

# IAP九层大气环流模式

张 铭 左瑞亭 曾庆存 著



气象出版社

# IAP九层大气环流模式

曹 磊 王 强 王 强 王 强 王 强



科学出版社

# IAP 九层大气环流模式

张 铭 左瑞亭 曾庆存 著

气象出版社

## 内容简介

IAP 九层大气环流模式是中科院大气物理研究所第二代格点大气环流模式,其水平分辨率为  $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 。利用该模式可进行气候异常、低频振荡、ENSO、季风和古气候的研究,也可用于研究温室气体对气候的影响和臭氧的变化。因该模式计算量适中,可在微机上运行,故该模式现今仍有很高的应用价值,可广泛应用于科研、教学,也可运用于气候预测业务。为此我们撰写了本书,以使用户能更好利用此模式。本书总共分十章,书中全面详细地介绍了该模式的动力框架、各物理过程、该模式源程序的各模块说明、该模式的操作维护等,本书还附以丰富的参考文献。对该模式的透彻了解,还便于掌握和运行我们新一代  $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$  的 21 层大气环流模式。本书可供从事气候数值模式设计和气候数值模拟及预测的有关教学、科研人员阅读,也可用作气象、海洋专业数值预报课程的教学参考书和研究生教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

IAP 九层大气环流模式/张铭,左瑞亭,曾庆存著.

—北京:气象出版社,2007.12

ISBN 978-7-5029-4438-4

I. I… II. ①张…②左…③曾… III. 大气环流模式  
IV. P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 201462 号

出版者:气象出版社

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail:qxchs@263.net

责任编辑:俞卫平

封面设计:王 伟

印刷者:北京中新伟业印刷有限公司

发行者:气象出版社

开 本:787×1092 1/16 印 张:15.25 字 数:380 千字

版 次:2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

地 址:北京海淀区中关村南大街 46 号

邮 编:100081

电 话:总编室:010-68407112 发行部:010-68409198

终 审:黄润恒

责任技编:都 平

## 目 录

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 第 1 章 绪论 .....                       | (1)  |
| 第 2 章 模式动力框架 .....                   | (3)  |
| 2.1 动力方程组的变形 .....                   | (3)  |
| 2.1.1 标准层结扣除 .....                   | (3)  |
| 2.1.2 坐标变换与变量替代 .....                | (6)  |
| 2.1.3 绝热无耗散大气的整体性质 .....             | (7)  |
| 2.2 空间差分方案 .....                     | (8)  |
| 2.2.1 三维空间变量分布 .....                 | (8)  |
| 2.2.2 有限差分算子和平均算子 .....              | (9)  |
| 2.2.3 方程组中各项的差分形式 .....              | (10) |
| 2.2.4 差分形式的模式干动力框架及其守恒律 .....        | (12) |
| 2.3 水汽方程的变形及数值差分 .....               | (13) |
| 2.4 时间积分方案 .....                     | (14) |
| 2.5 平滑与滤波 .....                      | (15) |
| 2.5.1 纬向滤波器 .....                    | (15) |
| 2.5.2 平滑滤波 .....                     | (16) |
| 2.6 用 R-H 波检验 IAP9L AGCM 干动力框架 ..... | (18) |
| 2.7 模式动力框架的特色 .....                  | (18) |
| 第 3 章 模式边界条件及物理过程简介 .....            | (19) |
| 3.1 地表边界条件 .....                     | (19) |
| 3.1.1 海陆轮廓、地形高度和次网格地形偏差 .....        | (19) |
| 3.1.2 土壤与地表要素的设置方案 .....             | (20) |
| 3.1.3 海温及海冰的设置 .....                 | (23) |
| 3.1.4 地表粗糙度的设置 .....                 | (23) |
| 3.1.5 地表发射率及反照率的设置 .....             | (24) |
| 3.2 模式物理过程简介 .....                   | (25) |
| 3.2.1 长波辐射的吸收 .....                  | (25) |
| 3.2.2 太阳辐射的吸收 .....                  | (25) |
| 3.2.3 吸收函数 .....                     | (25) |
| 3.2.4 地表反照率的计算 .....                 | (26) |
| 3.2.5 黑体辐射 .....                     | (26) |

