

Daqi Shuzhi
Moshi ji Moni

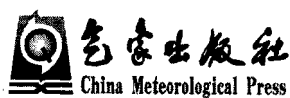
大气数值模式及模拟

© 王澄海 隆霄 杨毅 编著

兰州大学教材建设基金资助

大气数值模式及模拟

王澄海 隆霄 杨毅 编著



内容简介

本书系统讲述大气数值模式及其模拟的原理和方法。本书的内容包括:大气数值模式的基本概念;大气数值模式设计的基本方程和动力框架;初、边界条件的类型和给定方法;大气边界层及其陆面参数化方案;大气辐射、湿物理过程的处理方案;较新的资料同化方法等,最后给出了几种最新的大气模式、陆面模式的模拟试验和资料同化的个例,并简介了新版中尺度模式 WRF 的基本特点。

本书可作为大专院校大气科学及相关专业的本科生和研究生教材,也可作为大气科学专业及相关领域的科研人员的科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大气数值模式及模拟/王澄海等编著. —北京:气象出版社,2011.1

ISBN 978-7-5029-5114-6

I. ①大… II. ①王… III. ①大气动力学-数值-模拟
②大气动力学-数值模拟 IV. ①P435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 236824 号

Daqi Shuzhi Moshi ji Moni

大气数值模式及模拟

王澄海 隆霄 杨毅 编著

出版发行:气象出版社

地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总编室:010-68407112

网址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:张锐锐 李太宇

封面设计:博雅思企划

印刷:北京奥鑫印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:500 千字

版次:2011 年 1 月第 1 版

定价:45.00 元

邮政编码:100081

发行部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:19

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

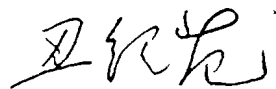
本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

序

随着计算机技术的快速发展，大规模计算能力显著提高，以卫星和雷达等遥感技术为主的资料日益丰富，数值天气预报在1~3天的预报上取得了巨大成功；大气数值模式的应用也由原来的以天气预报为主的中尺度天气模式，扩展到气候模式、气候系统模式和地球系统模式。同时，大气化学、陆面、生态等模式的建立并耦合进大气模式，既促进了大气模式的发展，也对大气模式提出了新的要求。大气数值模式已成为认识气候系统和预测未来气候不可替代的工具。

对于大气科学专业的学生，数值天气预报是一门重要的课程。这不仅是因为数值天气预报已成为天气预报业务的主要手段，更重要的是基于数值天气预报发展起来的大气数值模拟试验已经成为大气科学研究中不可或缺的手段。随着短期气候预测及对未来气候变化展望的迫切要求，大气数值模式的教学会越来越重要。近10年来，国内已经出版了几本供大学生使用的有关数值预报的教科书，然而在这些年里，大气数值模式也在不断地发展、变化。例如，大气模式的基本物理框架日渐稳定，而在数值模式中有着重要作用的初、边界条件确定的内容和技术近年来发展较快；原来的过滤模式、静力平衡模式已为非静力平衡模式所替代；对大量不同时刻、不同质量的观测资料提高初始场质量的新方法也不断涌现；模式也向多尺度统一模式的方向发展。

为适应大气数值模式的这种变化和发展，及时改进大气数值模式教学内容的变化，王澄海教授和隆霄、杨毅博士编著了《大气数值模式及模拟》。该书把数值天气预报的内容重新进行了整理和归类，去掉了一些过时的内容，增加了近年来建立发展起来的物理参数化方案，充实了大气资料同化的内容，并在最后给出常用的GCM, RegCM, LSM及资料同化方法的个例模拟分析试验，增加读者对运行大气模式的知识。全书兼顾数值模式基本思想、基本概念和数值模式发展的新内容，辅之以实际的数值模拟试验的研究结果，这将有助于增进广大读者对大气数值模式方法的理解和数值模式新发展的了解。



2010年5月25日

*丑纪范，中国科学院院士。

前言

近年来，随着信息技术的革命性发展，计算和通讯技术得到了高速发展。与此同时，全球气候变化引起社会各界的关注，也是大气科学获得前所未有的发展的动力之一。近年来，以天气气候预测为主要手段的大气数值模式的发展，取得了引人注目的成就。大气科学模拟试验的手段和工具，由原来的大气数值模式，已发展到气候系统模式和地球系统模式。因此，本书的编写是基于以下科学背景和目标的：

