

数值 天气 预报 概论

朱抱真 陈嘉滨

商务出版社

0456.7
2B2

数值天气预报概论

朱 抱 真
陈 嘉 滨

主编

TW-5/17



气象出版社

106163

内 容 简 介

本书概述了数值天气预报的历史、现状和未来发展。讲解了数值天气预报的基本原理、预报模式、数值预报产品的应用及中长期数值天气预报等方面的知识。全书编写简洁，讲述清晰，语言流畅，内容深浅得当。

本书适用于广大气象科技工作者和基层气象台站的业务人员，也可供气象院校师生和其它有关人员学习参考。

数值天气预报概论

朱抱真 陈嘉滨主编

责任编辑 陆 勇

* * *

气象出版社

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本: 787×1092 1/32 印张: 5 字数: 109 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数: 1—2,000

统一书号: 13194·0339 定价: 1.20 元

前 言

当代天气预报的发展方向是以流体力学的规律为基础的数值预报。近年来数值预报已成为天气预报技术的主流。国家气象局北京气象中心于1982年开始, 传真广播我国的原始方程预报模式的短期数值业务预报。现又正在准备开展中期和长期数值业务预报。

数值预报根据地球流体动力学原理建立预报模式。现代化的模式是只作了准静力近似的简化原始方程形式的流体动力学、热力学方程组。这类模式能够包括地形、摩擦和下垫面加热等物理作用。通过已知的初始场对方程组进行数值积分, 在保持计算稳定性的情况下, 可以算出未来的大气演变, 最后输出一系列的预报产品。整个预报流程, 从测报的资料整理, 作为初始场的天气图客观分析以及预报模式的计算和预报结果的输出等, 构成一个自动化系统。这是数值预报工作者的工作。

天气预报员和数值预报工作者的工作有所不同。但天气预报员需要了解上述数值预报工作的概要内容; 特别是数值预报的基本原理以及业务预报模式的性能等。这样才能更好地利用数值预报的结果, 作出准确的天气预报。

《气象》杂志在1983—1984年, 曾连载“数值预报讲座”。现对各讲作了一些修改和补充, 编写成册, 以饷读者。

朱 抱 真

1984年5月

目 录

第一章	数值天气预报的发展历史和现状	朱抱真 (1)
第二章	资料处理和客观分析	吴辉碇 (13)
第三章	大气运动的控制方程组	陈嘉滨 (26)
第四章	数值方法(一)——有限差分法及线性计算不 稳定	陈嘉滨、季仲贞 (42)
第五章	数值方法 (二) ——非线性计算不稳定	季仲贞 (59)
第六章	数值天气预报模式中的物理过程 (一)	张道民 (71)
第七章	数值天气预报模式中的物理过程 (二)	纪立人 (85)
第八章	国家气象局业务预报模式	葛蔼芬、李泽椿 (99)
第九章	数值预报产品在天气预报中的利用	朱抱真 (118)
第十章	中期数值天气预报的若干问题和展望	纪立人 (128)
第十一章	长期数值天气预报	郭裕福 (142)

第一章 数值天气预报的发展历史和现状

一、数值天气预报的提出和首次试验

1. 数值预报的“梦想”

一百多年以前，自从有了天气图分析以后，天气预报技术开始走进了科学的领域。长期以来，天气预报方法是根据预报员所掌握的气候背景、天气变化的理论知识、统计关系以及个人经验加以综合的。因此预报结果常因人而异，天气预报技术在很大程度上是经验的，而不能成为精确的科学。

早在1913年，近代气象学奠基人之一，皮叶克尼斯 (V. Bjerknes) 作为莱比锡大学第一个地球物理学教授时，发表了著名的演说。提出了将物理学的理论方程组应用到实际大气中，根据现在所观测的状态计算未来的天气状态。这当然是一个非常艰巨的设想，它的实现在气象学史上走了很曲折的道路。几年以后，里查孙 (L. F. Richardson) 对这种设想作了大胆的试探。他使用原始形式的运动方程、连续方程、热力学方程和水汽方程，还考虑了复杂的辐射和地表面的物理过程。他把大气在垂直方向上分为五层，水平方向上分成南北方向上为200公里，东西方向上为3个经度的网格，从而把全球划分为3200个格点。然后把描写大气变化的各个变量写在格点上，再作差分计算。如果利用当时的计算工具，估计在12小时以内作出一次24小时预报，需要64000人才能

完成。他想像在一个巨大的圆球型建筑物内，按照全球大气的格点划分座席，每席4人，在中央舞台上，一个指挥领导全体计算员，利用灯光信号，协调地进行运算。在当时这无疑只是一个“梦想”。

