

SHUZHITIANKIYUBAOQIANTAN

数值天气预报

浅谈

丑纪范
杜行远
郭秉荣

气象出版社

数值天气预报浅谈

(修订本)

丑纪范 杜行远 郭秉荣

气象出版社

内 容 简 介

本书以比较浅显的方式讲述了数值天气预报的一些基本知识。这次再版时，作者根据数值天气预报的最新发展，增写了中期天气数值预报，充实了长期天气数值预报的内容，有关短期天气数值预报的章节，只作了少量的删改。

本书是一本专业性中级读物，可供广大气象台站工作者和气象爱好者阅读参考。

数值天气预报浅谈

(修订本)

丑纪范 杜行远 郭秉荣

* * *

气 象 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市京华印刷总厂第六分厂印装

新华书店北京发行所发行

* * *

开本：787×1092 1/32 印张：2.8125 字数 58 千字

1983年2月第2版 1983年2月第2次印刷

印数：4,001—14,000 统一书号：13194.0017

定价：0.30元

再 版 说 明

这一版增加了第五章《中期天气数值预报》。
对《长期天气数值预报问题》这一章作了补充，改正了若干其它章节的排印错误。

编 者

一九八二年四月

前 言

数值天气预报发展到现在已有三十多年的历史。近十多年来,短期天气数值预报有了很大的发展,它在许多国家的气象预报业务中已占主导地位。数值天气预报是天气预报现代化的方向。为了有助于广大气象台站的气象工作者和气象部门的有关人员初步了解数值天气预报的基本内容,《气象》月刊在1979年曾连载“数值天气预报浅谈”。应读者的要求,我们对原有内容作了一些修改和增补,编写成这本小册子。

数值天气预报是利用电子计算机求大气动力学方程的数值解制作天气预报的。用到的数学知识比较多,但基于浅谈的目的,本书内容几乎完全避免引入数学公式或计算,这是一种尝试,难免对一些问题谈得不深入、不全面,为了弥补这些不足,书中插绘了若干示意图。

在编写时引用了国内外一些作者的科研成果,但本书是数值预报基本知识的介绍,故对作者的姓名未逐一书明,对引文亦未指明出处,希见谅。

编 者

目 录

第一章 数值预报的产生和特点	(1)
一、天气预报发展的必然结果.....	(1)
二、数值预报方法的由来.....	(2)
三、第一次试验.....	(3)
四、“适应”和“演变”.....	(7)
五、滤波.....	(10)
第二章 数值预报的方法	(13)
一、准地转一层模式.....	(13)
二、大气的斜压性.....	(15)
三、平衡模式.....	(18)
四、原始方程模式.....	(21)
第三章 数值预报与电子计算机	(27)
一、电子计算机的组成部分与功能.....	(27)
二、天气预报电影.....	(31)
第四章 气象资料在数值预报中的使用	(33)
一、资料处理.....	(33)
二、客观分析.....	(35)
三、初值化和四维同化.....	(39)
四、同步电子计算机.....	(42)
第五章 中期天气数值预报	(46)
一、中期数值预报的制作方法.....	(47)
二、中期数值预报的效果与问题.....	(51)
第六章 长期天气数值预报问题	(59)

一、可预报性.....	(59)
二、“长”与“中”、“短”的关系.....	(60)
三、非绝热性.....	(62)
四、加热场和温压场的相互调整适应.....	(64)
五、反馈作用的调节器.....	(66)
六、海气相互作用.....	(66)
七、下垫面的能量储放和环流的历史演变.....	(73)
八、长期天气运动的确定性与随机性.....	(74)
第七章 趋势和问题	(76)
一、当前的水平.....	(76)
二、模斯与人机结合.....	(78)
三、多时刻观测资料的使用.....	(81)
四、面临着新的任务.....	(83)

第一章 数值预报的产生和特点

最近二十多年来，一种天气预报的新方法在迅速发展，这就是天气数值预报。现在，数值预报已成为气象工作现代化的一个重要组成部分，成为衡量一个国家天气预报发展水平的重要标志之一。数值预报最终应在天气预报中起主导作用，这是科学发展和实现气象科技现代化的必由之路。

