

大气模式垂直离散的比较研究*

廖洞贤 胡 铭

(南京气象学院, 南京, 210044)

摘 要

对温度有关量的垂直离散进行了讨论。分析指出: 垂直离散量的计算应分别情况不同对待, 温度垂直廓线较光滑的, 可以直接用差分或 Tschebyscheff 多项式等进行计算; 温度垂直廓线不太光滑的, 须用能近似表示廓线不太光滑部分的基本廓线进行分离, 再用差分等计算, 才能取得较好的结果。

用理想场计算的例子表明: 用上述方法计算的结果都比直接用差分等计算的结果好, 特别是在计算位势高度和温度垂直平流时效果更为明显。

关键词: 垂直离散, 不连续, Tschebyscheff 多项式。

1 引 言

在前两篇文章中^[1,2], 廖洞贤等对当前大气模式垂直离散中存在的问题进行了讨论, 指出垂直离散不同于水平离散, 其中有层结问题; 也不能作为周期问题处理; 而在对流层顶或逆温处某些气象要素还常有垂直微商的不连续, 如用正交谱函数展开或作差分运算, 在其附近会出现较大的计算误差。

在气象要素中, 温度的垂直分布较复杂, 有时较光滑, 有时却很光滑, 对与它有关的垂直离散量的计算应当考虑这两种情况; 这样, 适用于它的方法必适用于其它气象要素的有关量。因此, 将只讨论与温度有关的垂直离散量的计算问题。

为使问题不致牵涉太广, 现只就绝热无耗散情况下大气模式的垂直离散问题进行讨论; 先讨论计算的方法, 再对静力方程和连续方程的积分, 以及与之有关的垂直平流的计算等进行讨论; 最后, 给出初步结论。

2 计算方法

不失普遍性, 设大气中的对流层顶(或逆温层, 下同)只有一个。如果不然, 可以把大气沿垂直方向分为若干部分, 每部分只有一个对流层顶。

采用 σ -坐标($\sigma = P/P^*$, P, P^* 各为气压和地面气压), 并把大气分为若干层, 在各 σ -面上, 气象要素均有定义。

* 初稿时间: 1996 年 4 月 29 日; 修改稿时间: 1996 年 7 月 8 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目 49575268 号。

为了方便, 把对流层顶附近的温度垂直廓线分为光滑的和不光滑的两种情形分别讨论。用 $\max \delta^2 T / \delta \sigma^2 < M$ ($\delta^2 T / \delta \sigma^2$ 为 2 阶差商, M 为一给定的正数) 定义为光滑, 否则为不光滑。还因不论是对流层顶或逆温层, 所用的方法均相同, 下面只讨论对流层顶的情形。

2.1. 光滑的情形

可以用差分或谱方法进行计算, 或取

$$T = \hat{T} + T \quad (1)$$

其中 \hat{T} 是基本部分, T 是偏差。 \hat{T} 表示作

$$\hat{T} = T_s + b\hat{\sigma} + c\hat{\sigma}^2 + d\hat{\sigma}^3 + e\hat{\sigma}^4 \quad (2)$$

$\hat{\sigma} = \sigma - \sigma_s$, $b = (\delta T / \delta \hat{\sigma})_s$, $c = (\delta^2 T / \delta \hat{\sigma}^2)_s / 2$, 下标 s 表示对流层顶处的值。于是, 再通过平流层上层和对流层下层各一 σ -面的温度值则可决定 d 和 e 。

2.2 不光滑的情形

考虑资料是离散的, 计算时不易鉴别微商的不连续性, 而下面所用的方法既适用于不连续的情形, 也适用于连续的情形; 因此, 用这种方法包括了 $\delta^2 T / \delta \sigma^2 > M$ 且垂直微商不连续的在内。

