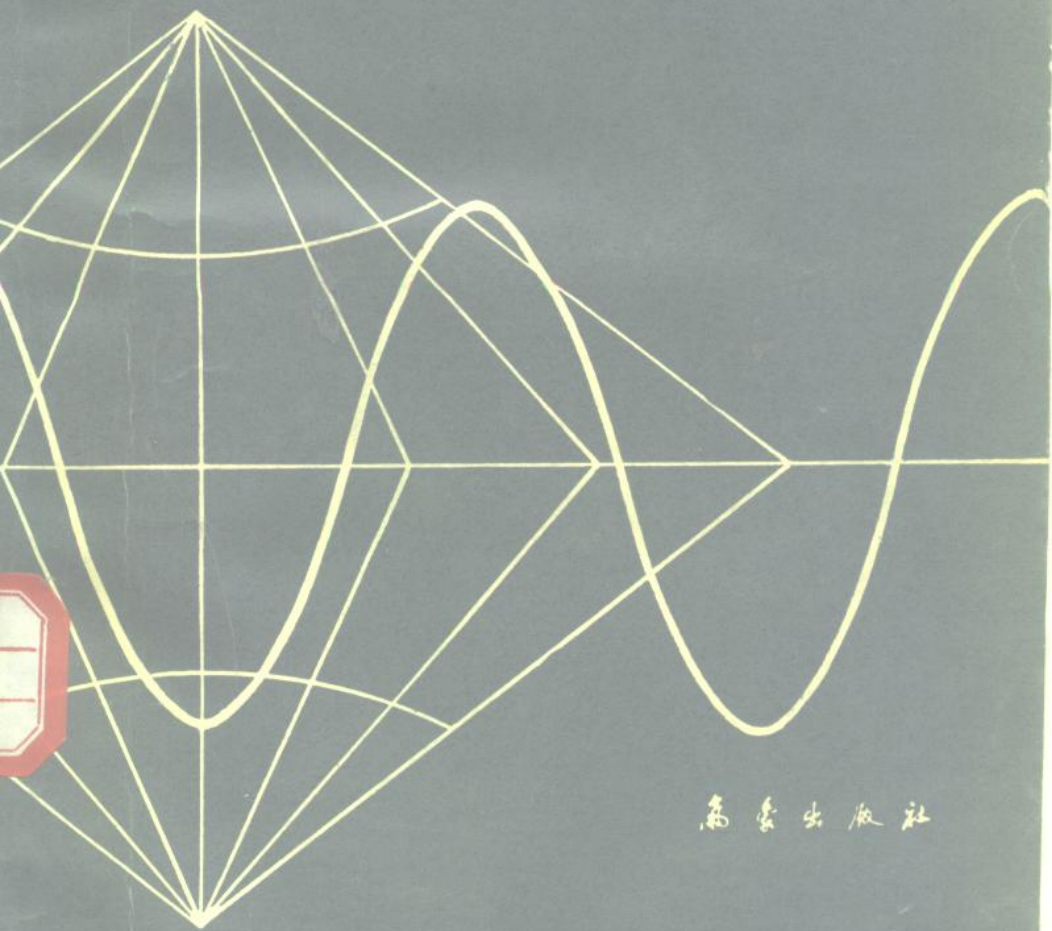


# 长期数值 天气预报

丑 纪 范



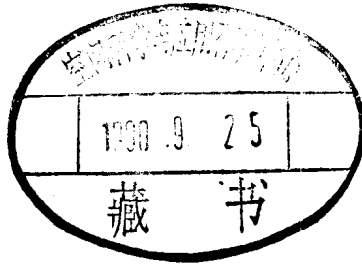
气象出版社

P. 256.3  
C. 31

# 长期数值天气预报

丑纪范 著

TW25/19



气象出版社

106184

## 内 容 简 介

本书较系统地简明地介绍了近年来国内外有关长期数值天气预报方面的新成就，其中主要是结合作者自己的研究工作详细地介绍了我国的进展情况。

全书共分七章，试图用通俗易懂的语言，由浅入深的叙述使较新较深的理论为更多的气象科技工作者所理解。

本书可供高等院校气象专业高年级学生及研究生作为教材或教学参考书，也可供从事数值天气预报，长期天气预报的业务、科研和教学人员参考，对应用数学方面的人员也有一定参考价值。