一、天气预报发展的必然结果

我国是世界文明发达最早的国家之一，我国劳动人民在长期的生产实践斗争中，积累了丰富的看天经验。远在公元前一千多年，我国甲骨文就有关于天气的记载。世代积累下来的关于天气的谚语，成为当时预报天气的主要方法。但是它发展成为一门近代的自然科学，可以说还是本世纪的事情。十七世纪，由于气压计和温度计的发明，开始有了简单的气象观测站，观察天气的变化。尔后又相继发明了湿度计和风速仪，这时著名的波义尔定律也提出来了，使得对大气动力学的了解迈开了第一步。由于无线电通讯技术的发明和应用，更为气象科学带来了革命性的变革，世界各地气象台站的观测资料，这时可以同时汇集起来了，于是各地气象台现在普遍使用的预报方法——天气图预报方法便诞生了。1820年德国人伯恩德斯根据39个观测站的数据制作了世界上第一张天气图。随后人们对天气现象逐步有了科学的了解。1917—1919年间一系列的工作刺激了挪威极锋学说的产生和发展。三十年代以后，无线电探空仪的发明和应用、高空

资料的增多，宣告了间接高空学时代的结束，出现了以气压场为中心的长波理论和气压系统的发展理论等。

群众经验、单站预报和天气图预报方法在很大程度上依赖预报人员的经验，存在着不客观不定量的缺点。这样人们很自然的希望寻找出一种客观定量的预报方法，就是说，希望把天气预报问题化为数学问题，然后用计算的方法作出定时、定量的预报，而不依靠各人的经验来估计。天文学在这方面树立了卓有成效的榜样，它用天体力学的方法预测行星的移动，并形成了研究自然现象的数学物理方法。

二、数值预报方法的由来

最初，刻卜勒(1571—1630年)根据哥白尼(1473—1543年)的思想，从行星是围绕太阳运动的观点，对地谷·勒拉格(1546—1601年)在20年内不间断地辛勤观察所得到的关于行星运动的大量精密观测资料进行分析研究，终于发现了行星运动的基本定律，即所谓刻卜勒行星三大定律。但是为什么行星的运动会遵循这样的定律呢？他回答不出来。1619年他将第三定律(周期定律)刊布在一本书里，这本书意味深长地叫做《宇宙的和諧》。牛頓从物质一般运动规律的观点把它概括起来便发现了万有引力的存在。指出：行星的运动之所以会有这种规律性是行星受万有引力作用而运动的结果。并根据万有引力定律和运动定律从理论上推导出刻卜勒的行星运动定律来。从哥白尼、刻卜勒到牛頓逐渐形成了预报天文现象的天体力学方法。这种方法是追根求源，找出天体运动的原因——万有引力。天体在这种力的作用下，遵循牛頓运动定律——力等于质量乘加速度。先根据天体的相互位置算出万有引力，再算出天体运动的加速度，而由观测知道的天

体的位置和移动速度，可以算出某一时间间隔以后的位置和天体在新的位置上的速度，这样一步一步地推算下去，就可预报出天体运动的情况来。这种方法的实质就是将自然现象所服从的客观规律表述为物理和力学的定律，这些定律又用数学的语言写成数学方程，这样便把自然现象的研究归结为数学问题，用数学计算的方法来解决。这可以叫做数学物理方法。牛顿的同时代人哈雷（1656—1742年）用这种方法去研究慧星的运动。当时，慧星被人们看成是一种很神秘的现象，哈雷通过计算断定1759年将出现慧星。虽然哈雷未能亲自验证自己的预言，而当这一预言真的应验了以后，近代自然科学就这样在天文现象的预报上打响了第一炮，并在欧洲引起了极大的热情。被恩格斯誉为是“科学上的一个勋业”的天外行星——海王星的发现，使人们更清楚地看到数学物理方法的应用可以取得多么大的成就。这就无怪乎气象学家很早以前就想用这种方法作天气预报。本世纪初挪威气象学家维·比扬克尼斯首先把气象预报问题提成数学问题：根据某一时刻实测的某些大气状态和运动，通过描述大气运动规律的微分方程，来计算将来某一时刻的相应大气状态和运动。但是当时要求解这种方程是极为困难的。英国的数学家里查逊勇敢地作了第一个尝试。