在不光滑的情形, 用谱方法或差分计算与 T 有关的量, 常会出现 Gibbs 现象或大振幅的误差振荡, 要想用增加分辨率或提高精度的方法来解决并不总是可能的(如文献 [2] 所举的例子)。不过, 如能用一种方法把 T 的不光滑(或不连续)部分分离或近似分离出来, 则剩下的部分应当是光滑的。为了说明问题, 不妨设在对流层顶处垂直微商不连续。如果构造一基本温度廓线 \hat{T} , 使其在 $\sigma = \sigma_s$ 处, $T = \hat{T}$, 且其上下单向差商各近似于 $(\partial T / \partial \sigma)^-$ 和 $(\partial T / \partial \sigma)^+$, 则象式(1)那样把 T 表示为 \hat{T} 和 T 之和, 则必然在 $\sigma = \sigma_s$ 的邻域内

$$T \ll \hat{T}$$

且 T 的垂直分布比较光滑。比如, 取

$$\hat{T} = \begin{cases} T_s + b_1 \ln \frac{\sigma}{\sigma_s} + c_1 (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^2, & \sigma > \sigma_s \\ T_s + b_2 \ln \frac{\sigma}{\sigma_s} + c_2 (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^2, & 0 < \sigma - \sigma_s \end{cases} \quad (3)$$

其中 $b_1 = \sigma_s (\delta T / \delta \sigma)_s^+$, $b_2 = \sigma_s (\delta T / \delta \sigma)_s^-$; $(\delta T / \delta \sigma)_s^+$, $(\delta T / \delta \sigma)_s^-$ 各是和 $(\partial T / \partial \sigma)^+$ 和 $(\partial T / \partial \sigma)^-$ 相当的单向差商; c_1, c_2 由平流层上层和对流层下层各一 σ -面的温度决定。于是, 除对流层顶处外, 可以求出 $\partial \hat{T} / \partial \sigma$, 而 $\partial T / \partial \sigma$ 可以用数值计算求得, 从而, 求出 $\partial T / \partial \sigma$ 的近似值。至于在对流层顶处, 则可以用公式

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \sigma}\right)_s = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial \sigma}\right)_s^+ + \left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial \sigma}\right)_s^- \right] + \left(\frac{\delta T}{\delta \sigma}\right)_s \quad (4)$$

计算。这里 $\delta T / \delta \sigma$ 是中央差商。

垂直微商连续的情形, 用上式计算与用中央差计算是一样的。

3 理想场和准确解(或“标准解”)

3.1 准确解

在计算垂直离散量时,需要一定资料,这可以从具有一定特点的理想场或观测中取得。但为了估计计算误差,用理想场的准确解作标准是一个理想且严格的方法。因为模式中包含的因素很多,预报和实况之间的差只能代表模式总的预报水平,并不完全代表模式中某一部分的计算方案的水平,很难说预报效果好,这部分的计算方案就一定好,反之亦然。另外,在很难求出准确解的情况,用“标准解”来代替也不失为一好办法。“标准解”是指用甚高分辨率,用某种合理的方法得到的数值解。

3.2 地面气压倾向

根据连续方程

$$\frac{\partial \ln P^*}{\partial t} + V \cdot \nabla \ln P^* + D + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

设

$$A = V \cdot \nabla \ln P^* + D \quad (6)$$

且可表示为

$$A = \hat{A}_1 \cos(1 - \sigma)\pi + \hat{A}_2 \sin(1 - \sigma)\pi \quad (7)$$

则在垂直边界条件: $\sigma = 0, 1$ 处

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

下

$$\frac{\partial \ln P^*}{\partial t} = \frac{2\hat{A}_2}{\pi} \quad (9)$$

3.3 垂直速度

对连续方程作从 0 到 σ 的积分并利用式(7)和条件式(8),可以求得

$$\sigma = \frac{\hat{A}_2}{\pi}(2\sigma - 1) + \frac{1}{\pi}[\hat{A}_1 \sin(1 - \sigma)\pi - \hat{A}_2 \cos(1 - \sigma)\pi] \quad (10)$$

3.4 位势高度

3.4.1 温度理想场

取两种温度理想场:一在对流层顶处垂直微商不连续;一在该处连续。

(1) 温度场 I

$$T = \begin{cases} T^* - \Gamma z = T^* \sigma^\alpha, & 1 - \sigma \leq \sigma_s \\ T_s = T^* \sigma_s^\alpha & \sigma_s < \sigma < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $P^* = 1013.25 \text{hPa}$, $\alpha = R\Gamma/g$, $T^* = 288.15 \text{K}$, $z^* = 0.0 \text{m}$, $\Gamma = 0.0065 \text{K/m}$, $T_s = 216.91 \text{K}$, $P_s = 228.0 \text{hPa}$, $z_s = 10959 \text{m}$, 下标 * 表示地面上的值, R 是干空气的气体常数

