国家气候中心大气环流模式

——基本原理和使用说明

董　敏　　主编

气象出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了国家气候中心的大气环流模式的动力学框架、物理过程、计算方法及程序结构，包括模式在混合坐标系中的基本方程组、求解大气方程组的谱方法、模式所采用的各种物理过程，如辐射、对流、边界层及陆面过程等。书中包括了各种动力和物理过程的有关公式的详细推导，还包括较详细的程序框图及使用说明，内容深入浅出，易于理解和应用。本书适合气象、气候、水文、环境等专业大学高年级学生及研究生阅读，也可供从事天气、气候预测的专业人员及从事气候模拟、环境科学研究的专业人员参考。

图书在版编目（**CIP**）数据

国家气候中心大气环流模式——基本原理和使用说明/董敏主编—北京：气象出版社，2001.10

ISBN 7-5029-3266-6

Ⅰ. 国… Ⅱ. 董… Ⅲ. 大气环流模式 Ⅳ.P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 072424 号

国家气候中心大气环流模式——基本原理和使用说明

董敏 主编

责任编辑：李太宇 袁信轩 终审：周诗健

封面设计： 沈 辉 责任校对：寇红薇

气象出版社 出版

（北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码：100081）

北京兴怀印刷厂印刷

* * *

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本：787×1092 1/16 印张：9.875 字数：253 千字

2001 年 12 月第一版 2001 年 12 月第一次印刷

印数：1～500 册

ISBN 7-5029-3266-6/P・1148

定价：20.00 元

前　言

气候状况及其变化对人类生活和社会发展的各个方面都具有重大的影响。随着社会的发展，人类的进步，人们对气候信息的需求也越来越迫切。气候模式是研究各种气候的形成原因，各种气候变率的机制，理解各种气候灾害（如干旱、洪涝、酷热、严寒等）的发生机理的重要工具。同时也是预测气候变化的极具潜力的工具。

目前世界各国都在使用气候模式研究气候变化、进行气候预测的实验研究。同时也都在进一步发展和改进气候模式。我国政府对气候模式的发展也非常重视。“九五”期间（1996～2000 年），国家科委（现为科技部）将“我国短期气候预测业务系统的研究”列为国家“重中之重”科技项目，给予极大支持。该项目包括 5 个课题。其中第二课题为“短期气候预测业务动力模式的研制”，目的在于发展一个由三维全球大气环流模式、海洋环流模式、区域模式及 ENSO 模式组成的，并包括资料同化、后处理及显示程序等的业务模式系统。而“季节预测大气环流模式的研制”是该课题所属的第二专题。专题的任务是发展一个有完整物理过程的三维大气环流模式，该模式将作为业务模式用以进行季节尺度的气候预测，同时也可以进行气候模拟研究。

国家气候中心、中国科学院大气物理研究所、北京大学地球物理学系及国家气象中心的 20 多名科研人员在一起合作攻关，经过近五年的努力完成了国家气候中心大气环流模式的研制，并已在国家气候中心的汛期气候预测中进行了试用。今后该模式将逐渐投入业务预测，同时也将提供给广大业务和科研人员在气候研究中应用，并在业务应用中不断完善和改进。本书将对国家气候中心的大气环流模式的基本原理、技术细节及使用方法进行较为详细的说明，希望能通过本书对使用国家气候中心大气环流模式的研究者提供一些有用的信息。本书对气候模式中动力框架及物理过程的参数化有较为详细的叙述和公式推导，对从事气候模拟的研究人员也会有一定的参考价值。

参加本书编著的主要是《我国短期气候预测业务系统的研究》项目第二课题第二专题“季节预测大气环流模式的研制”的研究人员。具体分工如下：

第一章：董　敏

第二章：陈家滨

第三章：叶正青

第四章：季仲贞

第五章：王　标、沈元芳

第六章：董　敏、平　凡

第七章：罗　勇、孙菽芬、党鸿雁

第八章：桑建国、张培群

第九章：叶正青、宋永加、董　敏

由于作者的知识水平有限和经验不足，书中难免有疏漏或错误之处，敬请专家和本书的广大读者及国家气候中心大气环流模式的使用者批评指正，并欢迎任何改进的建议和意见。

本书的编写和出版得到了国家科技部“我国短期气候预测业务系统的研究”项目第二课题“短期气候预测业务动力模式的研制”第二专题的经费资助。项目执行专家组、项目办公室及第二课题课题负责人丁一汇教授的指导和帮助对本专题的研究及本书的完成起着重要作用，作者深表谢意。