三、第一次试验

1922年里查逊出版了一本书，名叫《用数学计算的方法作天气预报》。这是他按照维·比扬克尼斯的提法进行的实践。面对这组极其复杂的描写天气运动的方程式，里查逊首先提出用差分求解的办法。他看到这个复杂的方程可以写成这样的形式：方程的左端表示某一大气要素在一个点固定的

瞬时变化，右端表示在同一点上几种状态要素和它们在水平方向和垂直方向的空间微商的非线性的结合形式，而不包含时间微商。只要方程的右端可以计算出来，各要素的瞬时变率就知道了。困难在于，大气中直接可测的量只有气压 p 、温度 T 、水平风速 u 、 v 而垂直速度 w 还不能直接测量，因此如何通过 u 、 v 、 p 和 T 来表示 w 是关键，里查逊通过数学推导解决了这个问题。下面我们通俗地说明一下里查逊提出的差分求解的办法的大致意思。

例如，牛顿运动方程

$$F = ma,$$

其中 F ， m ， a 分别为作用力、质量和加速度。我们知道空气所受的力有的可直接测量（如压力），而有的可根据观测结果计算出来。例如，由于空气在水平方向上分布的不均匀性所产生的气压梯度力，由于空气在自转地球上运动引起的地转偏向力等，都可由观测结果计算得到。尽管在不大的范围内地转偏向力的作用很小，可以忽略不计，但当所讨论的范围扩展到几百公里，甚至几千公里时，则地转偏向力就成为很主要的一个力了。至于空气的质量（ m ），我们已知质量等于密度（ ρ ）乘体积，而密度可由 p 、 T 算出，我们就可根据牛顿运动定律计算加速度。

这样，在某一时刻，根据测量的风（即空气运动的速度）与计算得到的加速度 a ，我们就可预报未来空气运动的速度——风了。这里根据的是另一个公式，即：

$$V_t = V_0 + at,$$

式中 V_t ， V_0 ， t 分别是预报时刻的风速、初始风速及时间。根据这些关系，就不难作出预报，不过必须把时间间隔取得很小，以保证在这段时间间隔内，加速度的变化小到可以忽

略不计，把得到的预报结果，再看作初始时刻的观测结果，重新计算这个时刻的加速度，再作下一时刻的预报，如此一步一步地推算，直到我们要求的预报时刻为止。

这里说的“把时间间隔取的很小，以保证在这段时间间隔内，加速度的变化小到可以忽略不计”是什么意思呢？譬如说，要作24小时的预报，如果我们把根据初始时刻的资料计算出来的加速度，简单地乘上24小时，然后把这个乘积和初始时刻的风场相加，作为24小时以后风的预报值。这样作的预报结果，其准确率是不会高的。这是因为，在这24小时之内，加速度可以有很大的变化，这种变化随时随地都在产生。图1中给出了加速度在24小时之内随时间变化的示意图。图中自上而下，三种情况的时间间隔分别为24，4，1小时。虚线和实线之间的面积（阴影部分）代表预报误差。可以看出，时间间隔取得越小，预报效果越好。

里查逊求解方程作天气预报的思路，大体上如此。他做了一次数值预报，其结论是伦敦地面3小时变压为70mb，而实际上那次伦敦地面3小时变压几乎没有什么变化。数值预报第一次试验就这样失败了，当时找不出失败的原因。里查逊强调了资料缺乏，观测误差太大。事实也确实如此，当时只掌握了欧洲地区地面的一些极不完全的资料，完全没有高空资料。此外，里查逊注意到要实现这种预报，计算量很大。据他估计，如果一个人日夜不停地进行计算需要64,000天才能算出24小时预报，也就是说，相当于要64,000人工作才可以和天气“赛跑”。在电子计算机出现以前，要完成这项任务实际上是不可能的。因此，他曾设想：“在某一天，当计算速度比天气发展速度更快的时候，这种预报是可能的。”里查逊完全没有估计到科学技术的神速发展，仅在不到四分之一