(2) 温度场

$$T = 225 + \frac{65}{2(1 - \sigma_a)} \{ \sigma - \sigma_a + [\sigma_a^2 + (\sigma - \sigma_a)^2]^{1/2} \} \quad (12)$$

其中 T 以 K 为单位, 取 $\sigma_a = 0.3, \sigma_b = 0.1$ 。

3.4.2 位势高度的准确解

(1) 用式(11)对静力方程积分, 可以得到位势高度 φ 的准确解

$$\varphi = \begin{cases} g \frac{T^*}{\Gamma} (1 - \sigma^{\alpha}) & 1 - \sigma < \sigma_s \\ g \frac{T^*}{\Gamma} (1 - \sigma^{\alpha}) + R T_s \ln \frac{\sigma_s}{\sigma}, & \sigma_s < \sigma < 0 \end{cases} \quad (13)$$

(2) 从式(12)不易求出其准确解, 现采用“标准解”, 即在 $\sigma = 0.001$ 和 $\sigma = 1$ 之间用 $\ln \sigma$ 等距分层, 当层数为 1000 时用 EC78(欧洲中心 1978 年方案)所得到的静力方程的数值解^[3]。其所以如此, 一是因用 $\ln \sigma$ 比用 σ 等距分层精度较高^[4], 二是用这种方法用式(11)得到的数值解与准确解(13)之间误差很小的缘故(表略)。

4 垂直分层

采用两种分层方法: 对于差分计算, 用 σ 等距分层; 对于 Tschebyscheff 多项式计算, 用其 L 次零点分层, 这时, 网格距是不等距的。设 $L = 16$, 则

1、等距时

$$\Delta \sigma = 0.0625$$

2、不等距时

$$S = 2\sigma - 1 \quad (14)$$

而

$$S^k = -\cos \frac{(2k-1)\pi}{2L}, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (15)$$

分层如表 1 所示。可以看出: 在平流层和对流层上部, 以及边界层内, 分变率都较高。

表 1 不等距分层

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| s | -0.99518 | -0.95694 | -0.88192 | -0.77301 | -0.63439 | -0.47140 | -0.29028 | -0.09802 |
| σ | 0.00241 | 0.02153 | 0.05904 | 0.11349 | 0.18280 | 0.26430 | 0.35486 | 0.45099 |
| k | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| s | 0.09802 | 0.29028 | 0.47140 | 0.63439 | 0.77301 | 0.88192 | 0.95694 | 0.99518 |
| σ | 0.54901 | 0.64514 | 0.73570 | 0.81720 | 0.88651 | 0.94096 | 0.97847 | 0.99759 |

5 温度的垂直微商

采用 4 种方法计算 $\partial T / \partial \sigma$ 。它们各是:

1. T 不分离, 用中央差计算 $\partial T / \partial \sigma$;

2. T 不分离, 用 Tschebyscheff 多项式计算 $\partial T / \partial \sigma$ 。

3. T 分离, 如温度场取式(11), \hat{T} 取式(3); 如温度场取式(12), \hat{T} 取式(2); $\partial T / \partial \sigma$ 用中央差计算。

4. T 分离, T 和 \hat{T} 的取法和方法 3 相同, $\partial T / \partial \sigma$ 用 Tschebyscheff 多项式计算(方法详见文献[4]、[5])。

$\partial T / \partial \sigma$ 的计算结果如表 2 所示。表中显示: 对于温度场式(11)来说, T 分离比不分离显著为好, 误差小 1-2 个量级, 而用 Tschebyscheff 多项式的又稍好于用中央差的; 但对于温度场式(12)来说, 不论分离与否, 用 Tschebyscheff 多项式的均比用中央差的为好, 而用中央差的, 则分离的比不分离的好。不过, 在不分离的情况, 不论方法 1 或 2, 用温度场式(11)计算的结果都显著比用温度场式(12)的差。其所以如此, 根据分析, 是和在对流层顶处的 $\frac{\delta^2 T}{\delta \sigma^2}$ 有关, 温度场式(11)的值约为温度场式(12)的 2.8 倍!