作　者

2001 年 9 月

目　录

前言
第一章　概述……（1）
1.1　发展历史……（1）
1.2　模式改进的思路……（1）
1.3　对原模式的改进……（2）
第二章　模式基本方程组……(5）
2.1　引言……（5）
2.2　混合坐标 η ……（5）
2.3　参考大气……（5）
2.4　基本方程组……（6）
2.5　垂直离散化……（8）
2.6　时间积分……（11）
第三章　模式求解的谱方法……（16）
3.1　谱方法基本概念……（16）
3.2　勒让德变换……（22）
3.3　快速傅里叶变换……（24）
3.4　高斯积分……（29）
3.5　大气模式方程的谱截断形式……（33）
第四章　水汽输送的半拉格朗日方法……（45）
4.1　引言……（45）
4.2　水汽初始场的处理……（45）
4.3　平方守恒半拉格朗日法的基本原理……（47）
4.4　水汽方程的计算……（51）
第五章　辐射传输过程的参数化……（53）
5.1　计算辐射传输的 K-分布方法……（53）
5.2　Morcrette 辐射方案……（61）
第六章　积云对流参数化……（80）
6.1　基本思路和云模式……（80）
6.2　初始的干抬升过程……（88）
6.3　凝结……（89）
6.4　初始质量通量的计算……（90）
6.5　强迫卷出……（91）
6.6　对流的终止……（94）
6.7　降水过程……（95）
6.8　对流云云底、云顶和云量……（95）

需要全本请访问 www.ertongbook.com

6.9 对环境的影响 ……（96）
6.10 相变和降水的蒸发 ……（97）
第七章 陆面过程 ……（99）
7.1 改进的生物圈-大气传输过程模型（BATS） ……（99）
7.2 简化的雪盖-大气-土壤间的输运模型（SAST） ……（121）
第八章 边界层过程的参数化 ……（133）
8.1 垂直扩散 ……（133）
8.2 重力波波阻的参数化 ……（136）
第九章 模式程序结构和运行 ……（140）
9.1 模式程序结构简介 ……（140）
9.2 模式初始资料和边界资料 ……（145）
9.3 模式的运行 ……（145）
9.4 模式的后处理 ……（147）
9.5 与海洋模式的耦合 ……（149）

第一章 概 述

1.1 发展历史

气候变化与国民经济建设、社会发展以及人民的日常生活均有着密切的关系。而气候模式是研究气候变化，了解各种气候灾害（如干旱、洪涝）成因的重要工具。也是进行气候预测的极有发展潜力的工具之一。因此世界各国的气象业务和研究单位都投入了大量的人力和财力发展气候模式。自从1965年Manabe等人建立起全球三维大气环流模式以来，经过近40年的努力，全球大气环流模式日臻完善，并已经在中、短期天气预报及气候变化的研究方面取得了很大的成功。在气候预测方面也取得了可喜的进展。

我国从20世纪50年代起就开始研究数值预报。70年代以来我国气象业务和研究人员一方面引进国外的大气环流模式，同时也积极发展自己的三维大气环流模式。1980年我国正式开始进行中短期数值预报。

“九五”期间（1996～2000年）在国家科委（现为科技部）的直接领导和大力支持下，启动了国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测业务系统的研究”。该项目包括5个课题。其中第二课题为“短期气候预测动力模式的研制”，目的在于发展一个由三维全球大气环流模式、海洋环流模式、区域模式及ENSO模式组成的并包括资料同化、后处理及显示程序的业务模式系统。而“季节预测大气环流模式的研制” 是该课题所属的第二专题。专题的任务是发展一个有完整物理过程的三维大气环流模式，该模式将作为业务模式用以进行季节尺度的气候预测，同时也可以进行气候模拟研究。经过4年多的努力，上述目标基本完成。本书就是对国家气候中心的大气环流模式的技术细节及使用方法进行说明的一个手册。