世纪以后，就出现了世界上第一台电子计算机，由于人们对它的计算能力感到惊奇而被命名为“MANIAC”（狂人），就是利用这台电子计算机，第一次成功的实现了天气数值预

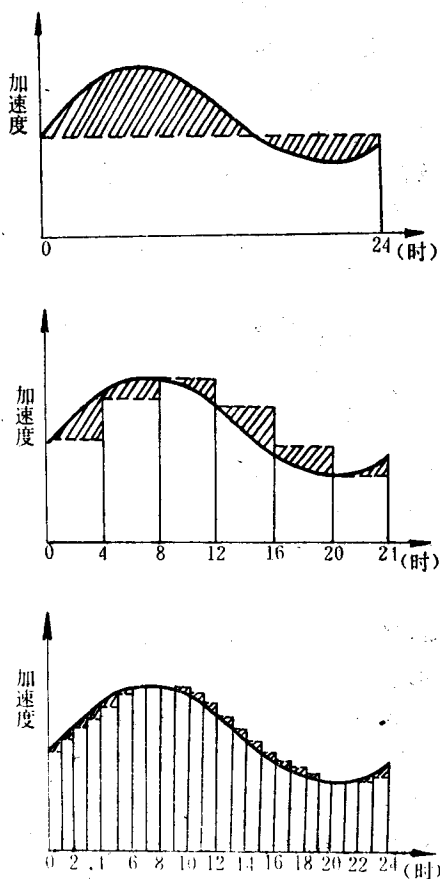


图 1 不同时间间隔加速度变化示意图
(虚线表示计算值 实线表示实际值)

报，这在当时的气象界是轰动一时的。但是应该指出，数值预报的成功并不完全是因为有了电子计算机，里查逊的失败还有其它原因。现在我们知道了，即使有现在这样的观测资料和电子计算机，用里查逊那个办法做预报仍然还是要失败的。

四、“适应”和“演变”

1922—1950年气象工作者进行了大量的理论和实践工作，逐步从一般的流体运动中认清了大气运动的物理机制，自然也就找出了里查逊失败的原因。

由于无线电探测技术的发展，三十年代以后，高空气象资料增多，人们对天气预报实践经验的积累，发现在中高纬度高空风总是接近于地转的，这就是说地转偏向力和气压梯度力是接近相等的。知道大气运动具有这样的特点以后，就容易看出里查逊从运动方程直接计算加速度时，是计算地转偏向力和气压梯度力两个大量的小差，对于预报起作用的时间

微商项只有气压梯度力和地转偏向力的 $\frac{1}{10}$ 到 $\frac{1}{100}$ ，也就是

要从两个大量的差中来计算这个小而重要的量。如果观测和计算没有足够的精确度，那是办不到的。比如希望计算时间

微商项的精确度为其本身大小的 $\frac{1}{10}$ ，那么就要求计算气压梯

度和测风的准确度达到它本身大小的 $\frac{1}{100}$ 或更高，这在当

时是达不到的。这就从计算过程本身看清了里查逊失败的原因，但这只是表面的。很自然的会产生这样的问题，为什么我们希望预报的运动具有接近地转的特点？而大气中的其它

运动并不都具有这种特点？这就需要深入了解大气运动的动力过程。

现在我们所指的运动方程是表示流体运动的普遍规律，它描述大气中所有可能的运动，应该设法将不同形式的运动加以分类。人们是这样作的，只考虑小振幅运动，也就是大气相对于静止状态的小振动，这样就可以把非线性方程组化为线性方程组，因为对小振幅的运动而言，非线性项的作用是小到可以忽略的。为了研究问题方便起见，还假设地转参数 $f = 2\omega \sin\varphi = \text{常数}$ （这对沿经圈伸展不太长的区域是合理的）。这时，由方程组看出，如果运动在某一时刻是地转关系并满足静力平衡，则永远保持地转关系并满足静力平衡，因为这时运动已经是定常的，根本不随时间改变。我们把地转关系和满足静力平衡的运动称为第一类运动，而将这种定常的第一类运动以外的运动称为第二类运动。由方程组进行的数学分析看出，第二类运动是许多波的叠加，这些波又可进一步分为两类：一类移动速度接近于声波，称为声波；另一类运动速度与重力有关，称为重力波。正如已经指出的那样，如果在初始时刻只有第一类运动，那么永远保持只有第一类运动。如果在初始时刻，在某个区域 V 中，地转关系和静力的条件受到破坏，那么在这个区域中就会形成第二类运动——声波和重力波。这种快波向各个方向散开，而当它们离开区域 V 时，区域 V 中又将恢复地转和静力平衡的条件，也就是说只存在某种第一类运动。这种地转关系和静力条件的重建过程叫做气象场的适应。由此可见，大气中存在着适应过程。所谓适应过程是指大气运动趋于某种暂时的平衡状态。当静力平衡破坏时，产生几分钟的声振荡；而当地转平衡破坏时，则产生几小时的惯性重力振荡。由于声波和重力波传播四逸，

