

第一讲 数值天气预报的 历史发展和现状

朱抱真

(中国科学院大气物理研究所)

一、数值天气预报的提 出和首次试验

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上了科学的领域。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) 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。几年以后，里查逊 (L. F. Richardson) 对这种设想作了试探。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 5 层，水平方向上分成南北 200 公里，东西 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 64,000 人才能完成。在当时这无疑只是一个“梦想”。

在 1916—1918 年第一次世界大战中，里查逊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）。经过运算，得到了 6 小时 145 毫巴的气压变化，这当然是个不合理的值，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失败了。在 1922 年里查逊出版了“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

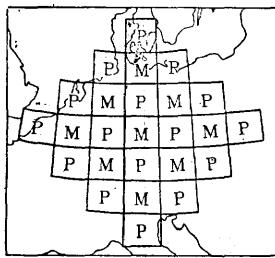


图1.1 里查逊的首次数值预报使用的网格
P为气压，M为动量

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：

第一，三十年代初期，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、湿度和风等气象要素，建立起高空观测网。在这以前，只有地面天气图的分析，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的范围，从而发现在大气的平均层500毫巴高度上，盛行偏西风的基本气流，上面叠加着一些四、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。

第二，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，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。这个模式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符合客观大气的实际变化，因此其理论具有指导实践的意义。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。

第三，计算数学和计算技术有了飞跃的进展。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C. F. L条件，即差分计算时，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，二十年代气象学家的“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，里查逊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。

从皮叶克尼斯到里查逊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，则有下列的基本方程：

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:

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

状态方程:

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

水汽方程:

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

其中 Q 表示加热率, S 表示水汽源汇, 其它符号与一般相同。读者可参阅本刊的动力气象讲座。

里查逊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, 由于后者而对方程的数值方法求解造成很大的困难。在数值天气预报中暂可不考虑快波的作用。

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, 任意一地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 $\phi = gz$, 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。

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, 这时方程组变为

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

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

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

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

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

其中的涡度

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \text{ 散度 } D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}.$$

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) 可改写成

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

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。

大型天气运动的另一个最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：

$$fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, fv = \frac{\partial \phi}{\partial x} \text{ 地转涡度}$$

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

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（500毫巴）。右端的意义是地转的涡度平流，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，这个模式中只具有大尺度的慢波，而把快波滤掉了，因此也称为“滤波模式”。(1.20) 式虽是简化的模式，但它的右端仍是非线性的，这样简单的非线性方程也只有在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。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。在模式预报计算好以后，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）。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。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，但对天气系统的发展却也起着重要的作用。于是人们首先在地

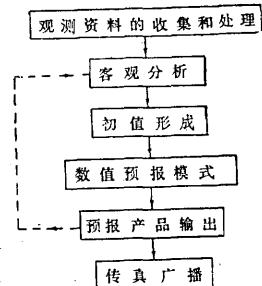


图 1.2 数值天气预报业务化流程

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) 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 3 层至 5 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。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。像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，像山脉地形、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

数值预报从五十年代初期的地转模式得到成效开始，至今已有三十多年的历史。前 15 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) 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。数值预报巨大的进展有：

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。目前世界上科学技术发展的国家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；短期天气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、稳定性、垂直运动等），作为数值预报模式产品输出，再结合统计关系，作出区域性天气要素的预报。另外，还作出全球标准等压面上高度、温度和水汽的格点资料，并存储在便于电子计算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便于使用的基本资料。

当前数值预报有了蓬勃的进展，但由于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。此外，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。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。我国也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。因此希望广大的预报员学习了解数值预报的原理，在工作中有效地利用这些产品，提高天气预报水平。

这一讲座正是配合当前天气预报业务工作的要求，以原始方程预报模式为中心，介绍数值天气预报的概要。本讲座共有 11 讲，第二讲是介绍资料处理和客观分析；第三讲介绍数值天气预报方程组；第四、五讲是关于数值计算方法中的线性不稳定和非线性不稳定问题；第六、七讲是阐述各种物理过程；第八讲介绍北京气象中心现用的业务模式；第九讲介绍数值天气预报产品的利用；最后两讲将分别介绍中期和长期数值预报的现状。

参考资料

- [1] G. W. Peltzman, BAMS, 48(1967), 514—551.
- [2] 朱抱真，天气预报现代化的途径，*大气科学*，1979。