

分块地形坐标大气环流模式的动力框架 及其整体性质

梁丹青¹ 张 铭² 曾庆存³

1 空军装备研究院航空气象研究所, 北京 100085

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 介绍了分块地形坐标大气环流模式的动力框架及该框架微、差分方程组的整体性质。目前该框架水平分辨率为 $4^\circ \times 5^\circ$, 垂直分辨率有 9 层和 21 层两个版本。给出了该框架的控制方程组及其差分形式、边界条件、时间积分方案等。该框架的微、差分控制方程组均满足总质量守恒、平流项二次守恒、科里奥利力不作功和总有效能量守恒; 且未引入虚假的源和汇, 保持了该框架计算过程中的物理真实性。该模式框架在主流微机上能长时间稳定积分, 并可作有关地形的数值试验。

关键词 大气环流模式 分块地形坐标 动力框架 整体性质

文章编号 1006-9895(2005)02-0301-06

中图分类号 P435

文献标识码 A

A Dynamic Framework of the Atmospheric General Circulation Model and Its General Property in the Partition Terrain Coordinate

LIANG Dan-Qing¹, ZHANG Ming², and ZENG Qing-Cun³

1 Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085

2 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A new dynamic framework of the Atmospheric General Circulation Model (AGCM) and its general property is introduced to avoid the disadvantage of σ coordinate. The framework adopts nonequidistant partition terrain coordinate in the vertical direction. The horizontal mesh is 4 degrees longitude and 5 degrees latitude, and there are 9 or 21 levels in the vertical in the framework. The control equations, the difference expressions, the boundary condition and the time integral scheme etc. are also given. In the dynamic framework, the differential and difference equations satisfy the total mass conservation, the quadratic conservation of advection term, the conservation of total effective energy. The Coriolis force does not work and the false source is not introduced. The framework keeps physical facticity in computation and can be run stably for a long time in the current personal computer. The numerical experiments on terrain can be carried out using the framework.

Key words AGCM, partition terrain coordinate, dynamic framework, general property

1 引言

目前, 大多数全球大气环流模式均选用 σ 坐标来

考虑地形, 但是, 当有陡峭地形存在时, 倾斜的 σ 坐标面不可避免的带来计算误差^{①[1]}, 这不仅给气压梯度力的差分计算带来截断误差, 且因计算中为抑制虚假

收稿日期 2003-08-04 收到, 2004-01-13 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点资助项目 40233027 和国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900

作者简介 梁丹青, 女, 1978 年出生, 硕士学历, 助理, 目前主要从事气候学研究。E-mail: jianlin_yao@163.com

① 曾庆存等, 跨季度数值气候预测, 2002 手稿, 即将由气象出版社出版)

的重力波,增加场的光滑性,保证模式能稳定运转,在时间积分过程中常需进行平滑等处理技巧,而这些处理都很难顾及到坐标面倾斜的影响。为适用于复杂陡峭地形,本文介绍了我们设计的一个分块地形 η 坐标大气环流模式的动力框架^①。该坐标把地形表示为三维阶梯状,在自由大气内部形成了地形侧边界。其保留了 σ 坐标具有的简单下边界条件的优点,而避免了在陡峭地形情况下 σ 等值面过于倾斜的缺点。

另外,考虑到 η 坐标和 σ 坐标关系密切,中国科学院大气所的大气环流模式 IAP 2.0 (IAP9L AGCM) 的动力框架可保证完全能量守恒,有良好的稳定性和精度,而能量守恒在大气运动方程组的整体性质中是极其重要的,同时,其动力框架引入了“标准层结扣除”思想,将热力学变量(温度、位势高度和地面气压)相对标准态的偏差作为预报量,这样可以很自然地定义模式的有效位能和有效表面位能,也有助于减少模式的计算误差。静力扣除对减小地形坡度带来的计算误差也非常有效,故本文模式框架将在 IAP 2.0 框架的基础上进行设计。