表 2 $\partial T / \partial \sigma$ 的计算误差

| 温度场 | 方法 | \overline{E} (K) | re \overline{E} (%) | RMSE (K) | re RMSE (%) | E_{\max} (K) | re E_{\max} (%) |
|------|----|-----------------------|--------------------------|-------------|----------------|-------------------|----------------------|
| (11) | 1 | 7.0839 | 10.6120 | 18.8504 | 40.9318 | 75.3905 | 49.2142 |
| | 2 | 7.2793 | 12.6095 | 8.7214 | 18.3895 | 29.9168 | 18.5710 |
| | 3 | 0.1695 | 0.2540 | 0.3897 | 0.8463 | 1.4621 | 0.9544 |
| | 4 | 0.1195 | 0.2070 | 0.1593 | 0.3360 | 0.6376 | 0.3958 |
| (12) | 1 | 3.5222 | 5.4542 | 11.0423 | 31.2482 | 46.1992 | 50.0280 |
| | 2 | 0.5084 | 0.8621 | 0.4341 | 1.1044 | 1.7741 | 1.9203 |
| | 3 | 2.9979 | 4.6422 | 2.5573 | 7.2369 | 10.7528 | 11.6439 |
| | 4 | 0.5052 | 0.8567 | 0.4268 | 1.0858 | 1.7294 | 2.0884 |

注: $\text{re } F = \frac{E(F)}{F} \times 100\%$, 其中 F 表示某物理量的 \overline{F} , RMS 或 F_{\max} ; $E(F)$ 表示 F 的 \overline{E} , RMSE 或 E_{\max} 。

为了了解 $\partial T / \partial \sigma$ 计算误差随高度的分布, 绘制了用中央差计算的误差廓线, 如图 1 所示。图 1a 表示: 在 T 不分离时, 用温度场式(12)引起的计算误差不仅比用温度场式(11)引起的小, 而且, 其振荡的幅度也远比之为小。但是, 在用式(3)式计算 \hat{T} , 把 T 从式(11)分离后, 其计算误差还更小。而且, 这样分离后, 用 Tschebyscheff 多项式计算 $\partial T / \partial \sigma$, 并从而得到的 $\partial T / \partial \sigma$ 的计算误差也很小, 振荡几乎消除了。看来, 用 \hat{T} 分离的方法在消除或削弱对流层顶附近的误差大振荡现象有明显的作。这再一次说明: 对于垂直微商不连续的情形, 用这种方法是很有效的。

6 连续方程的积分

6.1 对数地面气压倾向

对数地面气压倾向用梯形公式和 Tschebyscheff 多项式计算。

梯形公式是

$$\frac{\partial \ln P^*}{\partial t} = - \sum_{k=1}^L A_k \Delta \sigma_k \quad (16)$$