2. 首次试验

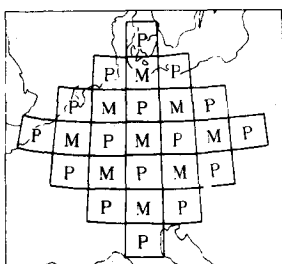


图 1.1 里查孙的首次数值
预报使用的网格
P 为气压，M 为动量

在1916—1918年第一次世界大战中，里查孙作了一次非常小规模的计算。利用1910年5月20日07点的欧洲中部的地面天气图作为初值。高空风用测风气球外插，高层温度用山脉观测值外插。然后对中欧一个地点的地面气压作了一次6小时的数值预报（参见图1.1）。经过繁重的运算，得到了6小时145百帕的气压变化。这当然是

个不合理的数值。以后又反复校对，并没有发现计算上的错误。这个世界上首次的数值天气预报试验没有成功。在1922年里查孙出版了一本236页的巨著《利用数值方法的天气预报》，详细地叙述了动力学模式，物理过程和数值分析以及计算的实例。试验虽然没有成功，但发人深思的是，他当时所设计的整个模式方案和当前世界上流行的初始方程预报模式非常相近。

二、数值预报实现的科学基础

数值天气预报在首次试验失败后，直到五十年代初期在

美国普林斯顿大学才试验成功。在这三十多年的时间里，有三个方面取得了重要的进展。

1. 大气探测技术的进展

三十年代初期，大气探测技术有了很大的进展。利用无线电探空仪，可以观测到地面以上各层的气压、温度、湿度和风。由于高空观测网的建立，人们可以绘制高空天气图。在这以前，只有地面天气图的分析。且人们注意的仅是在大洲的范围内运动的天气系统，特别是锋面上的气旋族的活动，水平尺度是几百公里到一、两千公里；由于高空观测网的建立，绘制的高空天气图可以扩大到洲际范围，从而发现在大气的平均层500百帕高度上，盛行偏西风的基本气流，在它的上面叠加着一些波长为四、五千公里的大型波动——长波。长波的流型比较简单，在一定程度上又和地面天气图上的气旋族相联系着。高空图的绘制使得人们掌握了三度空间大范围的大气观测资料，并使人们的眼界扩展到半球范围内大尺度大气运动。

2. 长波理论的提出

也许是最重要的一个环节是动力气象学的进展。在分析高空长波运动的基础上，杰出的气象学家罗斯贝（C. G. Rossby）在三十年代末期创建了长波理论，这是气象学史上第一个成功的大气动力学模式。这个异常简化的大气模式，把大尺度长波运动和复杂的锋面气旋分离开来。长波按照“涡度守恒规律”在地球上运行。这个异常简化的模式却非凡的成功地解释了大尺度大气运动，即抓住了复杂的大气运动的主要物理机制。更重要的是这个模式是在天气实践的基础上建立起来的，它符合客观大气的实际变化。因此这个理论具有指导实践的意义。正象地球物理学科的其它分支一样，理

论的最终考验是它的预报能力。长波理论不但为传统的天气图预报方法提供了许多理论知识的应用，也为数值预报打下了坚实的物理基础。

3. 计算数学和计算技术的进展

当物理上的基础问题有所解决，动力学模式的控制方程决定后，接着的问题是如何在数学上求解以及如何能使计算的速度大大超过天气变化的速度。

由于大气运动最简单的预报模式也是非线性方程，只能用数值方法求解。这就会出现计算稳定性问题。1928年三个数学家得到了著名的保持差分计算稳定性的判据，即所谓 CFL 条件：作差分计算时，外推的时间步长必须小于波动通过空间格距所需要的时间。因此要作的算术运算量是惊人的。直到四十年代后期，计算机的速度有了很大发展。1950年，著名的动力气象学家查尼 (J. G. Charney) 等在普林斯顿高级研究所的 ENIAC 电子计算机上，用了12小时的计算时间成功地算出北美洲地区的一张24小时预报图。这样，本世纪初气象学家的“梦想”，到五十年代才得以实现。

三、地转预报模式的成效

上述三方面的进展可以说是构成现代数值天气预报的科学基础，特别是第二方面关于大型天气动力学机制的突破。二十年代，里查孙没有成功也是由于这三个方面的因素。可以设想，即使当时有了高空观测网和高速电子计算机，他所设计的模式仍然不会成功。五十年代数值天气预报的成功是从地转模式着手的，也就是通过大气动力学的研究，人们认识到大型天气过程具有准静力和准地转的特征。

1. 控制方程组

从皮叶克尼斯到里查孙等都认为天气变化遵循一般的流体力学规律，想用一般的流体力学方程描写天气变化。这时如果采取固定于地球上的高度（ z ）坐标，则有下列的控制方程：