|            |                               |             |
|------------|-------------------------------|-------------|
| 3.2.6      | 对流过程 .....                    | (27)        |
| 3.2.7      | 干对流调整 .....                   | (27)        |
| 3.2.8      | 湿对流调整 .....                   | (27)        |
| 3.2.9      | 浅对流过程 .....                   | (27)        |
| 3.2.10     | 深积云对流 .....                   | (27)        |
| 3.2.11     | 大尺度蒸发、凝结调整与降水 .....           | (28)        |
| 3.2.12     | 云的参数化 .....                   | (28)        |
| 3.2.13     | 水平扩散方案 .....                  | (29)        |
| 3.2.14     | 涡旋扩散方案 .....                  | (29)        |
| 3.2.15     | 地形重力小拖曳 .....                 | (29)        |
| 3.2.16     | 地面温度的预报 .....                 | (29)        |
| 3.2.17     | 土壤体积含水量 .....                 | (30)        |
| 3.2.18     | 裸土最大蒸 .....                   | (30)        |
| 3.2.19     | 植被根区层总蒸腾量和植被冠层拦截降水的蒸发量 .....  | (30)        |
| 3.2.20     | 陆地表面感热加热通量和地表位温 .....         | (30)        |
| 3.2.21     | 地表总体湍流输送系数 .....              | (30)        |
| 3.2.22     | 近地面气层温度和水汽的计算 .....           | (31)        |
| 3.2.23     | 近地面风的计算 .....                 | (31)        |
| 3.2.24     | 雪量预报 .....                    | (31)        |
| <b>第4章</b> | <b>模式边界层物理过程和水平扩散方案 .....</b> | <b>(32)</b> |
| 4.1        | 边界层物理过程 .....                 | (32)        |
| 4.1.1      | 垂直涡旋扩散方案 .....                | (32)        |
| 4.1.2      | Brunt-Vaisala 频率的计算 .....     | (34)        |
| 4.1.3      | 地形重力波拖曳的参数化方案 .....           | (35)        |
| 4.1.4      | 浅积云对流过程 .....                 | (37)        |
| 4.1.5      | 近地面气温和水汽的计算 .....             | (40)        |
| 4.2        | 陆面和水面过程 .....                 | (41)        |
| 4.2.1      | 地表总体湍流输送系数及稳定度参数的计算 .....     | (41)        |
| 4.2.2      | 雪量的预报 .....                   | (42)        |
| 4.2.3      | 地面温度的预报 .....                 | (43)        |
| 4.2.4      | 近地面层风的计算 .....                | (43)        |
| 4.2.5      | 纯水面过程的参数化 .....               | (43)        |
| 4.2.6      | 永久性海冰和陆冰面过程的参数化 .....         | (45)        |
| 4.2.7      | 陆面过程的参数化 .....                | (45)        |
| 4.3        | 水平扩散方案 .....                  | (51)        |
| 4.3.1      | 扩散方程 .....                    | (51)        |
| 4.3.2      | 具体离散化方案 .....                 | (52)        |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 第 5 章 模式中的云和辐射过程 .....              | (54)  |
| 5.1 云的参数化 .....                     | (54)  |
| 5.1.1 模式中云的分类 .....                 | (54)  |
| 5.1.2 云量的预报 .....                   | (54)  |
| 5.1.3 云的发射率的计算 .....                | (56)  |
| 5.2 红外辐射的计算方案 .....                 | (57)  |
| 5.2.1 红外辐射中气体吸收率及发射率的计算 .....       | (57)  |
| 5.2.2 晴空大气的红外辐射通量 .....             | (66)  |
| 5.2.3 有云大气的红外辐射通量 .....             | (68)  |
| 5.2.4 大气中各种红外辐射通量 .....             | (68)  |
| 5.3 太阳辐射参数化 .....                   | (69)  |
| 5.3.1 晴空大气太阳辐射 .....                | (69)  |
| 5.3.2 有云天空太阳辐射的计算 .....             | (71)  |
| 5.4 模式中的辐射加热计算 .....                | (74)  |
| 第 6 章 模式中的对流调整过程 .....              | (76)  |
| 6.1 干绝热对流调整过程 .....                 | (76)  |
| 6.1.1 干绝热对流调整条件 .....               | (76)  |
| 6.1.2 干绝热对流调整 .....                 | (76)  |
| 6.1.3 模式中干绝热对流调整的实施方案 .....         | (77)  |
| 6.2 湿绝热对流调整过程 .....                 | (77)  |
| 6.2.1 湿绝热不稳定条件 .....                | (77)  |
| 6.2.2 湿绝热对流调整 .....                 | (72)  |
| 第 7 章 大尺度蒸发凝结和积云对流参数化过程 .....       | (79)  |
| 7.1 大尺度蒸发、凝结调整 .....                | (79)  |
| 7.1.1 模式中部分热力学变量的计算方案 .....         | (79)  |
| 7.1.2 大尺度蒸发调整 .....                 | (80)  |
| 7.1.3 大尺度凝结调整 .....                 | (81)  |
| 7.2 积云对流参数化 .....                   | (82)  |
| 7.2.1 冷云中过饱和水汽的凝华 .....             | (82)  |
| 7.2.2 积云对流参数化实施的条件 .....            | (83)  |
| 7.2.3 次云团的计算方案 .....                | (83)  |
| 7.2.4 积云对大尺度场的反馈作用 .....            | (89)  |
| 7.2.5 积云动量再分配 .....                 | (90)  |
| 第 8 章 数学公式中的变量列表 .....              | (91)  |
| 第 9 章 模式子程序算法和源代码说明 .....           | (108) |
| 9.1 模式子程序算法 .....                   | (108) |
| 9.2 FORTRAN 源代码公用区“COMMON”块变量 ..... | (168) |

|                                        |              |
|----------------------------------------|--------------|
| 9.3 模式源代码变量说明 .....                    | (178)        |
| <b>第 10 章 模式的操作运行 .....</b>            | <b>(221)</b> |
| 10.1 模式的编译及运行环境 .....                  | (221)        |
| 10.2 模式运行的初始准备 .....                   | (222)        |
| 10.2.1 模式运行控制文件 JOB. AGCM .....        | (222)        |
| 10.2.2 模式初始资料文件 OTP. AGCM 和续启动功能 ..... | (224)        |
| 10.2.3 下边界资料文件 SBC. AGCM .....         | (225)        |
| 10.2.4 臭氧资料文件 GAS. AGCM .....          | (226)        |
| 10.3 模式的后处理 .....                      | (227)        |
| 10.3.1 模式输出产品的计算 .....                 | (227)        |
| 10.3.2 模式产品的绘图输出 .....                 | (231)        |
| <b>参考文献 .....</b>                      | <b>(233)</b> |