### 长期数值天气预报

丑纪范 著

责任编辑 黄丽荣

\* \* \*

气象出版社出版

(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：850×1168 1/32 印张：11 字数：284 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数：1—1500

统一书号：13194·0349 定价：3.05 元

# 序 言（之一）

近二十年来，在长期数值天气预报研究上取得了较大进展，但各种研究结果散布在国内外各种学术刊物上，至今尚无一本系统地阐述本问题的专著。丑纪范同志结合多年教学实践和自己的科研活动并广泛地收集整理现有文献资料，写成《长期数值天气预报》一书，对本问题的成就和存在问题作了一个比较全面的总结，这对推动我国这方面的研究并进而在业务中推广应用必将起到积极的作用。

本书从总的布局上大体分为三个部分。首先从理论上、整体上概述长期数值天气预报的主要困难和气候系统的主要特点，并集中阐明了各种模式的共同处理方法。这是第一、二章的内容。其次，介绍了已有的国内外长期数值天气预报的六种模式，着重阐述各模式的思路，指出其考虑的因子和省略的因子，互相对比，引人深思。对每种方法都尽可能地给出了预报结果和效果。这是第三至六章的内容。最后，第三部分作了概括和总结，指出存在的问题和努力方向。

长期数值天气预报是气象学中一个新兴而复杂的问题，所涉及的数学工具和物理概念既广且深，为使本书易读易懂，作者别具匠心地采取由浅入深，循序渐进，层层剖析的手法：由简单的个例到一般情况，用生动的几何直观使抽象概念易于理解，借助历史发展过程的阐述使一些思路和概念的产生变得自然、明白。例如在不稳定性和非线性作用一节中，借用简单的例子把问题说清楚。

本书在分析和回答问题时，注意运用辩证唯物论原理作为指导原则。例如对“距平滤波模式”，作者深入分析了大气环流数值模拟和长期数值天气预报的区别和联系，提出前者在于模拟平均

状况的形成，而后者则可将平均状况视为已知，集中解决距平的形成和演变问题。此外利用了大气环流的“骨架”把大气变量分为气候值和距平值，说明距平方程实际上减弱了非线性作用，有助于问题的解决，这就使该模式的动力学性质进一步明确了。对“滤波”问题，既讨论了滤掉罗斯贝波的缺陷，又指明略去的是距平分量中的相互作用项，从而消除了一些误解，同时又提出广义“滤波”的设想。这方面的例子很多，不能一一列举，但由此可见一般，这是本书论述问题的一个很重要的特色。

本书在论述已有的工作成果时，不是简单地平铺直叙，而是时有作者自己的观点和新意，力图引导读者对问题的思索。本书一开始就从近十多年发展起来的非线性动力学理论的角度来观察长期天气预报问题，证明了线性系统向外源适应和非线性系统向外源适应及两者的本质差异，并由此区分出两种变化过程：由大气内部非线性作用所引起的变化和由外部因素变化所引起的变化。指出Блинова四十年代首次提出的模式着重抓住大气动力学问题而将外部因素变化放在次要地位；六十年代Adem提出的热力模式着重抓外部因素的变化而将环流异常的大气动力学过程放在次要地位。由于这两种模式考虑的侧重点迥异，其效果很不相同，作者因势利导紧接着提出了应深思的问题。

作者从怪引子和大气湍流的角度来看待天气预报中的动力学方法和统计学方法，从确定论系统具有内在的随机性这一最新发现导出大气内部非线性作用所引起的变化带有不确定性，因而宜于用统计学方法来处理，而由外部因素变化所造成的变化则宜于用动力学方法处理，从而提出了动力-统计有机结合的新见解，可供广大读者进一步深入探讨。