(1) 在过去的20余年间，大量的、各种大气尺度和外部条件的外场观测试验，加深了人们对大气物理过程的认识；高速发展的计算机技术和通讯技术，使得大规模计算条件和技术得到了显著提高，不同时段和不同来源的资料日益丰富。人们已跳出了Charney等人限于计算条件和资料匮乏的桎梏，正压模式、过滤模式已成为过去。几乎所有的模式都采用了原始方程模式。但目前的有关教材中仍然有相当大的部分在讲授这些过时的、不再使用的内容和技术。

(2) 数值天气预报已取得长足的发展，中尺度天气模式已经可以在很大程度上成功地模拟预报出3天以下的天气变化。气象科研人员曾经致力于中期数值天气预报的努力，已发展为今天的短期数值气候预测，“天气预报”已延伸到了气候预测，天气模式已扩展至气候模式、气候系统模式和地球系统模式。主要用于预报天气的大气模式已发展到诊断和再现天气气候事件、深入认识和理解天气气候事件发生发展物理机制的重要实（试）验工具。

(3) 计算技术的高速发展，给大规模计算带来了便利。今天几乎所有的计算机，均可以实现多操作环境，完整地运行一个的模式。Linux/Unix操作系统下的多种脚本文件，可以方便快捷地把一个庞大的模式计算包链接起来，因此，几乎大气科学专业的学生都可以快速地掌握和运用模式。模式不再是高不可攀的领地。

(4) 丰富的计算程序库，把人们从过去繁重、重复性的工作中解脱了出来。不再需要从模式框架开始建立模式，只要借鉴一个成熟的模式框架，就可以方便地构建具有自己独特物理方案的模式。

(5) 复杂多变的天气气候现象及其带来的灾难，和人们日益提高的生活水平之间的矛盾更加突出，对大气科学工作的要求越来越高。大气模式由最初的天气预报工具，已变为深入认识大气物理过程不可替代的试（实）验工具。通过敏感性试验，可以解释和加深对发生的天气、气候事件的认识和理解，为进一步完善模式提供科学依据，也是唯一能够科学、定量地对人类今天的活动可能的后果提供科学依据的试验工具。如现在街头巷尾谈论的CO₂等

温室气体增加引起的可能后果，只有气候模式才能定量科学地提供可能发生后果的依据。

(6) 随着人们对自然界认识的不断深入，影响人类生存环境中的诸多过程的发生发展规律日渐被人们所认识，在此基础上，人们建立起了包括环境、生态、作物、气体扩散、水文等的模式且日臻完善，这些模式都需要大气模式提供驱动条件。科学发展对大气数值模式的需求日益迫切。

(7) 本科生的认知能力、大气科学从业人员的科学素养和技术水平日渐提高。

基于上述原因，一本清楚介绍大气模式“基本概念、基本知识、基本技能”的读物是尤为迫切的。因此，我们整理萃取了前辈研究成果的精华，加上我们在教学过程中的一些经验和认识，编著此书，以飨读者。

本书的编写分工是：王澄海教授编写了第一章，第四（部分）、六、七、八、十（部分）章；隆霄编写了第二、三、五章，杨毅编写了第四（部分）、九、十（部分）章。最后由王澄海教授对全书进行了统稿。

在本书编写过程中，得到了兰州大学邱崇践教授、张镭教授的支持；丑纪范院士在百忙中给予了指导并为本书作序。张选泽完成了全书LaTeX的编译，其他研究生也参加了本书稿的校对工作，在此一并致谢。

王澄海

2010年12月

目 录

序

前言

第一章 大气数值模式概论	1
§ 1.1 数值模拟的思想	1
§ 1.2 原始方程组、全球模式、区域模式和非静力模式	3
§ 1.3 中尺度模式及流体非静力模式	6
§ 1.4 滤波及滤波技术	7
§ 1.5 关于模式的几个概念	10
§ 1.6 天气的可预报性、集合预报和季节到年际预报	11
第二章 大气运动基本方程组	13
§ 2.1 旋转坐标系中的大气运动基本方程	13
§ 2.2 几种坐标系中的大气基本方程组	15
§ 2.3 大气基本模式方程组的垂直坐标变换	20
§ 2.4 气候模式的基本方程组	26
第三章 数值计算方案	30
§ 3.1 微分方程的差分化	30
§ 3.2 时间积分方案	35
§ 3.3 空间差分格式与大气中有关物理过程	36
§ 3.4 平流方程的差分格式及误差分析	45
§ 3.5 非线性方程的计算稳定性	54