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

用 Tschebyscheff 多项式的公式是

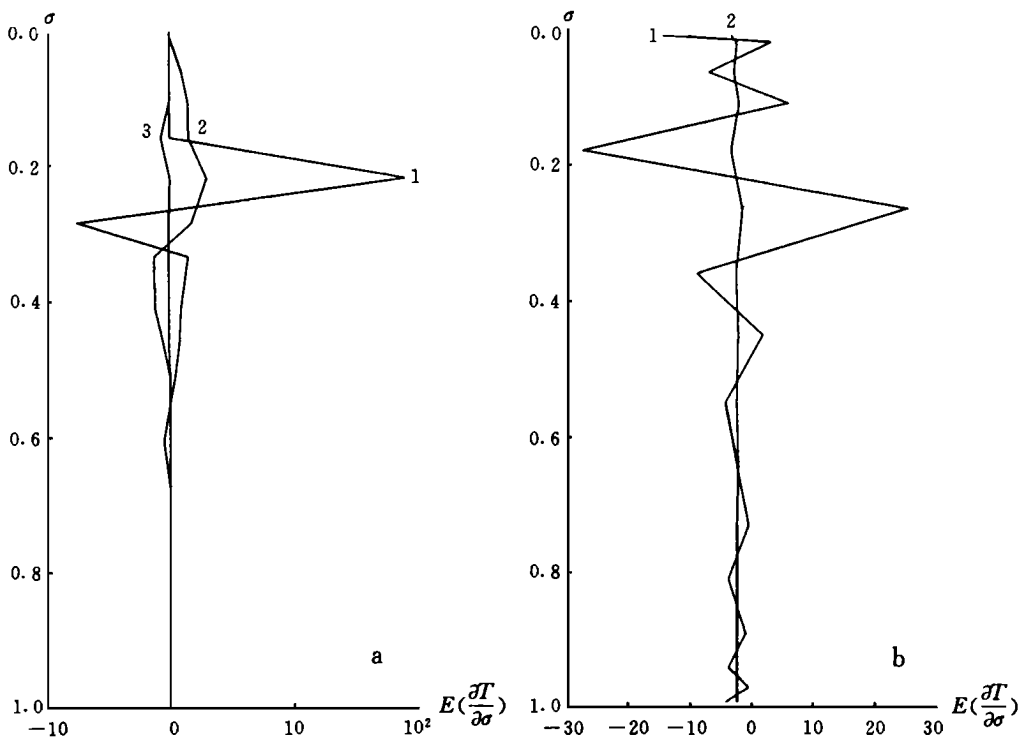


图 1 温度垂直微商的计算误差

(a. 1, 2, 3 各表示用温度场式(11), 中央差; 温度场式(12), 中央差; 温度场式(11), T 用式(3)分离, 中央差。b. 1, 2 各表示用温度场式(11), Tschebyscheff 多项式; 用温度场式(11), T 用式(3)分离, Tschebyscheff 多项式)

$$\frac{\partial \ln P^*}{\partial \sigma} = - \sum_{l=0}^{L-1} \frac{A_l}{l^2 - 1} \quad (l \pm 1 = \text{奇数}) \quad (17)$$

其中 A_l 是 A 的 Tschebyscheff 展开系数。

利用式(7), 把用式(16)、(17)计算的结果和准确解式(9)相比, 可以得到表3。可以看出: 不论用那种方法, 精度都是很高的。

表 3 对数地面气压倾向的计算误差(s^{-1})

| L | 公式 | $E (\times 10^{-10} s^{-1})$ | re E (%) |
|-----|---------------|------------------------------|------------|
| 16 | 梯形 | 1.0252 | 1.1608 |
| | Tschebyscheff | -0.0029 | -0.0005 |

6.2 垂直速度

σ 仍用梯形公式和 Tschebyscheff 多项式计算。

σ 的梯形公式是

$$\hat{\sigma}_{k+1} = \sigma_{k+1} - \sum_{j=1}^L A_j \Delta \sigma_j - \sum_{j=1}^k A_j \Delta \sigma_j \quad (18)$$

Tschebyscheff 多项式法的计算公式详见文献 [5]。

如 A 的表达式仍采用式 (7), 误差估计用准确解作标准, 则计算结果如表 4 所示。

表 4 垂直速度的计算误差 (s^{-1})

| L | 公式 | \overline{E} | re \overline{E} | RMSE | re RMSE | E_{\max} | re E_{\max} |
|-----|------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------------|
| | | ($\times 10^{-6} s^{-1}$) | (%) | ($\times 10^{-6} s^{-1}$) | (%) | ($\times 10^{-6} s^{-1}$) | (%) |
| 16 | Trap | 0.0729 | 7.1838 | 0.0503 | 10.3432 | 0.2179 | 13.7492 |
| | Tsch | 0.0077 | 1.0229 | 0.0054 | 0.9653 | 0.0153 | 0.9738 |

注: Trap 和 Tsch 各表示梯形公式和 Tschebyscheff 多项式法。

6.3 温度垂直平流

为了比较, 用如下 4 种方法进行计算。

1. Arakawa 方案, T 不分离, $\hat{\sigma}$ 用梯形公式。

2. Tschebyscheff 多项式法, T 不分离, $\partial T / \partial \sigma$, $\hat{\sigma}$ 均用 Tschebyscheff 多项式计算。

3. T 分离, $\hat{\sigma}$ 用梯形公式, T 的平流用 Arakawa 方案, \hat{T} 视所取的温度场而异; T 用式 (11), \hat{T} 取式 (3); T 用式 (12), \hat{T} 取式 (2)。