运动方程

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.3)$$

热力学方程

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q \quad (1.4)$$

连续方程

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1.5)$$

状态方程

$$p = \rho RT \quad (1.6)$$

水汽方程

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{\rho} S \quad (1.7)$$

其中 Q 表示加热率， S 表示水汽源汇，它们可以设法用大气的基本变量 u 、 v 、 w 、 p 、 ρ 、 T 表示出来。其它符号与一般相同。

里查孙设计的模式和上列方程类似。这个方程组不但包括大尺度长波一类的慢波，也包括重力波和声波一类的快波。

由于后者对方程的数值方法求解造成很大的困难，在数值天气预报中首先可以抓住那些对大型天气演变最核心的长波，暂不考虑那些快波的作用。

2. 准静力特征

大尺度长波运动的主要的动力学机制首先是它的准静力特征。在大尺度运动中，任意一个地点的气压可以相当精确地等于该地上空的空气柱重量，即(1.3)式的右端近似为零。这时可以写成

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1.8)$$

这就是准静力关系。通过这一关系，在高空天气学中，引进了等压面分析，定义位势高度为

$$d\phi = g dz$$

则(1.8)式改为

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p} \quad (1.9)$$

(1.1)–(1.5)式也改写成 p 坐标系

$$-\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1.11)$$

$$c_p \left(-\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial p} \right) = \frac{1}{\rho} \omega + Q \quad (1.12)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (1.13)$$

上列5个方程构成便于高空天气分析预报使用的 p 坐标方程组。

3. 准水平特征

大型天气过程的第二个特点，是它的运动基本上是准水平的运动，即垂直运动很小。作为第一近似，先把大气看作准水平运动，这时方程组变为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = f v - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -f u - \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \phi u}{\partial x} + \frac{\partial \phi v}{\partial y} \right) \quad (1.16)$$

(1.16)式是表示水平运动的连续方程。将(1.15)式对 x 微分，(1.14)式对 y 微分，再相减则得到涡度方程

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + \beta v = -(f + \xi) D \quad (1.17)$$

其中的 ξ 为涡度， D 为散度

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

4. 绝对涡度守恒

大尺度天气运动的又一个特征是散度的数量比涡度小得多。这样可把运动作为准无辐散的，即 $D \approx 0$ 。这时(1.17)式可改写成

$$-\frac{d}{dt}(f + \xi) = 0 \quad (1.18)$$

这就是著名的绝对涡度守恒原则。它非常简明，但却抓住了大型运动的最主要的动力学机制。

5. 准地转特征和滤波模式

大型天气运动的另一个重要的特征是准地转性。在高空

天气图分析中，可以看到风和等高线近于平行；风的大小和等高线梯度成比例，也就是风和等高线有地转关系

$$fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad fv = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

地转涡度为

$$\xi_g = \frac{1}{f} \left(-\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = \frac{g}{f} \Delta z \quad (1.19)$$

这时 (1.18) 式改为

$$\Delta \frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \left(f + \frac{g}{f} \Delta z \right) - \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left(f + \frac{g}{f} \Delta z \right) \quad (1.20)$$

上式只包括一个变量 z ，它相当于大气的平均高度，即500百帕上的高度。右端的意义是地转的涡度平流。这是最简单的正压地转模式，也就是世界上首次成功的数值天气预报模式。通过上述的一系列假设，这个模式中不再含有任何快波，只具有大尺度的慢波，也就是说在这个模式中把快波滤掉了。因此也称为“滤波模式”。

(1.20) 式虽是非常简化的模式，但它的右端仍是非线性的。即使这样简单的非线性方程也只有快速电子计算机上运算，才能使预报的时效赶上天气变化的速度。前述查尼等首次成功的数值预报是对北美洲范围的地区内，在ENIAC小型计算机上花费12小时，利用(1.19)式作出了24小时预报。这只是在学院里的研究室的实验结果，但它显示着数值预报在实践上的可能性。

要使数值预报付诸实用，还必须快速地整理出预报区域内的观测资料，并用客观方法结合前次预报值将资料进行分析，得到差分格点上的初值。这就是说必须在预报模式的计算以前，作好资料处理、客观分析和初值形成的工作。在模

式预报计算好以后，还要把预报结果输出并传真广播，发布天气预报。这样才能实现数值天气预报的业务化（如图1.2）。因此当资料处理和客观分析的方案研究成功，以及在中型电子计算机出现后，五十年代中期开始了正压地转模式的数值预报业务。

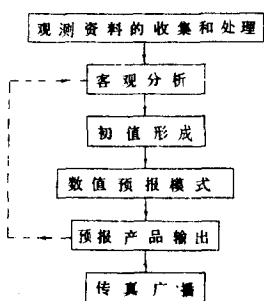


图 1.2 数值天气预报业务化流程

6. 地转斜压模式

正压地转模式，虽然抓住了大型天气的最根本的动力机制，能够预报大尺度系统的移动，但却不能较好的预报系统的发展。因为大型天气运动中垂直运动和散度虽然很小，对天气系统的发展却起着重要的作用。于是人们首先在地转模式中考虑了大气的斜压性，开始构造包含垂直运动和散度作用的斜压地转模式。即把(1.19)式用于(1.9) — (1.13)的方程组，再把整个大气在垂直方向上分层。最简单的斜压模式是两层，随着计算机的发展，增加到三层至五层。