最后，作者提出外在不确定性和内在不确定性的概念，指出在做长期天气预报时，两种不确定性都是存在着的，建议以不确定性为基本前提，将长期天气预报问题作为一个信息问题，并进而将这个信息问题提成微分方程的反问题的新设想，介绍了近年

发展起来的微分方程反问题的基本知识。

长期天气预报的发展趋势是理论研究和观测研究日益密切的结合，动力学方法和天气-统计学方法日益密切的结合。由于这种趋势的要求，本书的内容不仅对数值预报工作者有很大参考价值，而且对从事天气-统计学方法的长期天气预报工作者也是不无裨益的。

本书自然也有它的不足之处，但不同读者从不同角度对本书定有不同的评价，这是很自然的事。尽管如此，本书应该说是长期天气预报领域内一本不可多得的好书，它的出版问世必将引起国内外气象界的强烈反响。我对作者的辛勤劳动谨表真诚的谢意。

章基嘉写于1985年11月5日

北京国家气象局

## 序 言 (之二)

近二十年来，长期数值天气预报研究的发展是到了可以写一本书来总结一下的时候了。本书不是一本单纯地把长期数值预报研究的现状作一汇集的书，而是对目前的研究作了层次分明的分析，既肯定了成功的方面，又指出了存在的问题，对解决的途径有作者自己的见解。因此这本书的出版，将会对有志于从事长期数值天气预报的青年气象工作者和研究生起到引路和指导作用。

六十年前 Richardson 数值预报的梦，终于在近三十年后即 1950 年左右在普林斯顿 (Princeton) 的高等研究所 (Institute for Advanced study) 的 ENIAC 计算机上被实现了。这对天气预报无疑是一场革命。当然，这一场革命的到来是有多方面的因素决定的。电子计算机的问世只是使得气象学家第一次得到能够处理大气状态所必需的大量信息，以及能够解出支配大气运动的非线性方程的数学机器；全球性地面和高空资料的稠密化和精确化为实现数值天气预报提供了必要的原料；而动力气象学从天气学以及天气图预报方法中吸收了大量的营养，使近代动力气象学的研究摆脱了学院式研究的桎梏，与实践紧密地结合，又为数值天气预报奠定了坚实的理论基础，等等。所以，气象科学的每一次突破、革新和革命，和其它学科一样，具有深刻的社会背景和科技基础。当然，这并不抹杀有突出见解的科学家们的智慧在一门学科发展中的作用。例如，Richardson, Von Neumann 和 Charney 等在发展数值预报中的贡献。

必然地，当实现了短期数值天气预报方法后，就会提出能否把预报时效延伸到中期和长期的时间尺度，这个问题早在 1955 年在普林斯顿的一次学术会议上提出来了。这次会议对长期数值天气预报今后的发展是起了历史上的积极作用的。其中特别是 Von

Neumann提出了短、中、长三类预报在实施上应有所不同，因为制约它们的物理过程不同。但是，也许是受 N. A. Phillips 大气环流数值模拟成功的影响，Charney在1955年一篇很有影响的文章中<sup>1)</sup>，给人的印象似乎只有在建立动力气候学（即模拟好气候的平均状态）后，才有可能去处理气候的异常和用动力学方法处理长期预报。这一看法，是起到积极作用的，它导致了一门新的学科分支——全球大气环流模式(GCM)或动力气候学的蓬勃发展。如以J. Smagorinsky为首的GFDL的科学家们以及其它科研机构发展的多种的GCM，先模拟出气候的平均状态，然后研究气候的异常状态并制作长期数值预报，这在逻辑上是说得通的，并不失为是一种“正统”的做法。但也必须指出，不仅气候的形成是一个复杂的问题，而是否一定要待气候的形成理论解决后，才能制作长期（月和季的时间尺度）数值天气预报，这是一个可以探讨的理论问题，也是一个可以用实践来检验的问题。