模式设计好后,鉴别其是否合理的一个方法是看它是否符合原来的完全方程组所表达的物理规律。但因模式方程组经过了简化,引入了许多近似和“可容许的替代”,要其完全符合所有的物理规律几乎不可能,故只能要求模式方程组能表达某些重要的物理原理和定律。这样就必须检验这些近似和替代是否合理和协调,对整体大气来说,重要的物理量应没有虚假的生死,离散化后模式的整体性质也应予以保证。本文论证了该动力框架微、差分方程组的整体性质。研制该框架的目的则是为研制分块地形坐标下的大气环流模式做准备。

2 动力框架的控制方程组

垂直方向采用曾庆存的分块地形 η 坐标^①,取

$$\eta = \frac{\alpha(\tilde{p}_{si} - p_t)}{p_0 - p_t}, \quad (1)$$

定义 $\sigma \equiv (p - p_t) / (p_s - p_t)$, 其中 p_s 是地表处的大气压, p_t 为模式大气顶气压, p_0 为海平面上标准气压, $\tilde{p}_{si}$ 为分块地表上平均标准气压(气候值)。显然,因 $\tilde{p}_{si} / p_s \approx 1$, $\eta \approx (p - p_t) / (p_0 - p_t)$, 由于 p_t 和 p_0 为给定的常数,可知等 η 面接近等压面。注意(1)式括号中的量在每一分块地形上为常数。因有 $p_s = \tilde{p}_{si} + p'_{sa}$, 这里 p'_{sa} 是 p_s 相对 $\tilde{p}_{si}$ 的偏差,故 $|p'_{sa} / \tilde{p}_{si}| \ll 1$, 这样有^①

$$\ln p_s = \ln \tilde{p}_{si} + \ln \left(1 + \frac{p'_{sa}}{\tilde{p}_{si}} \right) = \ln \tilde{p}_{si} + \frac{p'_{sa}}{\tilde{p}_{si}} + O(10^{-3}). \quad (2)$$

这样气压梯度力就可在很高的精度上用下式来近似:

$$G_p = -\nabla \phi' - SRT' \nabla \ln p_{es} = -\nabla \phi' - SRT' \nabla \left(\frac{p'_{sa}}{\tilde{p}_{si} - p_t} \right). \quad (3)$$

与 IAP 2.0 大气环流模式动力框架的基本方程组相同,该框架也采用标准层结扣除和 IAP 替换^{2,3]},记

$$\begin{cases} \pi_s(\theta, \lambda, T) \equiv \frac{p_s - p_t}{\tilde{p}_{si} - p_t}, \\ \pi'_s(\theta, \lambda, T) \equiv \frac{p'_{sa}}{\tilde{p}_{si} - p_t}, \end{cases} \quad (4)$$

引入新的变量组合:

$$\begin{cases} P(\theta, \lambda, T) \equiv \sqrt{\pi_s}, \\ V \equiv P v, \\ U \equiv P u, \\ W \equiv P \dot{\eta}, \\ \Phi = \frac{1}{C_0} PRT', \end{cases} \quad (5)$$

则可导出该模式干动力框架的基本方程组:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \sum_{m=1}^3 L_m(V) - P^{(1)}_{\theta} - P^{(2)}_{\theta} + f^* U + PF_{\theta}, \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \sum_{m=1}^3 L_m(U) - P^{(1)}_{\lambda} - P^{(2)}_{\lambda} - f^* V + PF_{\lambda}, \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \sum_{m=1}^3 L_m(\Phi) + \frac{S}{P} (C_0 P + \delta \kappa \Phi) \Omega^{(1)} + \Omega_{\theta}^{(2)} + \Omega_{\lambda}^{(2)} + \frac{RP}{C_0} F_T + \frac{\kappa P}{C_0} \dot{H}, \quad (6-3)$$