1.2 模式改进的思路

为研制适合我国国情的既可用于气候业务预测又可以用于气候变化研究的大气环流模式，课题组成员广泛地阅读了国内外有关文献，以便吸收国内外本领域的研究成果。为加快模式研制的效率，我们采取了在引进已有的较成熟的大气环流模式的基础上通过消化吸收并加以改造的方针。首先对世界上各主要气候业务单位及研究机构，包括欧洲中心（ECMWF）、美国环境预报中心（NCEP/CPC）、美国全国大气研究中心（NCAR）、英国气象局（UKMO）和哈得莱中心（Hadley Centre）、加拿大气候模拟和分析中心（CCCma）、澳大利亚联邦科学和工业研究组织（CSIRO）、中国科学院大气物理研究所（IAP）、中国气象局国家气象中心（CMA/NMC）等开发出的气候模式的性能进行了调研。经过比较，同时考虑到源程序维护管理的方便及将来在进行业务预报时初始资料获取的方便，我们最终选取原国家气象中心中期数值预报业务模式为我们工作的起点。在原国家气

象中心中期数值预报业务模式的基础上，吸收国内外各种气候及数值预报模式的优点，经过几年的努力发展研制而成现在的国家气候中心大气环流模式。

1.3 对原模式的改进

原国家气象中心中期数值预报业务模式最早来源于欧洲中期数值预报中心的大气模式。经过国家气象中心的移植和改造，于1991年正式用于中期数值预报业务。 在将其发展成为气候模式的过程中又做了如下的改进：

1.3.1 模式动力学框架的改进

（1）将经过考验的参考大气方案和质量守恒方案加入到大气模式中。改进方案和原方案各进行了10年积分作对比验证。结果表明引用参考大气方案可以改进陡峭地形处气压梯度力的计算精度，改善数值预报和气侯模拟的结果。用地面气压P_s代替传统谱模式中采用的$\ln P_s$作为预报量的质量守恒方案可以克服原模式存在的质量不守恒、高度场系统飘移的现象。（参见陈嘉宾等[1]及叶正青等[2]人的文章及本书的第二章）。

（2）采用逐步循环订正法对国家气候中心模式初值中存在的负水汽问题进行了特别处理。经实际个例计算表明，其效果明显，不仅克服了负水汽现象，而且对各层水汽场的水平分布不会带来明显的变化[3]

（3）采用半拉格朗日方法计算水汽输送并将模拟的降水结果和用谱方法时降水模拟结果进行了比较（参见本书第三章）。

1.3.2 模式中辐射计算过程的改进

太阳辐射是大气运动的主要能源, 辐射过程在决定大气运动方面起着重要作用。 我们选择了两个新的辐射参数化方案加入到模式中, 以便改进模式的模拟效果。

（1） 引入 Morcrette[4]新辐射方案，对比试验表明，新的辐射方案不仅提高了辐射的计算精度而且改进了对环流场及降水的预报（详见沈元芳的论文《辐射参数化的变化对模式预报的影响》[5]及本书第四章）。

（2） K-分布辐射方案

引入了K-分布辐射方案替代原模式的全辐射方案，进行改造。该方案已移植到国家气候中心工作站上，加入到国家气候中心模式中。该方案与Morcrette辐射方案同时存在于模式中，用户可选择其一使用。我们将在今后的长期使用中考验两者的效果再决定取舍。

1.3.3 气候模式中对流参数化方案的改进

在新的国家气候中心模式中采用Gregory的质量通量方案[6]代替原模式中的Kuo氏对流参数化方案。该方案在预报我国雨带分布方面比Kuo方案更接近实际。而且，加入质量通量方案后模式对高度及环流场的模拟效果也比原Kuo方案有所改进[7]。

1.3.4 陆面过程和水文过程的参数化方法研究

原中期数值预报模式采用基于地表热量平衡的陆面过程模式，这对气候模拟和预测的目的来说过于简单。为此将Dickenson研制的BATS[8]（Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme）模式加入到气候模式中。同时将孙菽芬[9,10]等研制的三层雪盖模式嵌入BATS中。

1.3.5 改进模式中边界层过程的参数化方案

（1）重力波波阻参数化的改进

对原T63模式中的计算重力波波阻的子程序GWDRAG.F进行了修改。原有的参数化方法考虑了稳定层结大气流经地形造成的波阻。在修改的程序中增加了在不稳定层结气流产生的波阻[11]。当低层大气是不稳定或近中性的，气流流经较大尺度地形时有可能在其上部稳定的自由大气中产生波动，并造成水平动量的垂直输送。此种情况已由解析解、数值模拟和水槽试验证实。