## 第1章 绪论

短期气候预测一般是指对月、季和年际时间尺度的气候变率和气候异常进行预测。许多气象灾害如干旱、洪涝、持续高温等都与这种气候的异常密切相关。当前,从总体上来说,国内外短期气候预测的水平还不够高,预报方法主要是经验和统计的,迫切需要发展有物理依据的短期气候数值预报模式。

人们尝试用数值预报模式来模拟研究和预测大气环流大致始于20世纪50年代中期,1956年,Phillips用“准地转”方程构造了第一个大气环流数值模式;1960年代人们开始用“初始方程”模式模拟大气环流及其演变;1970年代,大气环流模式(AGCM)发展迅速,到1970年代末期,已开始进行气候模拟试验;随着计算机技术的飞速发展,从1980年代开始,人们越来越多地研究耦合模式,其中最主要的是大气—海洋耦合模式,并于1990年代开始做季度预测试验,耦合模式的研究已成为气候模拟与预测研究的重要方向。

目前,很多国家或地区都开展了用数值预报模式制作月或季预报的业务,如美国、加拿大、日本、欧洲中期天气预报中心等,一般都是采用集合预报的办法,即采用多个初始场,用数值预报模式做出多个动力延伸预报,然后进行综合,得到预报结果。而对季或季以上时间尺度的预报,则一般直接采用气候模式主要是耦合模式直接计算,目前,仍处在模拟试验阶段。

气候模式作为定量研究气候的工具,现已成为包含大气环流模式(AGCM)、海洋环流模式(OGCM)、陆面模式(LSM),甚至简单生物圈模式(SiB)等耦合而成的复杂模式(CGCM),而这其中最复杂,最重要的要数大气环流模式AGCM,其在气候模式中起着关键的作用。

在20世纪80年代初起,中国科学院大气物理研究所在曾庆存的负责下,按我国自己的思想(当然也参考了国际已有的经验)开始设计我国的大气环流模式,并在20世纪80年代已完成。为方便起见,这将成为大气物理研究所第一代大气环流模式。参加大气环流模式设计的有曾庆存、袁重光、张学洪、梁信忠、包宁等人。受计算条件的限制,该模式在垂直方向只有两层,水平分辨率为 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 。这就是大气物理研究所自行设计的第一代大气环流模式(IAP AGCM-I)。该模式的框架首次采用了曾庆存提出的IAP变换、标准层结近似、灵活性替代等新思想,从而在微分方程和差分方程上均保证了模式框架未引入任何虚假的源汇并保持总有效能量守恒,差分离散的大气方程具有真实大气的整体性质,这使得该框架具有长期稳定积分的能力。该大气环流模式在给定的实测海表温度气候场的情况下,能够较好地模拟出当代气候状况,尤其是能较好地模拟出亚洲季风、季风雨带的结构和随月份的推移,甚至季节突变现象。在国际性研究计划—大气环流模式比较计划(AMIP)中,正式参加评比的大气环流模式共有30个,代表我国的就是IAP

AGCM-I, 总的说来, 该模式的评比效果不错。

在数值气候预测系统的改进中, 模式的改进是十分重要的, 为此做了很多努力。从 1988 年起即已设计了九层格点大气环流模式(曾庆存、张学洪、梁信忠等), 后由梁信忠、毕训强和林朝晖定型, 该模式水平分辨率仍为  $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ , 垂直分为 9 层, 此即中国科学院大气物理研究所第二代格点大气环流模式(IAP AGCM-II), 也即是本书中介绍的模式。该模式在框架上继承了 IAP AGCM-I 的特点, 在物理过程上采用了当时国际上先进的技术。该模式的完成使我国的格点大气环流模式上了一个新台阶。利用该模式可进行气候异常、低频振荡、ENSO、季风及古气候的研究, 也可用于研究温室气体对气候的影响和臭氧的变化。总的说来, 该模式还是令人满意的。为提高大气环流模式的气候模拟、预测效果和缩小与国外的差距, 研制高分辨率的大气环流模式已成当务之急。在曾庆存负责下, IAP AGCM-III 大气环流格点模式于 2003 年已研制完成, 主要研制人为曾庆存、左瑞亭、张铭等人, 该模式是在 IAP AGCM-II 的基础上加以发展的新一代大气环流格点模式, 其水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$ , 垂直分为 21 层, 是 IAP 大气环流格点模式系列的一部分。截至目前, IAP 大气环流格点模式的发展情况如表 1.1 所示。