第四章 初始条件与边界条件	58
§ 4.1 初始条件及初始化	59
§ 4.2 边界条件	78
§ 4.3 集合预报	84
第五章 原始方程模式	87
§ 5.1 正压大气模式	87
§ 5.2 斜压大气的模式方程组及其积分性质	90
§ 5.3 斜压模式方程的空间差分格式	95
§ 5.4 斜压原始方程模式的数值解法	101
第六章 原始方程谱模式	103
§ 6.1 球面谱模式的展开函数和因变量的选择	103
§ 6.2 任意函数的球谐函数及其性质	105
§ 6.3 谱展开中的波数截断	109
§ 6.4 原始方程谱模式	112
§ 6.5 基本变量和谱展开式	122
§ 6.6 截谱方程和谱倾向值的计算	124
§ 6.7 垂直方向上的离散化	127
§ 6.8 时间积分方案	132
第七章 模式物理过程参数化	139
§ 7.1 次网格尺度过程和雷诺平均	141
§ 7.2 辐射参数化	143
§ 7.3 云微物理过程参数化	155
§ 7.4 湿热力过程和积云对流参数化	162
§ 7.5 大尺度凝结过程	165
§ 7.6 对流参数化方案	171
第八章 边界层模式及其参数化	189
§ 8.1 大气边界层中的次网格过程	191
§ 8.2 边界层参数化处理方法	194
§ 8.3 边界层模式	204
§ 8.4 边界层过程及其参数化方案	209
§ 8.5 陆面过程及其参数化方案	212

第九章 资料同化基础	225
§ 9.1 引言	225
§ 9.2 函数拟合	228
§ 9.3 逐步订正法	230
§ 9.4 最优插值法	233
§ 9.5 变分法	239
§ 9.6 大气资料的三维变分同化方法	242
§ 9.7 大气资料的四维变分同化方法	244
§ 9.8 观测资料及其质量控制	247
第十章 几种数值模式及模拟试验举例	251
§ 10.1 WRF模式及数值试验	252
§ 10.2 雷达资料同化及其个例	259
§ 10.3 RegCM模式及数值试验	265
§ 10.4 LSM模式及数值试验	268
§ 10.5 GCM模式及数值试验	271
附录 A 有关地图投影的基础知识	273
附录 B 球谐函数及连带勒让德函数的有关知识	278
参考文献	290

第一章 大气数值模式概论

§ 1.1 数值模拟的思想

大气科学研究的最终归宿是做出令人满意的天气和气候预测。由于大气运动的非周期性，因而我们无法采用像潮汐预报那样的方法来预报天气。但另一方面，大气在某一特定时刻的状态与另一时刻的状态之间存在着简单的因果关系。基于这个想法，V.Bjerknes (1904) 把天气预报问题定义为大气运动方程组的积分。

Richardson在1921年发表的论文《运用数值方法的动力预报》中，提出了数值预报的最初思想。他论述了数值预报的原理和可能性，他提出利用数值方法对运动方程进行积分，并指出了具体实现的可能性；1922年，他第一次对解决这一问题进行了实践。Richardson应用完全的原始方程组，以德国为中心，水平网格距为200 km，垂直分为四层，格距约为200 hPa，模拟范围包括了全德国的模拟方案，利用1910年5月20日0007Z的观测资料，计算了德国中部0004-0010Z的气压时间导数，预报的6 h气压变化达146 hPa，而实际上地面气压变化很小。这个结果似乎表明了其方法是不成功的。而Richardson则将这次失败归之于模式所取初值的不准确。他的失败曾使人们一度怀疑数值天气预报的实际可能性。尽管这样，“他的工作的价值是无法估量的”。后来对他的工作的研究发现，当时观测资料的匮乏确实是导致他的试验尝试失败的主要原因。这一点在今天看来是显而易见的，而在当时要认识到这一点是极其困难的，需要独具数理基础的慧眼。当时的Richardson也意识到了这一情况。“然而Richardson工作的真正价值在于，它一劳永逸地使在该领域里未来研究工作者将要面对的基本问题具体化，并为这些问题的解决打下了坚实的基础。”人们公认，在数值预报的历史上，G.Richardson这一开创性的工作是里程碑式的。

在此后很长的一段时间里，没有人再沿着Richardson的思路进行尝试和实践。但Richardson坚信，问题的解决有赖于观测网的加密和计算技术的提高。在此后的几十年间，随着地面和高空观测网密度和范围的增加，大容量高速计算机的发展，在第二次世界大战结束之后，数值天气预报重新引起了人们的注意。特别是人们在认识到Richardson失败的原因，不仅仅来自于初值不符合地转平衡，还在于他所用的方程组的解中不仅包含了长波等慢过