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} = -D(p) - \frac{\partial PW}{\partial \eta}, \quad (6-4)$$

$$p = \eta P^2 (p_0 - p_t) + p_t. \quad (6-5)$$

其中 $d/dt \equiv \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla + \eta \partial/\partial \eta$, $\dot{\eta} \equiv d\eta/dt$, $S = (p - p_t)/p$, α 其值等于 0 或 1 为示踪系数, $\delta = 0$ 的情况即取标准层结扣除, 平流运算符为

$$\begin{cases} L_1(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left(2 \frac{\partial Fu}{\partial \lambda} - F \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right), \\ L_2(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left(2 \frac{\partial Fv \sin \theta}{\partial \theta} - F \frac{\partial v \sin \theta}{\partial \theta} \right), \\ L_3(F) \equiv \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial F\dot{\eta}}{\partial \eta} - F \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial \eta} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

① 曾庆存等, 跨季度数值气候预测, 2002 手稿, 即将由气象出版社出版)

气压梯度力项为

$$P_{\theta}^{(1)} \equiv P \frac{\partial \phi'}{a \partial \theta}, \tag{8-1}$$

$$P_{\lambda}^{(1)} \equiv P \frac{\partial \phi'}{a \sin \theta \partial \lambda}, \tag{8-2}$$

$$P_{\theta}^{(2)} \equiv SC_0 \Phi \frac{\partial \pi'_s}{a \partial \theta}, \tag{8-3}$$

$$P_{\lambda}^{(2)} \equiv SC_0 \Phi \frac{\partial \pi'_s}{a \sin \theta \partial \lambda}, \tag{8-4}$$

此外,有

$$\Omega^{(1)} \equiv \frac{W}{\eta} + 2 \frac{\partial P}{\partial t}, \tag{9-1}$$

$$\Omega_{\theta}^{(2)} \equiv V \frac{\partial \pi'_s}{a \partial \theta}, \tag{9-2}$$

$$\Omega_{\lambda}^{(2)} \equiv U \frac{\partial \pi'_s}{a \sin \theta \partial \lambda}, \tag{9-3}$$

$$D(F) = \frac{1}{a \sin \theta} \left(\frac{\partial F V \sin \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial F U}{\partial \lambda} \right). \tag{9-4}$$

这里特别要注意的是 (6-1) (6-2) 和 (6-3) 式的推导都要用到 (2) 式近似,这对构造总有效能量守恒的微、差分形式是非常关键的。

铅直方向上运动学边界条件可写为

$$W|_{\eta=0,\eta_s} = 0, \tag{10}$$

地表位势高度偏差满足的几何边界条件为

$$\phi'|_{\eta=\eta_s} = RT_s \frac{p'_{sa}}{p_{si}}, \tag{11}$$

其中, $\tilde{T}_s \equiv \tilde{T}(p_{si})$, 地形侧边界条件取为绝热刚壁条件

$$\begin{cases} \frac{\partial T'}{\partial n} = 0, \\ \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0, \end{cases} \tag{12}$$

其中, $\mathbf{n}$ 为地形侧壁的外法向微商。

3 空间差分方案

分块地形 η 坐标系的模式为包括对流层和平流层低层的大气环流模式,受计算条件的限制,模式层顶目前暂取 10 hPa。为了更细致地描写上、下边界层的大气运动,模式在垂直方向上采用不等距 η 坐标分层 ($0 \leq \eta \leq 1$),垂直方向变量分布采用 Lorenz 状的结构,所有预报量诸如 U, V, Φ 和 Q 均放在整数层上,而诊断量 W 和 ϕ' 等放在半数层 (即界面层) 上,该模式的 9 层版本各 η 层值如图 1 所示,除 9 层模式外,还完成了 21 层的版本。模式水平方向则采用均匀经纬度网格,水平格距为经向 $\Delta \theta = 4^\circ$,纬向 $\Delta \lambda = 5^\circ$,这样全球范围 ($0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \lambda \leq 2\pi$) 被划分成 $I_X \times J_Y$ 个网格点,