表 1.1 IAP 大气环流模式系列

| 模式版本         | 模式名称        | 分辨率                                       | 主要完成人           | 完成时间 |
|--------------|-------------|-------------------------------------------|-----------------|------|
| IAP AGCM-I   | IAP2 L AGCM | $5^{\circ} \times 4^{\circ} \times 2L$    | 曾庆存、袁重光、张学洪     | 1989 |
| IAP AGCM-II  | IAP9 L AGCM | $5^{\circ} \times 4^{\circ} \times 9L$    | 曾庆存、梁信忠、张学洪、毕训强 | 1993 |
| IAP AGCM-III | IAP21L AGCM | $2.5^{\circ} \times 2^{\circ} \times 21L$ | 曾庆存、左瑞亭、张铭      | 2003 |

IAPA GCM-II 大气环流格点模式虽然设计完成至今已有 10 年, 但现在仍然有很高的应用价值, 可广泛应用于科研、教学, 也可运用于气候预测业务。其特点是计算量适中, 对缺乏计算资源的单位和个人也能加以使用。目前该模式已完全可运行于当前的主流微机上, 这就为该模式的推广创造了便利条件。正因如此, 我们撰写了本书, 以便用户能更好地利用该模式。IAP AGCM-III 大气环流格点模式则必须运行在分布式多 CPU 的大型工作站上, 这使计算资源匮乏的用户难以利用它。此外, 因 IAP AGCM-III 模式是在 IAP AGCM-II 模式的基础上研制的, 其框架同样继承了 IAP 模式的特点和长处, 有些物理过程也继承了原 IAP AGCM-II 模式的方案, 故若对 IAP AGCM-II 模式有透彻的了解, 则也便于掌握和运行 IAP AGCM-III 模式, 这是我们撰写本书的又一目的。

本书总共分 10 章, 书中全面详细地介绍了该模式的动力框架、各物理过程、该模式源程序的各模块说明、该模式的操作维护等, 书列出主要参考文献。本书可供从事气候数值模式设计和气候数值模拟及预测的有关教学、科研人员阅读, 也可用作气象、海洋专业数值预报课程的教学参考书和该方面研究生的教材。有关该模式的问题及索要源程序则可直接与我们联系。

## 第2章 模式动力框架

### 2.1 动力方程组的变形

#### 2.1.1 标准层结扣除

令  $\theta, \lambda, p, t$  分别表示余纬、经度、气压和时间, 则球面上斜压原始方程组可以写为:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla\phi - f^* \mathbf{k}^0 \times \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (2.1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c_p} \frac{RT}{p} \omega + F_T + \frac{1}{c_p} \dot{H} \quad (2.2)$$

$$\frac{dq}{dt} = F_q + \dot{Q} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p} \quad (2.5)$$

其中

$$\mathbf{V} \equiv v\boldsymbol{\theta}^0 + u\boldsymbol{\lambda}^0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{a\partial\theta}\boldsymbol{\theta}^0 + \frac{\partial}{a\sin\theta\partial\lambda}\boldsymbol{\lambda}^0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla + \omega \frac{\partial}{\partial p} \quad (2.8)$$

$$f^* = 2\Omega \cos\theta + \frac{\text{ctg}\theta}{a}u \quad (2.9)$$

$\boldsymbol{\theta}^0, \boldsymbol{\lambda}^0$  分别是  $\theta, \lambda$  方向的单位矢量,  $\Omega$  是地球旋转角速度,  $a$  为地球半径,  $\dot{H}, \dot{Q}, \mathbf{F}, F_T, F_q$  均是源、汇和耗散项, 且当把全球大气当作一个保守系统的时候, 这些项均可忽略。

下面, 我们引入标准层结扣除<sup>[1]</sup>的概念, 设大气平均状态变量  $\tilde{T}(p), \tilde{\phi}(p)$  和  $\tilde{p}_s(\theta, \lambda)$  满足静力稳定性条件、静力平衡条件和地表几何边界条件, 具体形式如下:

$$\frac{R^2 \tilde{T}}{g} \left( \frac{g}{c_p} + g \frac{d\tilde{T}}{d\tilde{\phi}} \right) = C_0^2 > 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{d\tilde{\phi}}{dp} = -\frac{R\tilde{T}}{p} \quad (2.10)$$

$$\tilde{\phi}(\tilde{p}_s) = \phi_s \equiv gZ, \quad (Z_s \text{ 为地表高度}) \quad (2.12)$$

我们将这种平均大气定义为模式标准大气, 这样可以得到标准大气的状态分布:

$$\tilde{T}(p) = T_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa + \frac{C_0^2}{R \cdot \kappa} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa \right] \quad (2.13)$$

$$\tilde{\phi}(p) = \frac{1}{\kappa} \left( RT_0 - \frac{C_0^2}{\kappa} \right) \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa \right] - \frac{C_0^2}{\kappa} \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{\tilde{p}_s}{p_0} = \exp \left\{ \frac{\kappa}{C_0^2} \left[ \frac{1}{\kappa} \left( RT_0 - \frac{C_0^2}{\kappa} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\tilde{p}_s}{p_0} \right)^\kappa \right] - \phi_s \right] \right\} \quad (2.15)$$