能量频散，结果使静力平衡恢复，地转平衡重新建立。

当考虑地表面曲率后， f 随纬度改变，这时候，发生了重要变化，第一类运动不再是定常的了，而是转变为缓慢的波的叠加，这种波的运动将导致地转条件的破坏。从上面的分析可知，在实际大气中不断产生两种竞争过程：（1）由于缓慢波的运动造成速度场和气压场的地转关系的破坏；（2）地转关系的破坏便激发出快波来，快波向四面传播消失而造成地转关系的重建——气象场的适应。

到现在为止，我们讨论的只是可用线性化动力学方程描述的小振幅波。在实际大气中，第二类运动——声波、重力波实际上几乎总是具有很小的振幅（因而形成对天气变化不重要的“气象噪音”）。然而，一般地说，第一类运动已不是小振幅的，不能再忽略非线性项的作用。这种非线性作用和考虑 f 随纬度变化一样，造成运动的非定常性，而由于这种非定常性导致地转条件的破坏，从而又引起第二类运动和适应过程。通常由于 f 随纬度变化和非线性作用所造成的地转条件的破坏是不大的。当非地转风产生时，就要激发出声波和重力波来，于是适应过程使地转平衡迅速重建起来，而这种重建过程相对于天气过程来说是极为短暂迅速的，所以运动总是近似满足地转平衡的。我们看到对天气变化重要的大气运动就是在一个基本上平衡着的场上发生的，这种平衡就是气压梯度力和柯氏力相平衡的地转关系。由于变化是绝对的，而平衡是相对的，地转平衡总是不断地被破坏又不断地建立，“破坏”与“适应”总是处于对立统一之中，而天气变化就是在地转平衡的破坏和建立的矛盾斗争中发展起来的。我们把第一类运动的缓慢变化（由于 f 随纬度变化和非线性作用引起的非定常运动）称为演变过程，把第二类运动

所导致的地转平衡的建立称为适应过程，由于第一类运动的振幅大而第二类运动的振幅总是很小，由此，我们明白了为什么在中高纬度的高空风总是接近地转的。对大气运动进行了如上的分析和分类之后，我们就可以清楚地看出预报天气所需要计算的正是演变过程（气压场的变化过程），而流体力学方程组中，既包含演变过程也包含适应过程，气压场的变化是这两种过程的综合表现，显然适应过程的时间变率是很大的，如果不加处理就难免得出气压系统要按声波来移动了。原来里查逊之所以失败，原因之一就是这种“气象噪音”的干扰造成的，这就是问题的内在原因和物理背景。于是人们很自然的要设法排除这种干扰，也就是说怎样来简化流体力学方程，使得所简化的方程能够精确地描述对天气重要的第一类运动——气压场的变化。而在它的解中不包含对于天气不重要的第二类运动——声波和惯性重力波。这在数值预报中就称为“滤波”。

五、滤 波

一个完整的准地转近似滤波方法是由基培尔提出来的。在中高纬度，对短期天气预报说来，由地转参数决定的时间尺度 $\frac{1}{f_0}$ 与大气运动的特征时间 t_1 之比： $\varepsilon = \frac{1}{f_0 t_1}$ 是一个小参数。基培尔将描写大气运动完整的流体力学和热力学方程组，按小参数 ε 展开。它的零级近似，就是大家所熟知的存在于风场和气压（高度）场之间的“地转风关系”。它的一级近似，就是滤去了声波和重力波的准地转预报方程组。

比基培尔稍早一些，罗斯贝用二维不可压缩流体模型（即较简单的正压方程组）也进行了“滤波”工作。罗斯贝注意到高