4. T 分离, $\hat{\sigma}$ 和 $\partial T / \partial \sigma$ 都用 Tschebyscheff 多项式计算, \hat{T} 视所取温度场而异: 如采用温度场式 (11), T 取式 (3); 如采用温度场式 (12), T 取式 (2)。

计算结果如表 5 所示。从表中可以看出: 对于温度场式 (11), 方法 (3)、(4) 较好, 特别是方法 4; 对于温度场式 (12), 采用 T 分离, 没有什么改进, 反而稍差一些。

表 5 温度垂直平流的计算误差 ($10^{-5} K s^{-1}$)

| L | 温度场 | 方法 | E | | RMSE | | E_{\max} | |
|-----|------|----|------------------------|--------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| | | | \overline{E} | re | RMSE | re | E_{\max} | re |
| | | | ($10^{-5} K s^{-1}$) | (%) | ($10^{-5} K s^{-1}$) | (%) | ($10^{-5} K s^{-1}$) | (%) |
| 16 | (11) | 1 | 0.6076 | 7.3399 | 2.0643 | 29.2277 | 8.5478 | 45.1251 |
| | | 2 | 0.5688 | 9.2638 | 0.9877 | 14.0268 | 3.6823 | 19.3504 |
| | | 3 | 0.0888 | 1.0725 | 0.1988 | 2.8144 | 0.8439 | 4.4548 |
| | | 4 | 0.0341 | 0.5560 | 0.0432 | 0.6133 | 0.1497 | 0.7867 |
| | (12) | 1 | 0.1021 | 1.4091 | 0.0988 | 1.8965 | 0.2855 | 2.0256 |
| | | 2 | 0.0395 | 0.7630 | 0.0505 | 0.9638 | 0.1928 | 1.3708 |
| | | 3 | 0.2795 | 3.8580 | 0.3209 | 6.1613 | 1.4236 | 10.1015 |
| | | 4 | 0.0396 | 0.7643 | 0.0507 | 0.9586 | 0.1933 | 1.3745 |

7 静力方程的积分

7.1 方程的分离

按式 (1), 如 \hat{T} 和其相应的 $\hat{\Phi}$ 满足静力方程,

$$\frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial \sigma} = - \frac{R \hat{T}}{\sigma} \quad (19)$$

则

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{\sigma} \quad (20)$$

这里, $\Phi = \hat{\Phi} + \varphi$, φ 是 Φ 的偏差部分。

7.2 基本位势高度

如 \hat{T} 采用式(2)和式(3), 则 $\hat{\Phi}$ 各是

$$\hat{\Phi} = \Phi - R [B_1 \ln \sigma + B_2 (\sigma - 1) + B_3 (\sigma^2 - 1) + B_4 (\sigma^3 - 1) + B_5 (\sigma^4 - 1)] \quad (21)$$

$$\hat{\Phi} = \begin{cases} \Phi - R [T_s \ln \frac{\sigma}{\sigma_s} + \frac{b_1}{2} (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^2 + \frac{c_1}{3} (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^3 + \hat{c}], & \sigma_s < \sigma < 0 \\ \hat{\Phi} - R [T_s \ln \frac{\sigma}{\sigma_s} + \frac{b_2}{2} (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^2 + \frac{c_2}{3} (\ln \frac{\sigma}{\sigma_s})^3], & 0 < \sigma < \sigma_s \end{cases} \quad (22)$$

其中 $B_1 = T_s - b\sigma_s + c\sigma_s^2 - d\sigma_s^3 + e\sigma_s^4$, $B_2 = b - 2c\sigma_s + 3d\sigma_s^2 - 4e\sigma_s^3$,

$$B_3 = \frac{1}{2}(c - 3d\sigma_s + 6e\sigma_s^2), \quad B_4 = \frac{1}{3}(d - 4e\sigma_s), \quad B_5 = \frac{e}{4}$$

$$\hat{c} = \ln \sigma_s [T_s - \frac{b_1}{2} \ln \sigma_s + \frac{c_1}{3} (\ln \sigma_s)^2], \quad \hat{\Phi} = \Phi - R\hat{c}$$