其中  $\kappa = R/c_p$ ,  $p_0$ ,  $T_0$  分别是标准海平面气压和温度;  $C_0(p) = \left[ R \left( \kappa \tilde{T} - \frac{d\tilde{T}}{d \ln p} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$  为静力稳定度参数(在 IAPL2 AGCM 中即为惯性重力内波的特征相速 87.8 m/s), 是气压(或高度)的函数。

方程(2.15)是关于  $\tilde{p}_s$  的非线性方程, 可以用 Newton-Raphson 方法求解。给定参数  $p_0 = 1013.25$  hPa,  $\tilde{T}(p_0) = 288.15$  K,  $\tilde{\phi}(p_0) = 0$ , 则  $\tilde{T}(p)$ ,  $\tilde{\phi}(p)$ ,  $C_0(p)$  可以完全确定, 表 2.1 给出了模式标准大气与实际观测大气的状态对比<sup>[2]</sup>。

表 2.1 模式标准大气与实际观测大气的状态对比

| $p$ (hPa) | $\tilde{T}(p)$ (K) | $T_0(p)$ (K) | $\tilde{\phi}(p)/g$ (gpm) | $\phi_0(p)/g$ (gpm) | $C_0(p)$ (m/s) |
|-----------|--------------------|--------------|---------------------------|---------------------|----------------|
| 10        | 227.6              | 227.7        | 31073                     | 31200               | 143.2          |
| 40        | 218.5              | 218.6        | 22029                     | 22100               | 139.5          |
| 100       | 215.6              | 216.6        | 16217                     | 16200               | 133.5          |
| 150       | 216.7              | 216.6        | 13656                     | 13600               | 125.5          |
| 200       | 220.0              | 216.6        | 11819                     | 11800               | 115.5          |
| 230       | 222.7              | 217.4        | 10914                     | 10900               | 108.9          |
| 250       | 224.7              | 220.6        | 10368                     | 10400               | 104.9          |
| 270       | 226.9              | 223.9        | 9860                      | 9900                | 100.9          |
| 300       | 230.2              | 228.7        | 9155                      | 9200                | 95.2           |
| 340       | 234.8              | 234.2        | 8304                      | 8350                | 90.8           |
| 400       | 241.4              | 241.4        | 7172                      | 7200                | 86.6           |
| 500       | 251.5              | 252.1        | 5563                      | 5600                | 83.0           |
| 660       | 265.3              | 265.7        | 3463                      | 3450                | 84.7           |
| 800       | 275.1              | 275.4        | 1942                      | 1950                | 87.9           |
| 900       | 281.2              | 281.7        | 983                       | 1000                | 90.4           |
| 1013      | 287.4              | 288.0        | 0                         | 0                   | 93.1           |

此外, 毕训强<sup>[3]</sup>利用标准等压面观测到的全球温度平均, 采用埃克曼样条函数构造出了 IAP9L AGCM 的模式标准大气, 图 2.1 分别给出了  $\tilde{T}(p)$ ,  $C_0(p)$ ,  $\frac{1}{C_0} \frac{dC_0}{d \ln p}$ ,  $\tilde{\phi}(p)$  的

