_g|_2$ 都比 $|\vec{V}_g|_1$ 小。但究竟哪一种变量垂直分布对预报效果影响更大,还要通过实际预报来验证。

用实际资料取等压面的平均高度来代替理想大气的等压面高度,做了同样的计算,结果在表3的第6行和第7行给出, $|\vec{V}_g|_{10}$ 和 $|\vec{V}_g|_{20}$ 分别与 $|\vec{V}_g|_1$ 和 $|\vec{V}_g|_2$ 相对应。虽然所用资料不同,计算结果还是相当一致的,这说明格式(12)对降低计算误差效果是明显的。

由上面的讨论可看出,随着变量垂直分布对于差分格式所做的修改,表面上看来变动不大,而且是很自然的,但实际影响是不小的,对于低分辨率模式影响更大。

## 六、结论

1. 本文讨论不同因子引起的气压梯度力计算误差。指出变量垂直分布不同而引起的垂直差分格式(包括格式中的垂直插值)不协调,可使梯度力的计算产生很大的误差。垂直分辨率越低,这种误差越严重,引入参

考大气对减小误差的效果与差分格式有关,应对所取格式做具体分析。

2. 若采用第一种变量分布,模式的最低层应取薄些,这样可减小最低层温度和位势高度的计算误差,同时也降低了以上各层的误差。

3. 若采用第二种变量分布,可用以下方法减小梯度力误差:(1)采用不等距分层减小高层模式层厚度,(2)u, v, T等变量在 $\sigma_m$ 层上预报,而不在 $\sigma_k$ 层上。

4. p- $\sigma$ 混合坐标对第一种变量分布的模式不一定会有明显的改进效果。对第二种变量分布效果会好一些,但 $\sigma$ 坐标和p坐标的转换高度也不必取得很低,因 $\sigma = 0.3$ 以下梯度力的误差并不大。

本文所得结论还应在数值模式中进行实际计算,模式试验结果将另文发表。

## 参考文献

- [1] Smagorinsky, J. et al., Prediction experiments with a general circulation model, Динамика Крупномасштабных Атмосферных процессов, (1967), 70-134, Издательство «Наука» Москва,
- [2] Corby, G. A., A. Gilchrist and R. L. Newson, 1972, A general circulation model of the atmosphere suitable for long period integration, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 98, 809-832.
- [3] Sundqvist, H., 1975, On truncation errors in sigma-system models, Atmosphere, 13, 81-95.

# Evaluation of pressure gradient force in coordinate system following the terrains

Zhang Yuling

(Department of Geophysics, Beijing University)

Wu Xingren

(National Bureau of Oceanography)

## Abstract

A detail examination of the truncation errors of the pressure gradient force is shown in  $\sigma$  coordinate system when orography was introduced into the numerical weather prediction model. By means of theoretical analysis and numerical calculation, it was found that the accuracys of Corby scheme are differed greatly for different definitions of  $\sigma$  and vertical distributions of variables of the model. In order to suppress the errors, some suggestions about vertical discretization of the model and finite difference formulation of pressure gradient force are given.