（2）边界层湍流扩散改为1阶半闭合方案，程序改编已完成并装入T63模式中（见本书第八章）。

（3）加入边界层湍流扩散的自由对流修正方案。这一修正使热带辐合带地区由于风速很小致使模拟的降水过弱的现象得到改进。

1.3.6 对模式的源程序进行了较大规模的改造

原国家气象中心中期数值预报业务模式在CRAY计算机平台上运行。目前工作站的计算能力大大提高，同时分布式内存并行计算机的发展也很快。中国气象局已配备了国产的神威、银河3、曙光1000A及进口的SP和SP-2等并行计算机。为了在这些新的平台上运行，对源程序作了如下的改造：

（1）与国家气象中心、气候中心合作由金之雁、叶正青、余伟、王向东等将使用于CRAY机的源程序移植到IBM工作站上。替换掉所有的指针语句和CRAY专有的内部函数。这使新的气候模式增加了通用性，可以在几乎所有的工作站上运行。

（2）在工作站上对源程序进行了优化，提高了模式运行速度，减少了模式所需的内存。

（3）在 SP 机上对优化后的模式版本进行了按纬圈并行。SP 机上 4CPU 运行时加速比为 3.44～3.66 平均为 3.52，并行效率为 86%～92%，平均为 88% 。同时也移植到指定的业务运行平台——曙光 1000A 上。

（4）原中期数值预报业务模式由于积分时间较短，模式运行时所需的下垫面海温值使用积分时段所在月的气候平均值。作气候研究或预测时往往要运行数月、数年甚至上百年，使用固定海温是不合适的。为此对模式源程序进行了改造，使之既可使用各月不同的气候海温，也可以使用与积分时段相配合的实际海温作为下边界条件。海温值被插值到每天的时间间隔，在积分的过程中每天更换。

1.3.7 季节预测大气模式与全球海洋模式实现了耦合运行

国家气候中心(NCC)海洋模式及耦合方法由第二课题的第三专题研制。新的国家气候中心海气耦合模式是由 T63 大气模式和 30 层海洋模式组成的。T63 大气模式和 30 层海洋模

式是每天交换数据的，即大气 ⟶ 海洋 ⟶ 大气……。大气模式传输风应力，热通量给海洋模式以代替海洋模式原来的气候风应力和热通量，海洋模式则传送海表温度距平场，加到大气模式的海表温度气候场上得到新的海温场来驱动大气模式。这样就实现了海气环境模式的耦合。

参考文献

[1] 陈嘉滨，高学杰. 质量守恒律在国家气候中心气候谱模式中的应用. 大气科学，2000 ，25（ 5 ）：608～614

[2] 叶正青，董敏，陈嘉滨 . 国家气候中心模式在实际海温条件下模拟的气候. 2000 ，“95”攻关项目成果论文集. 气象出版社，北京.

[3] 季仲贞 , 王斌 .T63L16 谱模式水汽初始场的处理和实验. 气候与环境研究，2000，5（2）：141～144

[5] 沈元芳，伊兰，陈谊，胡国权 . 辐射参数化的变化对模式预报的影响. 2000 ,“95”攻关项目成果论文集. 气象出版社，北京.

[6] Gregory, D. , Rowntree, P. R., Mass flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability-dependence . *Mon Wea Rew*, 1990, 118, 1483～1506

[7] 平凡，高守亭，董敏，顾宏道. 国家气候中心模式对流参数化的改进及其对 1998 年中国暴雨 的模拟. 2000 ,“95”攻关项目成果论文集. 气象出版社，北京.

[8] Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J. , Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme （BATS） for NCAR community Climate Model . NCAR Techenical Note NCAR/TN-275+STR, Boulder, Colorado, 1986 , 69pp.

[9] Sun Shufen, et al. A simple snow-atmosphere-soil transfer model. *J. Geophys Res*,, 1999, 104，D16, 19587—19597

[10] 孙菽芬. 用于GCM耦合的积雪模型设计. 气象学报，1999，57（3）: 293～300

[11] 桑建国 , 刘辉志 , 洪钟祥. 二维地形的地形阻力. 2000 ,“95”攻关项目成果论文集. 气象出版社，北京.