地转斜压模式虽然包括了天气系统发展上很重要的斜压性，但业务预报的实践证明，地转斜压模式对天气预报评分的提高并不是很显著的。主要原因是天气系统的发展很复杂，斜压性发展只是其中的一类过程。象重力波一类的快波在天气系统发展，特别是在剧烈天气演变中仍是重要的。这时运动性质是非地转的，地转模式不能预报这类发展过程。另外，影响大气演变的许多物理因子，象山脉地形、辐射和下垫面加热过程在地转模式中都只能作很粗的考虑，这也影响了天

气系统发展的预报。因此到六十年代，人们重新开始探索不用地转概念，直接使用原始形式(1.1)–(1.7)的方程组作预报模式。

四、数值天气预报的蓬勃发展

1. 数值预报的巨大进展

数值预报从五十年代初期的地转模式得到成效开始，至今已三十多年的历史。前十五年主要是用简单的准地转、准绝热模式作短期预报，进展缓慢。六十年代中期开始，由于卫星探测技术，高速大型电子计算机的进展以及大气环流数值模拟的成功，数值预报有了迅速的发展。

当前，数值预报模式使用的是(1.1)–(1.7)式的原始方程，只对(1.3)式作准静力关系的近似。另外对非绝热加热 Q 和水汽收支 S 都作了细致的考虑。在垂直分层上可达十几层。这样，预报模式从过去简单的准地转、准绝热的半球少层模式，发展到复杂的非地转，非绝热的全球多层模式。数值预报的显著进展包括下列两个方面：

(1) 预报的项目和质量显著提高了。原始方程模式不仅提供了高空形势的预报，还提供了地面气压场的预报；它不只是预报三度空间位势高度，还能预报温度和湿度；另外对降水的预报也有了改善。

(2) 预报时效显著提高了。现在全球大气预报模式已能对5天的演变过程作出比较准确的业务预报。1个月的平均形势预报也提出了有希望的途径。

目前世界上科学技术发达国家的气象中心都建立了上述的现代化数值预报业务。大型天气过程的形势演变，短中期预报主要依靠数值预报。短期的天气要素预报则利用根据模

式预报的基本要素值，算出各种物理量（如涡度、稳定度、垂直运动等），作为数值预报模式的产品输出，再结合统计关系，作出区域性天气要素的预报。另外，还将全球标准等压面上高度、温度和水汽的格点资料，存储在便于电子计算机调用和检索的存取库中。它不仅为经常的预报业务，也为气候应用以及气象研究提供了便于使用的基本资料。

2. 数值预报发展方向

当前数值预报虽然有了这样蓬勃的进展，但它对异常复杂的天气变化的预报能力仍是很有局限的。这主要是由于到现在为止，人们对天气变化的物理学规律的了解还很不完全，大气探测和计算技术也还不够完备，所以到现在为止，短期的降水量，中尺度的剧烈天气，大尺度形势的剧烈变化以及十天以上的天气过程等的预报都还没有成功。今后数值预报的发展方向主要将在下列三个方面开展工作：

（1）建立中尺度数值预报模式，研究中小尺度的灾害性剧烈天气预报。除了研究中小尺度特有的动力学机制外，还需要有更详细的观测资料和计算速度更快的电子计算机。

（2）利用全球大气模式研究10—15天的中期预报，包括中期过程的动力学问题，中期预报实例的诊断分析和误差分析等。

（3）从长期过程动力学的观点，探索一个月以上的长期数值预报途径。

五、结 语

从以上的回顾和展望，可以看出数值预报已成为天气预报现代化的主流。虽然天气预报技术至今仍不能把数值预报作为唯一的方法，但它在天气预报技术整个领域中占着主导

的地位,天气预报正在从传统的以天气图经验为主的预报技术,向着以数值预报为主的客观预报发展。这是天气预报历史的发展趋势。

目前世界上愈来愈多的国家的气象中心都拥有以原始方程预报模式为核心的现代化数值预报业务。我国国家气象局北京气象中心在中国科学院大气物理研究所和北京大学地球物理系的协作下,已经开始建立了这种现代化数值预报业务。从1982年初开始传真广播预报图,并将陆续提供更多的数值预报产品。我们相信,在我国气象科学现代化的建设中,数值天气预报必然日益蓬勃发展。

参 考 文 献

- [1] G. W. Paltzman, A retrospective view of Richardson's book on Weather prediction, BAMS, 48, 514—551(1967).