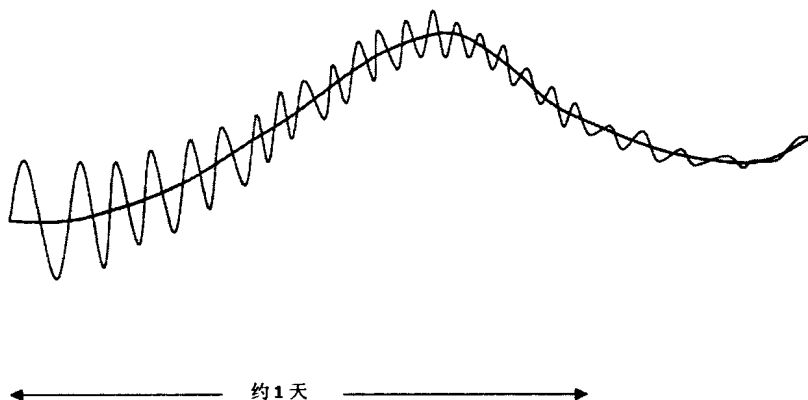


图 1.1 具有缓变的与天气变化有关的预报和叠加高频重力波的预报示意图。尽管慢变波的预报基本上不受重力波存在的影响，但初始时间导数的数量级很大，与Richardson(1922)的实验结果一致（Kalnay, 2003）

程，还包含了高速传播的声波和重力波等快波。这些快波的实际振幅都很小，但在计算过程中常被扩大，导致其掩盖了预报中的气象信号的“初始变率”，甚至导致计算不能进行下去（图1.1）。

人们再次尝试解决Richardson的问题。针对方程组中包含的快波问题，人们开始探索对大气进行简化“滤波”。1949年Charney和Eliassen通过推导出“过滤”运动方程解决了这两个问题，该方程以准地转平衡（变化缓慢的）假设为基础，在气压场变化中滤掉了（即不包含）重力波和声波。Charney指出，根据预报员的实践经验，仅仅使用只有气压变化的天气图就可以预报出明天的天气。这种实践，其实包含了准地转理论的应用，也即并没有使用水平散度的概念，这样做可以消除重力波和声波，因此，这种近似是合理的。建立的简化方程组，也就避免了声波和重力波的影响。Charney同时也认为，在取第一近似时，则必须考虑Richardson关于水平散度的值问题。在这个思想指导下，1950年，Charney, R.Fjörtoft和Von Neuman（1950）设计了准正压（一层）滤波模式，使用世界上第一台电子计算机（电子数字积分计算机，ENIAC）首次成功地对北美地区500 hPa的位势高度场的24 h变化作出了预报，也成为历史上第一个1天的数值天气预报。与Richardson的结果相比，预报结果和观测到的24 h变化之间在“型”上是相似的。Charney也认为，数值天气预报可以用完全的原始方程实现。1951年他开始尝试用Richardson最初建立的原始运动方程组进行预报。

大气运动中包含了多尺度的波动，Charney也提出了“次网格尺度物理过程参数化”（凝结、辐射、热量、动量和水汽湍流通量）的概念。提出了用气象资料客观分析取代繁重的手工分析——资料同化过程（见第九章），即用观测资料和短期预报来估计初始状态。

Charney也认为天气的可预报性存在一个上限（Lorenz估计为两周）。当然，使用集合预报也许会提高这个预报时限。Rossby在瑞典的大型计算机上进行了相似的试验，并首次用于预报业务（实时）。美国NCEP（即原来的美国国家气象中心或NMC）的NWP在20世纪50年代开始用于业务预报。1955年至1973年期间，开始做北半球预报，1973年扩展到全球。

过去的几十年间，用于天气、气候预测和模拟的大气数值模式得到了快速发展，预测水平得到了显著的提高。图1.2a给出了数值预报技巧可用记录的演变情况。用S1评分（Teweles, Wobus, 1954）评价了北美500 hPa等压面位势高度水平梯度36 h 预报的相对误差。美国NMC根据实践经验认为，S1评分达到或超过70%，预报几近无用，达到或低于20%的预报为基本上完美的预报。