第二章　模式基本方程组

2.1　引言

本模式基本方程组类似于国家气象中心的大气谱模式（来自于ECMWF[1]）。不同的是，在这套方程组中引入了仅是气压函数的参考大气和质量守恒律[2, 3]，热力学变量温度T和位势高度ϕ变为与其参考大气的偏差变量T'和ϕ'。并且，作为一个预报变量，地面气压P_s的对数$\ln P_s$改变为地面气压本身。这样修改的好处是，明显地减少了Gibbs截谱误差，并可保证模式大气总质量的守恒；有效地减少原预报模式在长期数值积分中出现的气候漂移误差[3]，提高了短期预报精度和气候模拟质量。

2.2　混合坐标η

在垂直方向上采用较为灵活的η坐标[1]。这种坐标是气压p的单值函数，并依赖于地面气压p_s。定义如下

$$\eta = \eta\ （p, p_s）\tag{2.1}$$

这里η（0, p_s）= 0，和η（p_s, p_s）=1。

气压p是通过两个特殊函数A（η）和B（η）与混合坐标η相联系，即

$$p(\lambda, \varphi, \eta) = A(\eta) + B(\eta) p_s(\lambda, \varphi)\tag{2.2}$$

A和B的选取，使之形成混合坐标面。

2.3　参考大气

按照文献[4]和[5]使用的参考大气，定义如下：参考大气温度$\overline{T}$和位势高度$\overline{\phi}$满足

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \overline{\phi}}{\partial \ln p} = R_d \overline{T} \\ \left(\dfrac{g}{c_p} + \dfrac{\mathrm{d}\overline{T}}{\mathrm{dz}} \right) \dfrac{R_d \overline{T}}{g} = C_0^2 \equiv \text{常数} \end{cases}\tag{2.3}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

其中，R_d为气体常数；c_p为定压比热*；g为重力加速度；ln$p$是气压的对数；而C_0^2是常定的大气层结参数。由式（2.3），可得到参考大气温度$\overline{T}$和地面气压的对数lnp_s的分布为

$$\overline{\ln p_s} = \ln p_0 + \ln\left(1-\left(\phi_s - Y\ln p_0 + Y\frac{\overline{\ln p_s}}{X}\right)\right)\frac{c_p}{R_d} \tag{2.4}$$

$$\overline{T} = X_0 + Y_0 \exp\left(\frac{R_d}{c_p}\ln p\right) \tag{2.5}$$

$$\overline{\phi} = -R_d\left[X_0\ln\frac{p}{p_0} + Y_0\left(\exp\left(\frac{R_d}{c_p}\ln p\right) - \exp\left(\frac{R_d}{c_p}\ln p_0\right)\right)\right] \tag{2.6}$$

其中

$$\begin{cases} X_0 = \dfrac{c_p C_0^2}{R_d^2}, Y_0 = (\overline{T}_0 - X_0)/\exp\left(\dfrac{R_d}{c_p}\ln p_0\right) \\ X = (\overline{T}_0 R_d - Y)\dfrac{c_p}{R_d}, Y = \dfrac{c_p}{R_d}C_0^2, \end{cases} \tag{2.7}$$

$\overline{T}_0$和p_0分别为海平面气温和气压，它们均为常数。

实际的大气温度T和位势高度ϕ分裂为参考大气部分和其偏差部分，即

$$\begin{cases} T = \overline{T}(p) + T', \\ \phi = \overline{\phi}(p) + \phi' \end{cases} 。 \tag{2.8}$$

很容易证明，对参考大气有如下等式成立

$$\frac{\partial\overline{\phi}}{\partial x(y)} + \frac{R_d\overline{T}}{p_s}\frac{\partial p_s}{\partial x(y)} = 0 。 \tag{2.9}$$

2.4 基本方程组

引入参考大气、且满足大气质量守恒的控制方程为

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial\lambda} - \frac{1}{a}\frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial\mu} + K_\xi \tag{2.10}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial(F_u + P_u)}{\partial\lambda} + \frac{1}{a}\frac{\partial(F_v + P_v)}{\partial\mu} + \nabla^2 G + K_D \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -\frac{U}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial T'}{\partial\lambda} - \frac{V}{a}\frac{\partial T'}{\partial\mu} - \left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)\frac{\partial T'}{\partial p}$$

* 按国标 GB3102.8-93，c_p应定名为质量定压热容或比定压热容，本书未做系统改动，特此说明。

$$+\left(\frac{R_d}{c_p}T'+\frac{R_d}{c_p}T_q+\frac{c^2}{R_d}\right)\frac{\varpi}{p}+P_T+K_T \tag{2.12}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}=-\frac{U}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial q}{\partial \lambda}-\frac{V}{a}\frac{\partial q}{\partial \mu}-\left(\dot{\eta}\frac{\partial q}{\partial \eta}\right)\frac{\partial q}{\partial p}+P_q+K_q \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t}=-\int_0^1\nabla\cdot\left(V\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)d\eta, \tag{2.14}$$

$$\mathrm{d}\phi'=-R_dT_v'\mathrm{d}\ln p, \tag{2.15}$$

其中η面的垂直速度为

$$\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)=\frac{\partial p}{\partial t}-\int_0^\eta\nabla\cdot\left(V\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)\mathrm{d}\eta \tag{2.16}$$