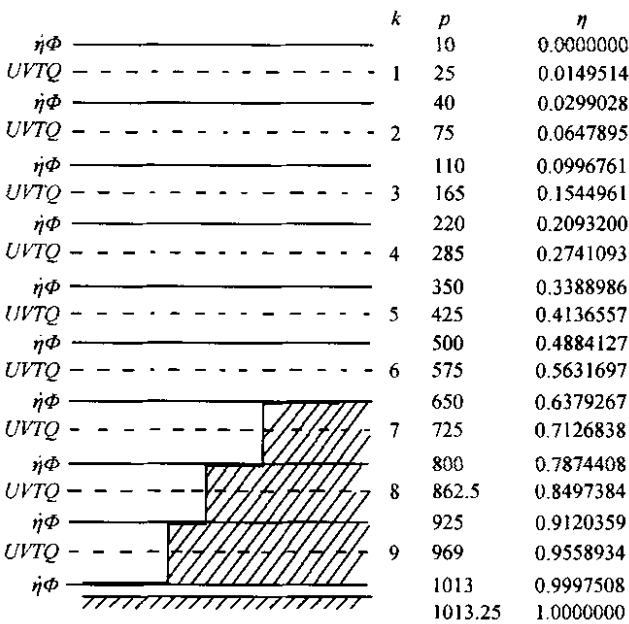


图 1 模式垂直变量配置 (虚线为整层 实线为半层)

Fig.1 Vertical grid and variable placement (dashed lines are full levels, solid lines are half levels)

$I_X = 2\pi/\Delta \lambda, J_Y = \pi/\Delta \theta$,水平变量配置采用 Arakawa-C 网格,这与原 IAP2.0 相同。

在东西方向上采用周期性边界条件,在两极因矢量分量具有不确定性,此时边界条件可取为

$$U|_{j=1,J} = u|_{j=1,J} = 0. \tag{13}$$

对位于非地形侧边界处 (自由大气中) 的格点,可引入与文献 [4] 中相同的差分算子和平均算子,其形式限于篇幅这里不再赘述。

4 地形侧边界处的差分格式和时间积分方案等

由于分块地形 η 坐标的特殊性,位于地形侧边界处的格点其某些项的差分格式无法根据文献 [4] 中的方法给出。为此该模式将地形侧边界在水平方向放在 U, V 所在的格点上,因有刚壁侧边界条件,这样 U, V 总有一个为零,这就简化了侧边界处水平运动方程的差分形式,对模式编程也很有利。因这样处理后,地形侧边界处模式方程组网格点上的差分形式与自由大气中的有联系,并有规律可循,故可对每一个 U, V 分别设置指示参数,其值取为 1 或 0。当变量 U, V 位于地形内或地形边界上时,指示参数取为 0,相反在自由大气中则取为 1,对 Φ 也可参照处理,但与 U, V 不同的是,因 Φ 位于网格整点上,所以其不可能位于地形侧边界上,于是当 Φ 在地形内部时,指示参数取值为 0,相反在自由大气中时则仍取值为 1。在设计模式时,

可将物理量 U, V, Φ 分别乘以各自的指示参数, 这样就可使用统一的差分形式而方便编程。

该模式的时间积分采用曾庆存提出的非线性迭代方案。该方案首先进行时间向前积分, 然后再交替进行向后积分(相当于一个欧拉后差格式)和半步中央差积分, 一直迭代到所需的精度为止。具体实施方案可参见文献[5], 这里不再赘述。该时间积分方案是条件稳定的。从积分效果和节省机时综合考虑, 在此迭代次数选为 3 次, 而时间积分步长则取 $\Delta t = 12 \text{ min}$ 。