图1.2a显示，目前北美地区36 h 500 hPa预报已经在很大程度上接近于40年前我们所期盼的“完美”预报。数值预报已经能够很好地预测在36 h内的大尺度大气波动的位置和强度，以及主要的高低压系统的中心位置。尽管近年来，对诸如导致夏季降水的锋面系统、中尺度对流系统等的海平面气压系统的预测，已经有了显著提高，但更为细致的一些中小尺度大气结构的预报仍然存在着困难，其S1评分仍然比20%高不少（见图1.2b）。图1.2a也显示出，目前的72 h预报同10 ~ 20年前36 h的预报准确程度相当，对于如降水等预报变量的预报技巧提高较大。图1.2表明，过去的几十年间，模式水平得到了显著提高，这主要是由于业务大气模式中分辨率的提高和近似表达的减少，对小尺度物理过程方法的改进（云、降水、热量、水汽、动量的湍流输送和辐射），使用了更好的资料同化方法，模式的初始条件更加合理，观测资料密度的增加，尤其是海洋和南半球的卫星资料和飞机资料等（Kalnay, 2003）。

§ 1.2 原始方程组、全球模式、区域模式和非静力模式

原始方程组就是指大气运动遵从的物理规律：三维动量守恒（运动方程），能量守恒（热力学第一定律），干空气质量守恒（连续方程），在所有相态下的水汽守恒方程，理想气体状态方程。因为方程组的解中包括有快速重力波和声波，在对这些方程进行时空离散化的时候要求使用较小的时间步长，或者用一些方法使快波慢下来。

对于水平网格距大于10 km的模式，一般使用静力近似，因为相对于重力加速度，垂直加速度（浮力）是可以考虑忽略的。利用这种近似，可以非常方便地用气压取代高度来作垂直坐标。连续的运动方程可以使用时空离散的方法来解，例如有限差分方法（见第三章）。研究表明模式的精确度受到模式空间分辨率的强烈影响：一般来说，模式的空间分辨率越高，模式的精确度就越高。然而，分辨率的提高是要付出高昂代价的。例如，要使三维空间的分辨率提高1倍，就要求时间步长减半，这样才能满足计算稳定性条件的要求。因此，为了使模式分辨率提高1倍，其代价是要付出24倍的计算代价（三维空间加一维时间）。现代用