等压面的垂直速度为

$$\varpi=-\int_0^\eta\nabla\cdot(V\mathrm{d}p)+V\nabla p \tag{2.17}$$

其他符号为

$$F_u=(f+\zeta)V-\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)\frac{\partial U}{\partial p}-\frac{R_dT_v'}{a}\frac{\partial \ln p}{\partial \lambda}$$

$$F_v=-(f+\zeta)U-\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)\frac{\partial v}{\partial p}-\frac{R_dT_v'}{a}\frac{\partial \ln p}{\partial \mu}(1-\mu^2)$$

$$G=\phi'+E,$$

$$E=\frac{1}{2(1-\mu^2)}(U^2+V^2)$$

$$T_v'=T_v-\overline{T}$$

$$T_q=qT\frac{\left(\frac{1}{\varepsilon}-1\right)-(\delta-1)}{1+(\delta-1)q}$$

$$\mu=\sin\varphi$$

$$(U,V)=(u,v)\sin\varphi$$

在式（2.12）中的C^2是依赖于参考大气温度的垂直分布，一般讲它是气压的函数。P_v，P_T，P_u和P_q是参数化倾向，而K_ξ，K_T，K_D，K_q是扩散项。T_v是虚温，$\varepsilon=R_d/R_v$，$\delta=c_{pv}/c_p$其它符号是气象中常用符号。

这套方程组和原气象中心大气谱模式方程组的区别在于，前者引入了参考大气，且以地面气压p_s(而不是其对数$\ln p_s$）作为预报变量，保持了大气总质量守恒。

在静力方程（2.15）中ϕ'是位势偏差。当$\eta=1$（即地面处）时，ϕ'就变为ϕ_s'，即地表面位势偏差。这与原气象中心谱模式不同，那里是ϕ_s，即地形位势高度。ϕ_s'计算为

$$\phi_s'=\phi_s-\overline{\phi}_s(p_s) \tag{2.18}$$

$\bar{\phi}_s(p_s)$是参考大气在地表面处的位势高度，它是在公式（2.6）中令$p=p_s$求得。ϕ_s是截谱地形位势高度。

2.5 垂直离散化

2.5.1 坐标面

垂直方向离散化与气象中心的大气谱模式相同[1]。

模式大气分为 NLEV 层，预报变量涡度ζ，散度 D，温度偏差T'和比湿q是放在整层上，而地表面气压 p_s是放在半层（$NLEV+1/2$）层上，η面的垂直速度$\dot{\eta}$放置在半层上。模式大气层是由他们之间的间面层（或称半层）的气压确定。间面层气压按式（2.2）给定为

$$p_{k+1/2}=A_{k+1/2}+B_{k+1/2}p_s \qquad (k=0,1,\Lambda\ ,NLEV) \tag{2.19}$$

$A_{k+1/2}$和$B_{k+1/2}$对给定的η是常数，由他们可确定坐标面。一些特定值为

$$A_{1/2}=B_{1/2}=A_{\mathrm{NLEV}}=0\text{和}B_{\mathrm{NLEV}+1/2}=0$$

如果令

$$A_{k+1/2}=0,\qquad k=0,1,\Lambda\ ,NLEV$$

则η坐标就退化为常用的σ坐标。如果令

$$B_{k+1/2}=0,\qquad k=0,1,\Lambda\ ,NLEV$$

则就退化为 P坐标。

在本模式中，取 NLEV=16。最下面 3 个间面层的 $A_{k+1/2}(k=14,15,16)$为零，这就是σ坐标；在最上面的 2 个间面层 $B_{k+1/2}(k=0,1)$为零，这就是 P坐标；从 k=2 到 13，A 和 B 两者均不为零，这是混合坐标。