为了比较, 还取

$$\hat{T} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L T_k \quad (23)$$

这时

$$\hat{\Phi} = \Phi + RT \ln \frac{1}{\sigma} = \Phi + RT \ln \frac{2}{1+s} \quad (24)$$

7.3 位势高度偏差

φ 可以用如下两种方案之一计算。

1. EC78 方案^[3]

2. Tschebyscheff 多项式方案^[4,5]

表 6 位势高度的计算误差(gpm)

| 温度场 | 方案 | \bar{E} | RMSE | E_{\max} |
|------|----|-----------|---------|------------|
| (11) | 1 | 44.5555 | 90.0459 | 371.8574 |
| | 2 | 7.3856 | 14.4831 | 59.0313 |
| | 3 | 0.0235 | 0.0094 | 0.0479 |
| | 4 | 0.0408 | 0.0537 | 0.1416 |
| (12) | 1 | 46.4670 | 94.9048 | 390.2637 |
| | 2 | 5.0524 | 9.3510 | 39.1836 |
| | 3 | 1.7722 | 0.8529 | 4.0631 |
| | 4 | 0.1545 | 0.2517 | 1.0483 |

注: 除表中的 2 外用式(11)时, \hat{T} 取式(3); 用式(12)时, \hat{T} 取式(2)。表中 1, 2, 3, 4 各表示 T 不分离, 用 EC78 方案; \hat{T} 取式(23), φ 用 EC78; T 分离, φ 用 EC78; T 分离, φ 用 Tschebyscheff 方案。

利用式(2), (3), (11)–(13), (21)–(24)和(12)的 φ 的“标准解”等, 以及上面两个方案, 可以得到表6。表中显示: 把 T 分离后的结果显著好于不分离的结果, 即使仍用EC78方案也是如此; 而且, 取 \hat{T} 为常数(即式(23)), 计算误差也显著比 T 不分离直接用EC78的小。

8 初步结论

根据前面的计算结果, 可以得到如下初步结论:

1. 对温度有关量的垂直离散, 应区分温度廓线光滑和不光滑两种情况, 分别采取不同措施。
2. 在温度垂直廓线不太光滑时, 用能表示不光滑部分的基本场分离, 再计算 T 的有关量, 可以起到显著的改进作用。
3. 在温度垂直廓线较光滑时, 可以直接用差分或 T schebyscheff多项式等计算, 其中又以后者的结果为好。

参考文献

- [1] 廖洞贤, 朱艳秋. 论大气模式的垂直离散()——存在问题、资料处理、坐标和基函数的选择. 气象学报, 1996, 54(5): 513—520.
- [2] 廖洞贤, 朱艳秋. 论大气模式的垂直离散()——垂直离散. 气象学报, 1996, 54(6): 641—650.
- [3] Beade A P M, et al. Adiabatic formulation and organization of ECMWF's spectral model. Tech Report, 15, 1978, ECMWF.
- [4] Zhu Yangqiu, You Xingtian and Liao Dongxian. Problems existing in the vertical discretization of the hydrostatic equation and improvement tests. Acta Meteor Sinica, 1994, 8(4): 383–391.
- [5] 廖洞贤, 朱艳秋. Tschebyscheff函数在大气模式垂直离散问题中的应用. 应用气象学报, 1995, 6(2): 213–219.

A COMPARATIVE STUDY OF THE VERTICAL DISCRETIZATION OF ATMOSPHERIC MODELS

Liao Dongxian Hu Ming

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044*)

Abstract

Discussions are made on the vertical discretization of those quantities related to the temperature. Analyses show that the computation of those quantities should be carried out by different methods for different cases. In the smooth vertical temperature profile case, usual methods, such as finite difference, Tschebyscheff polynomial and so on, may be used. In the unsmoothed vertical temperature profile case, however, it is better to separate the temperature into the basic temperature \hat{T} and the departure temperature T' , such that \hat{T} can approximate the unsmoothed part of the profile and T' becomes smooth, and then better results can be obtained by usual methods.

Computational examples based on ideal fields indicate that the results obtained by the above technique are, to a great extent, better than those directly obtained by usual methods, especially in computation of geopotential and vertical temperature advection in the unsmoothed vertical temperature profile case.

Key words: Vertical discretization, Discontinuity, Tschebyscheff polynomial.