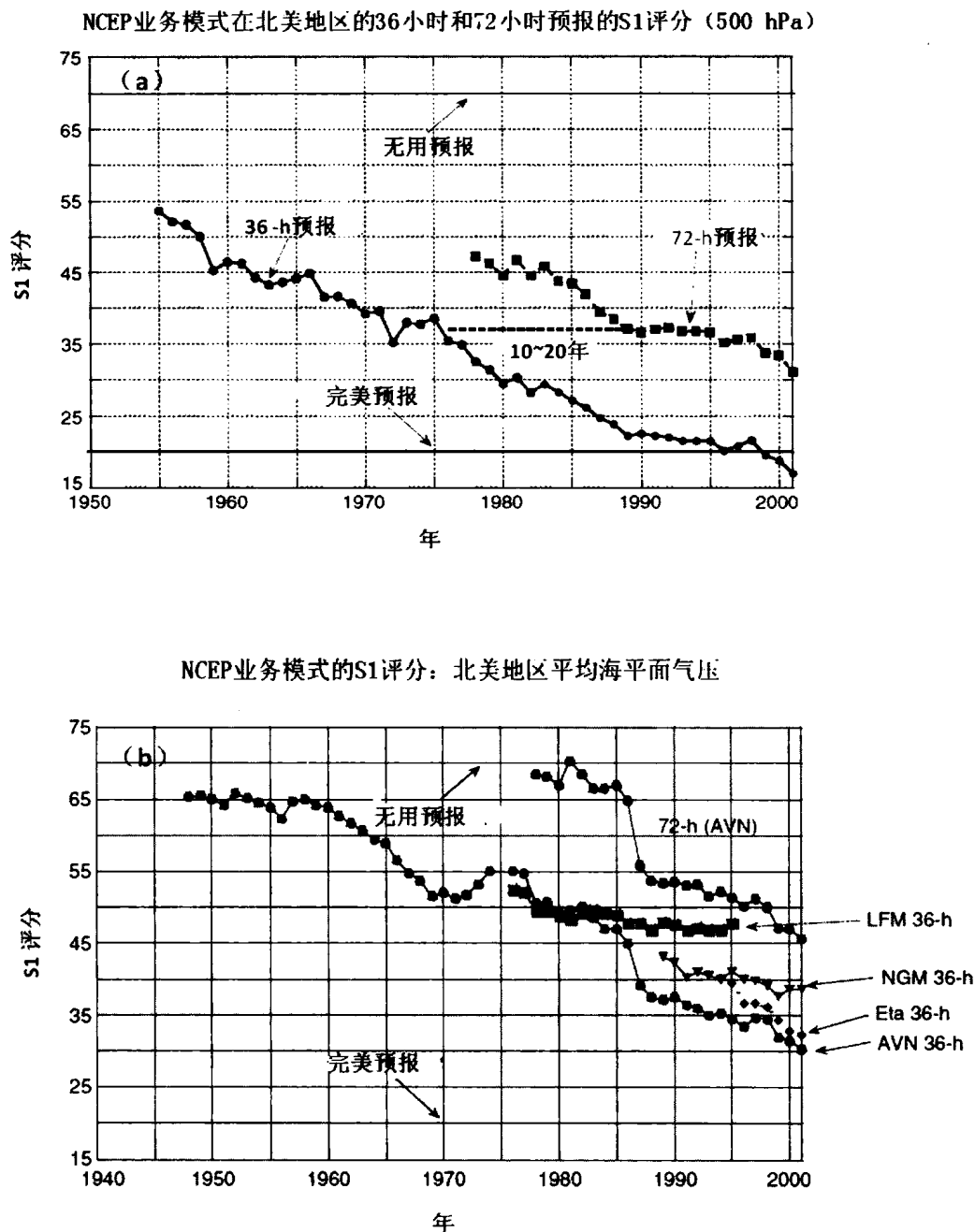


图 1.2 (a) 北美地区500 hPa NCEP (原NMC) 模式业务预报技巧的历史演变。S1评分度量了研究区平均水平气压梯度的相对误差。根据经验, 该评分值 $S1=70\%$ 和 $S1=20\%$ 分别表示“无用”预报和“完美”预报(注意, 当前的72 h预报技巧相当于10~20年前36 h预报的技巧); (b) 与图(a)相同, 但为北美地区海平面气压预报的S1评分, 表示全球(AVN)和区域预报(LFM, NGM和Eta)的结果(Kalnay,2005)

于既可以提高模式的精度、计算量又不大的方法是采用半隐式和半拉格朗日时间积分方法。这些方法在时间步长方面具有较少的苛刻条件，同时具有较高的空间离散精确度。不过，为了更好地预报天气，高分辨率肯定是一个发展趋势。当“守恒”方程组在一个已知的网格大小上被离散化的时候（具有代表性的网格距为从几千米到几百千米）必须添加一些“源、汇”，原因是一些物理过程的尺度太小以至于不能显式地为模式所分辨。举个例子，气压坐标的水汽守恒方程一般可以写成如下的形式：

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + \bar{\omega} \frac{\partial \bar{q}}{\partial p} = \bar{E} - \bar{C} + \frac{\partial \overline{\omega' q'}}{\partial p} \quad (1.1)$$

其中 q 为水汽与干空气质量之比， x 和 y 为某种适当地图投影下的水平坐标， p 为气压， t 为时间， u 和 v 为空气水平运动速度（风速）分量， $\omega = dp/dt$ 为气压坐标系下的垂直速度，位于方程右边的乘积项代表在离散时网格不可分辨尺度的水汽湍流输送，变量上面的横线表示所用模式网格点上的空间平均。习惯上常称方程左边为模式的“动力过程”，可以显式地进行计算（见第三章）。

方程右边则代表我们所说的模式“物理过程”。对于水汽方程来说，还要包括诸如蒸发和凝结等物理过程 $\bar{E} - \bar{C}$ 的作用，还要考虑那些无法在动力部分分辨的、发生在小尺度上的水汽湍流输送。这些发生在次网格尺度上的物理过程对于方程来说就是源和汇，需要通过那些大气动力部分中能够以显式表示的变量来进行“参数化”（见第七章）。用于数值天气预报的模式有两种：全球模式和区域模式（见第二章）。全球模式一般用于中期预报（超过2天）中的指导，或用于气候模拟。例如在NCEP，全球模式每天都做16天的预报。由于全球模式的水平区域为整个地球，因此不可能以较高的分辨率运行。对于更为详细的预报就需要提高分辨率，并且只能做所关心的有限区域内的预报。区域模式用于短期预报（一般为1~3天），其分辨率较之全球模式要高两倍或更高。为了既减少计算量，又能满足业务对空间分辨率高的需求，在关键或需要的区域增加空间分辨率。例如，NCEP在1997年所使用的全球模式在垂直方向上有28个坐标面，水平分辨率在第一星期为100 km，第二星期为200 km。区域模式（Eta）运行的水平分辨率为48 km，垂直为38个坐标面，以后在白天分别提高到29 km和50个坐标面。正是由于其具有较高的分辨率，区域模式比全球模式有较高的精度，并有模拟较小尺度天气过程的优势，例如锋面、飑线等；而且在描述地形强迫方面要远好于全球模式。另一方面，区域模式也有它的不足，因为与全球模式不同，区域模式在其水平区域的边缘需要侧边界条件，因此不是“自治的”。边界条件必须尽可能地精确，否则区域模式的内解（interior solution）很快就会变坏。