在公式（2.19）中气压 p 和地面气压 p_s间的显式关系，隐含地确定了垂直坐标η。在模式公式中，不需要知道坐标的明确表示。

在初始化和物理参数化中要用到整层上的气压。按照本模式垂直差分格式构造中要求总能量和总角动量守恒，则整层上的气压被确定为

$$p_k=\frac{\Delta p_k}{\ln(p_{k+1/2}/p_{k-1/2})} \tag{2.20}$$

但是为计算方便，在本模式中简单取

$$p_k=\frac{1}{2}(p_{k+1/2}+p_{k-1/2}) \tag{2.21}$$

对计算不会有多大的影响。

2.5.2　垂直差分

在总能量和总角动量守恒要求下，构造本模式的垂直差分格式。

2.5.2.1　地面气压倾向方程

式（2 .14）的差分近似为

$$\frac{\partial p_s}{\partial t}=-\sum_{k=1}^{NLEV}\nabla(V\cdot\Delta p)_k \tag{2.22}$$

其中

$$\Delta p_k=p_{k+1/2}-p_{k-1/2}$$

将式（2.19）代入，得到

$$\frac{\partial p_s}{\partial t}=-\sum_{k=1}^{NLEV}[D_k\Delta p_k+(V_k\cdot\nabla p_s)\Delta B_k] \tag{2.23}$$

这里

$$\Delta B_k=B_{k+1/2}-B_{k-1/2}$$

2.5.2.2　η 面垂直速度

式（2.16）的差分近似为

$$\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)_{k+1/2}=-\frac{\partial p_{k+1/2}}{\partial t}-\sum_{j=1}^{k}\nabla(V\cdot\nabla p)_j \tag{2.24}$$

由式（2.19），有

$$-\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)_{k+1/2}=\left[B_{k+1/2}\frac{\partial p_s}{\partial t}+\sum_{j=1}^{k}[D\Delta p+(V\cdot\nabla p_s)\Delta B]_j\right] \tag{2.25}$$

$\partial p_s/\partial t$ 是由式（2.23）确定。

2.5.2.3　垂直平流

预报变量 X 的垂直平流为

$$\left(\dot{\eta}\frac{\partial X}{\partial\eta}\right)_k=\frac{1}{2\Delta p_k}\left[\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)_{k+1/2}(X_{k+1}-X_k)+\left(\dot{\eta}\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)_{k-1/2}(X_k-X_{k-1})\right] \tag{2.26}$$

这种形式可以保证在差分近似时，没有虚假动能、位能或湿度的源（汇）出现。

2.5.2.4　静力方程

静力方程 2.15 的差分构造，是在第一层取单向差，其它层取中央差，即

$$\phi'_{1+1/2}-\phi'_1=-R_d(T_v)_1\ln\frac{p_{1+1/2}}{p_1}$$

$$\phi'_{k+1/2}-\phi'_{k-1/2}=-R_d(T_v)_k\ln\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}},$$

由第二式有

$$\phi'_{k+1/2}=\phi'_s+\sum_{j=k+1}^{NLEV}R_d(T'_v)_j\ln\frac{p_{j+1/2}}{p_{j-1/2}} \tag{2.27}$$

在整层上的位势高度偏差为

$$\phi'_k=\phi'_{k+1/2}+\alpha_k R_d(T'_v)_k \tag{2.28}$$

这里

$$\begin{cases}\alpha_1=\ln(p_{1+1/2}/p_1)\\ \alpha_k=1-\dfrac{p_{k-1/2}}{\Delta p_k}\ln\dfrac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}} \qquad (k\geqslant 2)\end{cases} \tag{2.29}$$

系数α的如上选取是由总能量和角动量守恒要求推出的。

2.5.2.5 气压梯度项

位势高度偏差由式（2.28）给定，则气压梯度项第二项为

$$R_d(T'_v\nabla\ln p)_k=\frac{R_d(T'_v)_k}{\Delta p_k}\left[\ln\left(\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}}\right)\nabla p_{k-1/2}+\alpha_k\nabla(\Delta p_k)\right] \tag{2.30}$$

可保证垂直差分不会引起虚假角动量的源（汇），但要求式（2.29）中$\alpha_1=1$。由此，应有$p_1=p_{1.5}/\mathrm{e}$。在本模式中由于取整层和半层的气压有如式(2.21)的近似关系，即$p_1=(p_{1.5}+0)/2$，则式（2.29）中$\alpha_1=\ln 2$。因此，本模式（也包括气象中心的谱模式）实际上并不保证角动量和总能量守恒，但是影响甚微。

将半层气压表达式（2.19）代入式（2.30）中，则有

$$R_d(T'_v\nabla\ln p)_k=\frac{R_d(T'_v)_k}{\Delta p_k}\left[\Delta B_k+C_k\frac{1}{\Delta p_k}\ln\left(\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}}\right)\right]\nabla p_s \tag{2.31}$$