垂直廓线,与美国标准大气进行对照供读者参考。

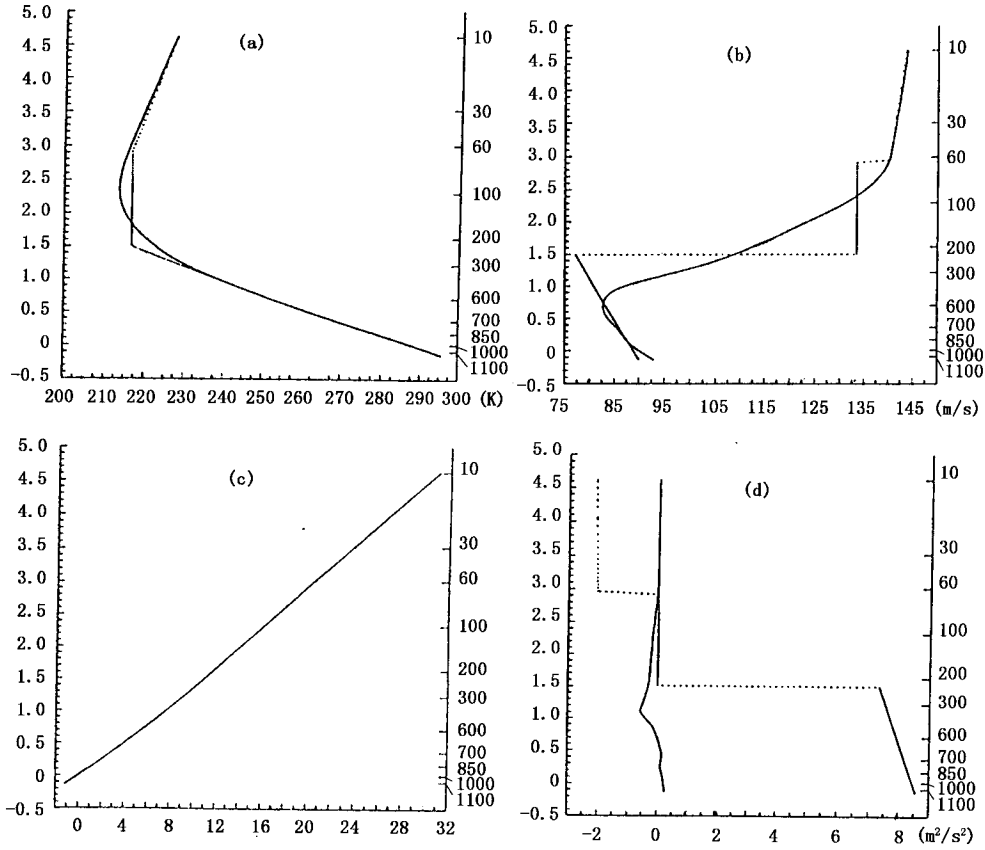


图 2.1 模式标准大气状态的垂直廓线(a)  $\tilde{T}(P)$ ; (b)  $C_0(p)$ ; (c)  $\frac{1}{C_0} \frac{dC_0}{d \ln P}$ ; (d)  $\bar{\phi}(P)$

图中左纵轴表示  $\ln(p/p_0)$ , 右纵轴表示气压  $p$  (hPa)

模式标准大气的引入,正是 IAP9L AGCM 的重要特征之一,如此一来引入热力学变量相对于模式标准大气的偏差作为预报量:

$$\begin{cases} T'(\theta, \lambda, p, t) = T(\theta, \lambda, p, t) - \tilde{T}(p) \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \phi'(\theta, \lambda, p, t) = \phi(\theta, \lambda, p, t) - \bar{\phi}(p) \end{cases} \quad (2.17)$$

对应于式(2.1)、(2.2)、(2.5)的扰动方程组可写为:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla \phi' - f^* \mathbf{k}^0 \times \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (2.18)$$

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{1}{R\bar{p}} (C_0^2 + \delta \cdot \kappa R T') \omega + F_T + \frac{1}{c_p} \dot{H} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial p} = -\frac{RT'}{p} \quad (2.20)$$

其中  $\delta$  (等于 0 或 1) 为示踪系数,  $\delta = 0$  的情况即标准层结扣除,意味着热力学方程(2.2)

中的  $\frac{1}{c_p} \frac{RT}{p} \omega$  项被替换为  $\frac{1}{c_p} \frac{R\tilde{T}}{p} \omega$ 。

### 2.1.2 坐标变换与变量替代

在垂直方向上采用  $\sigma$  坐标:

$$\sigma \equiv \frac{p - p_T}{p_s}, \quad p_s = p_s - p_T \quad (2.21)$$

其中  $p_T = 10$  hPa 为模式大气顶气压。则方程(2.18)、(2.19)、(2.4)、(2.20) 可以相应地变换为如下形式:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla\phi' - \frac{\sigma RT'}{p} \nabla p_s - f^* \mathbf{k}^0 \times \mathbf{V} + \mathbf{F} \end{aligned} \right. \quad (2.22)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT'}{dt} = \frac{1}{Rp} (C_0^2 + \delta \cdot \kappa RT') \left[ p_s \dot{\sigma} + \sigma \left( \frac{\partial p_s}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla p_s \right) \right] + F_T + \frac{1}{c_p} \dot{H} \end{aligned} \right. \quad (2.23)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla \cdot (p_s \mathbf{V}) + \frac{\partial p_s \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \end{aligned} \right. \quad (2.24)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} = -\frac{p_s}{p} RT' \end{aligned} \right. \quad (2.25)$$

其中  $\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}$ ,  $\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt}$ 。

进一步进行变量替换,先引入新的变量组合:

$$P \equiv \sqrt{p_s}, \quad V \equiv P \cdot v, \quad U \equiv P \cdot u, \quad W \equiv P \cdot \dot{\sigma}, \quad \Phi = \frac{1}{C_0} PRT' \quad (2.26)$$

则可以导出模式动力框架的基本方程组:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\sum_{m=1}^3 L_m(V) - P_\theta^{(1)} - P_\theta^{(2)} + f^* U + PF_\theta \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\sum_{m=1}^3 L_m(U) - P_\lambda^{(1)} - P_\lambda^{(2)} - f^* V + PF_\lambda \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\sum_{m=1}^3 L_m(\Phi) + \frac{S}{\sigma \cdot P} C_0 + \delta \frac{\kappa \Phi}{P} (\Omega^{(1)} + \Omega_\theta^{(2)} + \Omega_\lambda^{(2)}) + \quad (2.29)$$

$$\frac{RP}{C_0} F_T + \frac{\kappa P}{C_0} \dot{H}$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -D(p) - \frac{\partial PW}{\partial \sigma} \quad (2.30)$$

$$p = \sigma P^2 + p_T, \quad S = \sigma \frac{P^2}{p} \quad (2.31)$$

其中,平流运算符

$$L_1(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left( 2 \frac{\partial Fu}{\partial \lambda} - F \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right) \quad (2.32)$$

$$L_2(F) \equiv \frac{1}{2a \sin \theta} \left( 2 \frac{\partial Fv \sin \theta}{\partial \theta} - F \frac{\partial v \sin \theta}{\partial \theta} \right) \quad (2.33)$$

$$L_3(F) \equiv \frac{1}{2} \left( 2 \frac{\partial F\dot{\sigma}}{\partial \sigma} - F \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \right) \quad (2.34)$$