区域模式必须“嵌套”到另一个分辨率较低的模式中，利用这个较低分辨率模式的结果为区域模式提供边界条件。由于积分（模拟、预测）时间的长短与模式积分区域大小成比例，高分辨率模式的初始场受边界条件的影响较大。因此，区域模式仅仅用于短期模拟预

报。在很大程度上,区域模式只不过是低分辨率模式在区域模式的模拟区域上预报的放大而已。因此,区域模式常用来做低分辨率模式的动力降尺度的工具。尽管如此,区域模式仍然在诸如制作较长时间(从季节到多年的)的气候模拟时采用,这是因为做较长时间的模拟时,采用的模式分辨率一般较低,而一个“区域气候模式”可以为我们提供在所关心区域的、较为详细的低分辨气候模拟结果。

近来,一些区域模式已将分辨率提高到几千米,可分辨风暴尺度的过程。在这些模式中,不再使用静力近似,因为它对于水平尺度为10 km或更小的系统不精确。例如,美国已开发了几个非静力中尺度模式用于日常预报业务,如广泛使用的ARPS模式、MM5模式、NCEP区域谱模式(RSM模式)和美国海军海气耦合中尺度预报系统(COAMPS)模式。未来的发展趋势是,所有的预报模式中都采用非静力模式的动力框架。

§ 1.3 中尺度模式及流体非静力模式

一般的天气过程在时空尺度上属于 β 中尺度,因此,以天气尺度系统为预报和模拟对象设计的数值模式,称作中尺度数值模式,也称为天气模式。中尺度模式以假定垂直方向是否满足静力平衡分为静力和非静力模式,当然,二者的动力方程和物理过程的描述也有差别。流体静力近似涉及在垂直运动方程中,与重力加速度相比较时,垂直方向上忽略垂直运动加速度。当水平运动尺度大于垂直运动尺度时,这是一种非常好的近似,甚至对于层流的情况也是如此。流体静力方程的主要优点是滤掉了声波(那些水平传播的波动或Lamb波除外)。因为计算稳定性问题,去掉声波使得模式在积分时可以用较长的时间步长(至于Lamb波,一般是采用半隐式时间格式来处理)。

如果运动的水平尺度远大于其垂直尺度,流体静力近似是非常精确的。对于水平网格距量级为100 km的大气模式,使用流体静力方程很精确也很方便。更进一步,对于准地转(较缓慢)运动,甚至水平尺度与垂直尺度量级相当时,流体静力方程也是精确的。换句话说,流体静力近似甚至可以用于网格距大小为10 km或10 km以上的中尺度模式而不会引起大的误差。

为了在模式中能够表示那些与浮力相比,垂直加速度不可忽略的较小尺度现象,例如风暴或对流云等,必须使用非流体静力近似的运动方程组。因此,在1990年代,人们为了模拟北美的一些中尺度现象而开发了一些流体非静力模式,其中包括宾州大学/NCAR的中尺度模式MM5、CAPS区域预报系统、NCEP的区域谱模式、中尺度可压缩模式MCC、CSU的RAMS模式和美国海军的COAMPS模式。在欧洲和日本也开发了一些其他的非静力模式。

一般说来,声波对大气没有影响,但声波的存在要求模式以非常小的步长积分。由

于声波的传播要依赖大气的可压缩性（三维散度），因此一些流体非静力模式使用了准Boussinesq或“滞弹性”近似。其中，假设大气被分离为流体静力基本态和扰动部分，并且除了在浮力项中外，密度扰动均被忽略。或者在气压梯度项中使用的人工“散度阻尼”，可以采用隐式时间格式——这种格式是无条件稳定的（第三章）。

能够有效处理声波的流体非静力模式（如半隐式格式）在计算上可以与静力模式不相上下，甚至对全球数值预报模式来讲，未来几代的模式可能成为流体非静力的。

§ 1.4 滤波及滤波技术

波动是大气运动的主要和重要形式。大气中可能出现的波动是多种多样的。大气中包含5种主要波动（声波、Lamb波、重力惯性外波、重力惯性内波、Rossby波），通常的大气场分布特征是各种尺度波动综合叠加的结果。