其中

$$C_k=A_{k+1/2}B_{k-1/2}-A_{k-1/2}B_{k+1/2} \tag{2.32}$$

2.5.2.6 能量转化项——气压面垂直速度

在公式（2.12）中气压面垂直速度的差分近似的构造，是在绝热无摩擦情况下，要求模式大气总能量守恒。把式（2.17）改写为

$$\left(\frac{\omega}{p}\right)_k=\frac{1}{p}\int_0^{\eta_k}\nabla\left(V\frac{\partial p}{\partial\eta}\right)\mathrm{d}\eta+(V\cdot\nabla\ln p)_k \tag{2.33}$$

作如下差分近似

i）在式（2.33）中第一项写为

$$-\frac{1}{\Delta p_k}\left[\left(\ln\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}}\right)\sum_{j=1}^{k-1}\nabla(V\Delta p)_j+\alpha_j\nabla(V\Delta p)_j\right] \tag{2.34}$$

这里

$$\nabla(V\Delta p)_k = D_k\Delta p_k + p_s(V_k\cdot\nabla\ln p_s)\Delta B_k$$

ii）第二项

在式（2.31）中用 V_k 代 T_v，则有

$$(V\cdot\nabla\ln p)_k = \frac{p_s}{\Delta p_k}\left[\Delta B_k + C_k\frac{1}{\Delta p_k}\ln\left(\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}}\right)\right]V_k\cdot\nabla\ln p_s \qquad (2.35)$$

在式（2.30）中作了如下近似

$$\left(\frac{1}{p}\right)_k = \left(\frac{\mathrm{d}\ln p}{\mathrm{d}p}\right)_k \approx \frac{1}{\Delta p_k}\ln\left(\frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}}\right)$$

这就是式（2.20）

2.6　时间积分

首先对散度、温度和地面气压方程采用半隐式处理，并用时间滤波来抑制虚假的计算模。第二，对涡度方程的纬向平流部分 $U\frac{\partial q}{\partial\lambda}$，分出一线性项 $U_r(\mu)\frac{\partial q}{\partial\lambda}$，作半隐式处理，增大时间步长。

基本方程（2.10）～（2.14）的时间差分格式形式上可写为

$$\delta_t\zeta_\downarrow = ZT_\downarrow - \frac{1}{2a}\beta_{ZQ}\frac{\vec{U}_r(\mu)}{(1-\mu^2)}\frac{\partial}{\partial\lambda}\Delta_{tt}\zeta_\downarrow \qquad (2.36)$$

$$\delta_t q_\downarrow = QT_\downarrow - \frac{1}{2a}\beta_{ZQ}\frac{\vec{U}_r(\mu)}{(1-\mu^2)}\frac{\partial}{\partial\lambda}\Delta_{tt}q_\downarrow \qquad (2.37)$$

$$\delta_t D_\downarrow = DT_\downarrow - \nabla^2\mathrm{G}_\downarrow - \frac{1}{2}\beta_{DT}\nabla^2\left[\underline{\underline{r}}\,\Delta_{tt}T_\downarrow + \frac{R_dT_0}{P_0}\Delta_{tt}P_s\right] \qquad (2.38)$$

$$\delta_t T'_\downarrow = TT_\downarrow - \frac{1}{2}\beta_{DT}\underline{\underline{\tau}}\,\Delta_{tt}D_\downarrow \qquad (2.39)$$

$$\delta_t P_s = PT - \frac{1}{2}\beta_{DT}\vec{v}\Delta_{tt}D_\downarrow \qquad (2.40)$$

这里，符↓代表列向量；→代表行向量；底线=代表矩阵。ZT，QT，DT，G，TT 和 PT 分别表示公式（2.10）～（2.14）的右端项（不包括扩散项）。$\vec{U}_r$ 的分量 $U_r(\mu)_k$ 是在时刻 $t-\Delta t$，对每个高斯纬圈和第 k 个模式层上的最大和最小风速的算术平均，并乘以 $\cos\varphi$。行向量 $\vec{v}$ 定义为

$$\vec{v} = (\Delta P_1^r, \Delta P_2^r, \mathrm{L}, \Delta P_{NLEV}^r)。$$

Δ 矩阵 $\underline{\underline{\tau}}$ 定义为

需要全本请访问 www.ertongbook.com