为避免因纬向向极辐合而须采用较小时时间积分步长的限制, 每个预报量的时间倾向在每一步向前积分前都要用经向平滑算子进行处理。此外, 均匀经纬网格在极区的计算稳定性条件要求滤去高纬度沿纬圈的短波, 为减少混淆误差, 中、低纬度的两倍格距波也应被滤除。该模式在自由大气中所用的平滑和滤波方案与 IAP2.0 中的相同, 这里不再赘述(具体可参见文献[2]), 但在地形侧边界处, 就需特殊处理, 最简单的办法就是平滑和滤波时跳过侧边界上及侧边界外三圈的变量, 该模式目前采用此方法, 总体效果不错。

5 微分形式模式大气的守恒性

从模式动力框架的微分方程组中略去源、汇及耗散项, 则可推出自由大气方程组具有的下列大气运动的整体性质^①。

(1) 总质量守恒

与一般的能量微分形式不同, 这里因存在地形侧边界, 故不宜对全球面直接积分, 而应按地形的分块情况先对某一块地球面上的大气作体积分, 再对分块的球面求和。由于地形侧边界有刚壁条件, 这样就能保持总质量的守恒。具体的证明方法在注意到上述求和特点后, 与文献[4]中类似, 不再赘述。这样有

$$\sum_i \iint_{S_i}^0 D(P) d\eta dS = 0, \quad (14-1)$$

或

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_i \iint_{S_i} \pi_s dS = 0, \quad (14-2)$$

其中积分号下的 S_i 表示与第 i 块分块球面, 因考虑了地形, 不同分块球面对应的 η_s 的值也不同, 故(14-1)式中的 η_s 应理解为 η_{s_i} (下同)。

(2) 平流项二次守恒

$$\sum_i \iint_{S_i}^0 FL_m(F) d\eta dS = 0,$$

$$(F = U, V, \Phi; m = 1, 2, 3). \quad (15)$$

(3) 能量守恒关系

表面位能产生的关系式为

$$\sum_i \iint_{S_i}^0 [-UP_{\lambda}^{(1)} - VP_{\theta}^{(1)} + S\Phi C_0 \Omega^{(1)}] dS d\eta = -\frac{\partial}{\partial t} \sum_i \iint_{S_i} \frac{RT_s}{P_{si}} (\tilde{p}_{si} - p_i) \frac{1}{2} (\pi'_s)^2 dS, \quad (16)$$

部分动能和有效位能转换项满足

$$\begin{cases} \sum_i \iint_{S_i} [-UP_{\lambda}^{(2)} + S\Phi C_0 \Omega_{\lambda}^{(2)}] dS = 0 \\ \sum_i \iint_{S_i} [-VP_{\theta}^{(2)} + S\Phi C_0 \Omega_{\theta}^{(2)}] dS = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \sum_i \iint_{S_i}^0 \left[\frac{1}{2} (U^2 + V^2 + \Phi^2) d\eta + \right. \\ & \left. \frac{RT_s}{P_{si}} (\tilde{p}_{si} - p_i) \frac{1}{2} (\pi'_s)^2 \right] dS = \\ & \delta \sum_i \iint_{S_i}^0 \frac{\kappa S \Phi^2}{P} (\Omega^{(1)} + \Omega_{\theta}^{(2)} + \Omega_{\lambda}^{(2)}) d\eta dS. \quad (18) \end{aligned}$$

特别应指出的是, 方程(18)的右端项在标准层结近似下($\delta = 0$)会消失。这样一来, 就有总有效能量守恒。对大尺度运动而言, 这条性质比总能量守恒更有效、更有意义。上述性质还表明, 微分形式的模式方程中没有引入任何虚假的源和汇。

6 差分形式模式大气的守恒性

在此可定义两组差分和平均算子, 其具体表达式及其性质可参见文献[4], 这里不再赘述。下面确定分块地形球面网格系统对全球大气求和的形式。对某一三维变量 F , 可用

$$\sum_{s=1}^N \sum_{k=1}^{k_s} \left(\sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} \pi_s F \right) a^2 \sin \theta_j \Delta \lambda \Delta \theta \Delta \eta \quad (19)$$