气压梯度力项:

$$P_{\theta}^{(1)} \equiv P \frac{\partial \phi'}{a \partial \theta} \quad (2.35)$$

$$P_{\lambda}^{(1)} \equiv P \frac{\partial \phi}{a \sin \theta \cdot \partial \lambda} \quad (2.36)$$

$$P_{\theta}^{(2)} \equiv 2 \frac{C_0 \cdot S \cdot \Phi}{P} \cdot \frac{\partial P}{a \partial \theta} \quad (2.37)$$

$$P_{\lambda}^{(2)} \equiv 2 \frac{C_0 \cdot S \cdot \Phi}{P} \cdot \frac{\partial P}{a \sin \theta \cdot \partial \lambda} \quad (2.38)$$

此外

$$\Omega^{(1)} \equiv PW + \sigma \cdot 2P \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.39)$$

$$\Omega_{\theta}^{(2)} \equiv 2\sigma V \frac{\partial P}{a \partial \theta} \quad (2.40)$$

$$\Omega_{\lambda}^{(2)} \equiv 2\sigma U \frac{\partial P}{a \sin \theta \partial \lambda} \quad (2.41)$$

$$D(F) = \frac{1}{a \sin \theta} \left( \frac{\partial FV \sin \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial FU}{\partial \lambda} \right) \quad (2.42)$$

方程(2.27) ~ (2.31) 就是 IAP9L AGCM 的基本动力框架, 式(2.26)、(2.32) ~ (2.42) 是其基本计算公式, 可以直接应用于有限差分方案中。

铅直方向上运动学边界条件可写为:

$$W|_{\sigma=0,1} = 0 \quad (2.43)$$

地表位势高度偏差满足的几何边界条件为:

$$\phi'|_{\sigma=1} = \frac{R\tilde{T}_s}{\bar{p}_s} p'_s \quad (2.44)$$

其中  $\tilde{T}_s \equiv \tilde{T}(p_s)$   $p'_s \equiv p_s - \bar{p}_s$

$p'_s$  为地面气压相对于标准状态的偏差。

### 2.1.3 绝热无耗散大气的整体性质

从上述动力框架中略去源、汇及耗散项, 则可推出自由大气方程组具有下列大气运动整体性质<sup>[4]</sup>:

#### 2.1.3.1 总质量守恒

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi D(P) a^2 \sin \theta d\theta d\lambda d\sigma = 0 \quad (2.45)$$

$$\text{或 } \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \bar{p}_s a^2 \sin \theta d\theta d\lambda = 0$$

#### 2.1.3.2 平流项二次守恒

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi FL_m(F) a^2 \sin \theta d\theta d\lambda d\sigma = 0 \quad (2.46)$$

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

### 2.1.3.3 能量守恒关系

表面位能产生的关系式为:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ -UP_\lambda^{(1)} - VP'_\theta + \Phi \frac{C_0 \cdot S}{P \cdot \sigma} \Omega^{(1)} \right] a^2 \sin\theta d\theta d\lambda d\sigma \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{RT_s}{\bar{p}_s} \frac{1}{2} (p'_s)^2 a^2 \sin\theta d\theta d\lambda \end{aligned} \quad (2.47)$$

部分动能和有效位能转换项满足:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ -UP_\lambda^{(2)} + \Phi \frac{C_0 S}{P \cdot \sigma} \Omega_\lambda^{(2)} \right] a^2 \sin\theta d\theta d\lambda = 0 \quad (2.48)$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ -VP_\theta^{(2)} + \Phi \frac{C_0 S}{P \cdot \sigma} \Omega_\theta^{(2)} \right] a^2 \sin\theta d\theta d\lambda = 0 \quad (2.49)$$

基于式(2.45)~(2.49),作为总动能、总有效位能及表面位能之和的总“有效能量”可以写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ \int_0^1 \frac{1}{2} (U^2 + V^2 + \Phi^2) d\sigma + \frac{RT_s}{\bar{p}_s} \frac{1}{2} (p'_s)^2 \right] a^2 \sin\theta d\theta d\lambda \\ &= \delta \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^1 \frac{\kappa \cdot S \Phi^2}{P^2 \cdot \sigma} (\Omega^{(1)} + \Omega_\theta^{(2)} + \Omega_\lambda^{(2)}) a^2 \sin\theta d\theta d\lambda d\sigma \end{aligned} \quad (2.50)$$

特别应指出的是,上述方程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。此外,从相对误差角度而言,标准层结近似引入的误差是很小的<sup>[5]</sup>,在 IAP9L AGCM 中的引进是合理的。