声波 是由大气的可压缩性所产生的一种波动。由大气动力学知道，声波的相速度决定于基本气流和大气的热性质而与波长无关，纯声波是非频散波。声波的传播速度 $c = (330 \pm 10)\text{m/s}$ 远远大于空气运动速度。声波的运动对天气的影响是微不足道的。

Lamb波 忽略旋转，并假定波动仅沿水平方向传播（无垂直速度），但考虑流体有重力层结，这样产生的水平声波，称为Lamb波。它是外水平声波的一种，即使当静力近似成立时，模式中仍有Lamb波。这意味着原始方程模式（静力平衡成立）中包含快速移动的水平声波，Lamb波也是非频散波。

重力惯性外波 大气和海洋的运动都受到地球旋转的影响，同时重力也对大气和海洋的运动产生作用。纯重力外波是一种快波。同时相速与波数有关，是一种频散波。

重力惯性内波 层结大气中，在重力和地球旋转作用下形成的波动称为重力惯性内波，这种波动既可以沿水平方向传播，也可以沿垂直方向传播。研究重力惯性内波的控制方程组通常采用Boussinesq近似，也即部分地考虑密度扰动对运动的影响：只保留与重力相耦合的密度扰动项，连续方程中忽略密度扰动的作用，热力学方程中保留密度扰动的影响。同样，它属于快波。重力惯性内波的相速度和群速度垂直，是一种非地转运动，相速与波数有关，是一种频散波。水平辐散辐合是非常重要的。

Rossby波 是北半球中纬度大气对流层上层出现的一种波动，沿纬圈大约3~5个波，传播速度与风速相当。这种波动就是大气长波，主要是由地转参数随纬度变化引起的波动。

正压大气中Rossby波是由绝对涡度守恒控制的一种波动， β 效应是它得以传播的最主要机制。Rossby波相速度与波数有关，是一种频散波。Rossby波是一种大尺度波动具有准地转性质。

在一些模式设计时，有时为了计算稳定，需要滤除掉快波，保留有天气意义的慢波。就

是所谓的“滤波”。

滤波是数值天气预报中一种非常重要的技术。从滤波的方法上来说，大气模式中的滤波可以分为两种，一种是动力学滤波，一种是技术性滤波。第一种滤波方法主要从方程组动力学特性中去滤除大气运动中所关注尺度的“噪声”，从而保留该种尺度大气主要特征。第二种是在实际的数值预报试验中，针对由于混淆误差所产生的短波系统采用的平滑方法来处理的方法。首先我们介绍针对重力惯性波滤除的第一种滤波方法。

1. 重力惯性波的过滤

声波、重力波、Rossby波产生的物理原因不同，其特征频率、传播的特征速度对天气变化所起的作用也不同。层结大气中的高频声波对实际天气现象几乎没有什么显著的作用，只对静力平衡的恢复和重建作出贡献；对于中尺度运动，旋转大气中的重力内波是重要的，重力内波还对地转平衡的恢复和建立作出贡献；对于大尺度运动，Rossby波是最重要的。由于高频声波、重力波不但对大尺度运动的贡献不大，而且还会给数值方法积分基本方程组带来困难。由于初始观测资料误差和计算舍入误差所引起的虚假的大振幅高频声波、重力波往往会使得具有天气意义的大尺度运动遭到歪曲，致使数值计算失败。在此我们通过分析准地转近似和准无辐散近似来讨论滤波方法的优劣。

模式方程组为浅水方程组：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

线性化之后的方程组为：

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) u' - f v' + g \frac{\partial h'}{\partial x} = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \frac{\partial v'}{\partial x} - \beta v' + f_0 \frac{\partial u'}{\partial x} = 0 \\ \lambda_2 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) h' - \lambda_2 \frac{f_0 \bar{u}}{g} v' + H_0 \frac{\partial u'}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

其中 λ_1, λ_2 为示踪系数，当 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$ 表示扰动速度满足地转关系，涡度方程中除散度项外都取地转近似，这样的近似称为准地转近似；当 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$ 表示假设运动是水平无辐散的。把波动解带入以上方程中，可以得到如下频率方程：

$$[\beta - k^2(\bar{u} - c)][\lambda_1 \lambda_2 (\bar{u} - c)^2 - g H_0] + \lambda_2 f_0^2 [(\bar{u} - c) - \bar{u}] = 0 \quad (1.4)$$