来表示其对整个大气质量的离散形式求和, 即全球地表按地形分为 N 块, 在每一块地表上是从模式层顶($k = 1$)到该块上($k = k_s$)的离散量求和, 不同高度的地表对应的 k_s 不同。与常用的直接对全球面求和形式相比, 上式避免了因有山体阻挡而要分不同情况来讨论离散量差分和平均算子性质的麻烦。

针对模式采用的变量交错分布的 C 网格, 利用上述差分和平均算子的性质, 在考虑边界条件后, 不难证明模式差分方程组具有以下的守恒性(其具体证明方

① 曾庆存等: 跨季度数值气候预测, 2002 手稿, 即将由气象出版社出版。

法与 σ 坐标的模式 IAP 2.0 大体相同,只是要注意,此时对全球大气求和可转化为先对每一分块地形求和然后再将所有地形分块求和,本文限于篇幅,具体证明过程从略。

(1) 总质量守恒

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{s=1}^N \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [\pi_s \mathbf{1}_{i,j,k} a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda] = 0, \quad (20)$$

其中,

$$\epsilon_j = \begin{cases} \sin \theta_j, & j \in [2, J-1], \\ \frac{1}{4} \sin \frac{\Delta \theta}{2}, & j = 1, J. \end{cases} \quad (21)$$

(2) 平流项二次守恒

$$\sum_{i=i_s}^{i_s^*} [F \cdot L_1(F)]_i \cdot a \Delta \lambda = 0, \quad (22-1)$$

$$\sum_{j=j_s}^{j_s^*} [F \cdot L_2(F)]_j \cdot a \Delta \theta = 0, \quad (22-2)$$

$$\sum_{k=1}^{k_s} [F \cdot L_3(F)]_k \cdot \Delta \eta = 0, \quad (22-3)$$

其中, i', j' 的取值则由相应变量 $F = (\Phi, U, V)$ 来决定,这说明水平平流和垂直输送项不改变总动能和总有效位能。

(3) 科里奥利力做功为零

$$\begin{aligned} & \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [(f^* V) \cdot U]_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda - \\ & \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [(f^* U) \cdot V]_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot a^2 \epsilon_{j+\frac{1}{2}} \Delta \theta \Delta \lambda = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

(4) 能量守恒关系

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{k_s} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [U \cdot P_\lambda^{(1)}]_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda \Delta \eta + \\ & \sum_{k=1}^{k_s} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [V \cdot P_\theta^{(1)}]_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot a^2 \epsilon_{j+\frac{1}{2}} \Delta \theta \Delta \lambda \Delta \eta - \\ & \sum_{k=1}^{k_s} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [\Phi \cdot C_0 S \Omega^{(1)}]_{i,j,k} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda \Delta \eta = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \sum_{j=j_s}^{j_s^*} \left[\frac{RT_s}{p_{si}} (\tilde{p}_{si} - p_t) \cdot \frac{1}{2} (\pi'_s) \right]_{i,j} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda, \end{aligned} \quad (24)$$

上式说明位势高度梯度引起的总动能变化与 $\Omega^{(1)}$ 引起总有效位能变化之和等于总有效表面位能的变化。还可证明

$$\begin{aligned} & \sum_{i=i_s}^{i_s^*} [U \cdot P_\lambda^{(2)}]_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot a \epsilon_j \Delta \lambda - \\ & \sum_{i=i_s}^{i_s^*} [\Phi \cdot C_0 S \Omega_\lambda^{(2)}]_{i,j,k} \cdot a \epsilon_j \Delta \lambda = 0, \end{aligned} \quad (25-1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [V \cdot P_\theta^{(2)}]_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot a \epsilon_{j+\frac{1}{2}} \Delta \theta - \\ & \sum_{j=j_s}^{j_s^*} [\Phi \cdot C_0 S \Omega_\theta^{(2)}]_{i,j,k} \cdot a \epsilon_j \Delta \theta = 0, \end{aligned} \quad (25-2)$$