上述性质表明,微分形式的模式方程中没有引入任何虚假的“源”和“汇”。

## 2.2 空间差分方案

### 2.2.1 三维空间变量分布

IAP9L AGCM 为包括对流层和平流层低层的大气环流模式,模式顶取为 10 hPa。为更为细致地描写上、下边界层的大气运动,模式在垂直方向上采用不等距  $\sigma$  坐标分层 ( $0 \leq \sigma \leq 1$ )。垂直方向变量分布采用 Lorenz 状的结构,如图 2.2 所示,所有预报量诸如  $U, V, \Phi$  和  $Q$  均放在整数层上,而诊断量  $W$  和  $\phi'$  等放在半层上(即界面层)上。模式水平方向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  $IX \times JY$  个网格,  $IX=2\pi/\Delta\lambda, JY=\pi/\Delta\theta$ ,水平变量配置采用 Arakawa-C 网格,见图 2.3。

在东西方向上采用周期性边界条件,在两极,矢量分量具有不确定性,基于极地涡旋状态的条件限制,此时边界条件可以取为:

$$U|_{j=1,J} = u|_{j=1,J} = 0 \quad (2.51)$$

|                          | $k$ | $p$     | $\sigma$  |
|--------------------------|-----|---------|-----------|
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 1   | 10      | 0.0000000 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 25      | 0.0149514 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 2   | 40      | 0.0299028 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 75      | 0.0647895 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 3   | 110     | 0.0996761 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 165     | 0.1544981 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 4   | 220     | 0.2093200 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 285     | 0.2741093 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 5   | 350     | 0.3388986 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 425     | 0.4136557 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 6   | 500     | 0.4884127 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 575     | 0.5631697 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 7   | 650     | 0.6379267 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 725     | 0.7126838 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 8   | 800     | 0.7874408 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 882.5   | 0.8497384 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 9   | 925     | 0.9120359 |
| $UV\dot{T}Q$ - - - - -   |     | 969     | 0.9558934 |
| $\dot{\sigma}\Phi$ ————— | 10  | 1013    | 0.9997508 |
|                          |     | 1013.25 | 1.0000000 |

图 2.2 模式垂直变量配置

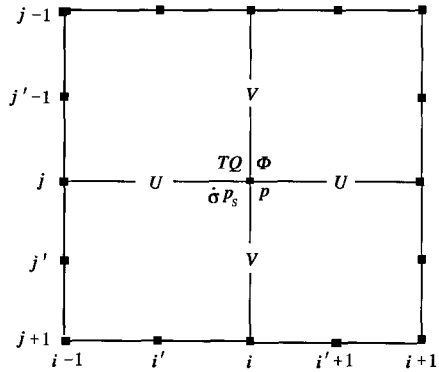


图 2.3 模式的水平变量配置

为与模式程序中变量下标一致,可将变量分布简单总结为:  $U$  方程中各项写在  $[i-\frac{1}{2}, j, k]$  点上,  $V$  方程中各项写在  $[i, j+\frac{1}{2}, k]$  上,  $\Phi$  方程中各项、水汽方程、连续方程和状态方程均写在  $[i, j, k]$  点上,即

$$\left\{ V, v, \frac{\partial V}{\partial t}, L_m(V), P_\theta, f^* U \right\}_{i, j+\frac{1}{2}, k} \quad i \in [1, I], j \in [1, J-1], k \in [1, K] \quad (2.52)$$

$$\left\{ U, u, \frac{\partial U}{\partial t}, L_m(U), P_\lambda, f^* V \right\}_{i-\frac{1}{2}, j, k} \quad i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K] \quad (2.53)$$

$$\left\{ \Phi, \frac{\partial \Phi}{\partial t}, L_m(\Phi), C_0, \frac{1}{C_0} \frac{dC_0}{d \ln p}, \Omega \right\}_{i, j, k} \quad i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K] \quad (2.54)$$

$$\left\{ P, p_a, \frac{\partial P}{\partial t}, p, D(P) \right\}_{i, j} \quad i \in [1, I], j \in [1, J] \quad (2.55)$$

$$\{q, Q, \nabla \cdot Q\}_{i, j, k} \quad i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K] \quad (2.56)$$

此外,  $W, \dot{\sigma}, \phi'$  写在半数层面(界面层)上

$$\{W, \dot{\sigma}, \phi'\}_{i, j, k+\frac{1}{2}} \quad i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [0, K] \quad (2.57)$$

以上各项中,  $I=72, J=46, K=9$  分别对应于 IAP9L AGCM 纬向、经向及垂直方向模式格点数。

### 2.2.2 有限差分算子和平均算子

为叙述方便,引入差分算子和平均算子<sup>[4]</sup>如下:

令  $F(r)$  和  $G(r)$  为  $r \in [a, b]$  上的函数,  $L$  为整数,则可以定义两组离散变量

$$F_l \equiv F(r_l), \quad r_l \equiv a + (l-1)\Delta r \quad l \in [1, L+1] \quad (2.58)$$

$$G_{l+\frac{1}{2}} \equiv G(r_{l+\frac{1}{2}}), \quad r_{l+\frac{1}{2}} \equiv a + \left(l - \frac{1}{2}\right)\Delta r \quad l \in [1, L] \quad (2.59)$$

其中  $\Delta r \equiv \frac{b-a}{L}$ 。