即地面气压梯度引起的动能变化等于 $\Omega^{(2)}$ 引起的有效位能的变化。

(5) 总有效能量守恒

由以上能量转化关系式可得,在标准层结近似下(即取 $\delta = 0$ 时),离散形式的总有效能量守恒形式为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \sum_{s=1}^N \sum_{k=1}^{k_s} \left[\sum_{j=j_s}^{j_s^*} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \left(\frac{1}{2} U^2 \right)_{i-\frac{1}{2},j,k} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda + \right. \right. \\ & \sum_{j=j_s}^{j_s^*} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \left(\frac{1}{2} V^2 \right)_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot a^2 \epsilon_{j+\frac{1}{2}} \Delta \theta \Delta \lambda + \\ & \left. \sum_{j=j_s}^{j_s^*} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \left(\frac{1}{2} \Phi^2 \right)_{i,j,k} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda \right] \Delta \eta + \\ & \left. \sum_{j=j_s}^{j_s^*} \sum_{i=i_s}^{i_s^*} \left[\frac{RT_s}{p_{si}} \frac{1}{2} (\pi'_s) (\tilde{p}_{si} - p_t) \right]_{i,j} \cdot a^2 \epsilon_j \Delta \theta \Delta \lambda \right\} = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

综上所述,该差分计算方案精确保持了微分方程组的能量转换关系,保持了计算过程中的物理协调性。

7 结语

本文介绍了我们设计的分块地形 η 坐标大气环流模式的动力框架,该框架目前有 9 层和 21 层两个版本,水平分辨率目前因计算条件所限仍取经向 4° 、纬向 5° ,但提高其分辨率并无原则困难。文中给出了该框架的控制方程组及其差分形式、边界条件、时间积分方案等。该模式动力框架的微、差分方程组继承了 IAP 2.0 模式具有的以下宝贵性质:总质量守恒、科里奥利力不做功、平流项二次守恒和总有效能量守恒,且未引入虚假的源和汇,保持了计算过程中的物理真实性。该模式框架在主流微机上可长时间稳定积分,并可作有关地形影响的数值试验,这些试验的结果表明,该分块地形坐标大气环流模式的动力框架确有其优越性。有关这些试验的结果我们将另文给出。最后要说

明的是,该模式框架还可作进一步的优化,有关这方面的工作目前仍在继续进行中。

参考文献

- [1] Mesinger F, Janjic Z I. Problems and numerical methods of incorporation of mountains in atmospheric models. *Lectures in Applied Mathematics*, 1985, **22**: 81 ~ 118
- [2] 毕训强. IAP 九层大气环流模式及气候数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1993
- Bi Xunqiang. IAP 9L AGCM and climate simulation. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993, 210 pp
- [3] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础, 第一卷. 北京: 科学出版社. 1979, 22 ~ 25

Zeng Qinqun. *The Physical-Mathematical Basis of Numerical Weather Prediction* (in Chinese), Vol. 1. Beijing: Science Press. 1979, 22 ~ 25

- [4] 曾庆存, 张学洪. 球面斜压原始方程的有效能量守恒方案. 大气科学, 1987, **11**(27): 121 ~ 142

Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. Available energy conserving schemes for spherical baroclinic primitive equations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1987, **11**(27): 121 ~ 142

- [5] 左瑞亭, 张铭, 张东凌, 等. 大气环流模式 IAP AGCM-III 动力框架的设计和检验. 见: 曾庆存, 丑纪范等编. 气候系统的动力理论、模型和预测研究. 2003 北京: 气象出版社, 2003. 37 ~ 49

Zuo Ruiting, Zhang Ming, Zhang Dongling, et al. The design and examination of IAP AGCM-III dynamic framework. *Dynamic Theories, Model and Prediction of Climate System* (in Chinese), Zeng Qingcun, Chou Jifan et al., Eds. Beijing: China Meteorological Press. 2003, 37 ~ 49