再有一个对长期数值天气预报的发展起到既积极又消极的理论问题，就是预报的可预报性。从P. D. Thompson提出这个问题后，E. N. Lorenz等都做了大量的研究。结论大致相同，GCM的可预报性大致是二个星期。它的积极方面是引导改进GCM，消极方面是否给人印象在可预报性未解决前，制作月和季的长期数值预报是徒劳的。但这一观点并不全面，数值预报的可预报性是针对某一特定的模式而言的，也因对预报量的要求不同而异，举一个例子，如果要求报一个月后某一天的天气状态（超出了可预报性的上限），这是十分困难的，但如预报一个月后某一时段的平均状态（旬平均、月平均），可预报性的上限就变了。而在实践上，预报员们的实践已表明象后者这类长期预报是可以做的。在理论上，近年来如J. Shukla的一系列工作已表明月平均状态的可预报性，有强迫作用的可预报性等，是和经典的结果不

---

1) Numerical methods in dynamical meteorology, Proceedings of National Academy of Sciences of U. S. A. (1955), 798-802.



一样的。

象这些长期数值天气预报可行性的基本问题，在本书中作者都作了讨论，而且是深入浅出，层层剖析，是很有说服力的。而对于现有各类长期数值天气预报模式，除作了详细的介绍外，并指出了他们的优缺点，不带有偏爱和偏见。这不仅符合在科学上百家争鸣的政策，而且对于引导后继者的分析、思考、改进和发展长期预报是有极大好处的。

我相信，本书的出版，定能对我国长期数值天气预报的发展起到积极的推动作用，并在国际长期数值天气预报的学术界中，也有重要的参考价值。

巢纪平

1985年1月31日于北京

# 前 言

人类生活在地球大气中，天气和气候的变化往往对人们的生产和生活带来严重的影响。目前人类并不能控制和改变天气的变化，但是可以探索和掌握其变化的规律，事先作出预报——叫做天气预报。在气象上，将1—2天的预报称为短期预报，3—15天的预报称为中期预报，一个月至一年的称为长期预报。

世界上目前有30个国家正式发布长期预报，使用的是经验方法，预报准确率很低。1976年美国气象学会发表“声明”说：“一个月以上的天气预报，逐日预报是完全没有参考价值的，季度展望和气候预报，其技术水平也是很低的。”因为准确率太低，英国在半正式的发布长期预报的17年之后，于1980年停止发布了。

一个正确的长期预报，能使农业生产得到合理安排，并能适时采取各种措施，趋利避害；能使水库得到合理调度，协调防洪、灌溉、发电等各种矛盾，从而发挥出最大效率；在交通运输方面，能使粮食、防汛抗旱等各种物资得到合理调运，大大提高经济效益。总之，长期天气预报理论和方法的研究是为战略性的经济措施服务的，是一个应用性很强的课题。

长期预报准确率低的原因是对长期天气过程的规律认识不够。短期预报自1954年以来，由经验的方法发展为“物理-数学方法”，采用了数值预报模式，准确率有了显著提高，长期预报也想走这条路。自七十年代初以来，由于卫星技术和电子计算机的进一步发展，数学物理新成果的出现，看来已为开展长期数值预报提供了较好的物质条件，理论与方法的研究显得更为突出了。其进展能够丰富人类对自然的认识，又可直接应用获得经济利益，实在既是个应用课题也是个基础理论的课题。现在已引起国际上的充分重视，美国把气候变化列为当前与今后气象科学研究的三大领

域之一。世界气象组织已决定实行所谓气候规划(WC P)，并把八十年代称为“气候十年”。

E. H. Блинова是最早从事了长期数值预报的，但她试图不考虑非绝热和摩擦作用，曾做过十多年的业务预报，终因效果不好而于1958年停止了。另一个从事长期数值预报的是J. Adem，从六十年代中期作到了现在，用的却是略去了大气动力过程的热力学模式，有相当的局限性。苏联Г. И. Марчук于1974年提出了共轭方程和扰动理论的新方法是一个重要的进展。不过总的看来，国外长期数值预报工作也还做得不多。

在我国，早在五十年代末，顾震潮等就针对我国的实际需要提出搞长期数值预报并作了相应的布署和试验。不过由于当时条件限制，尚不能作全面试验。自七十年代初以来，我国又再度重视这一问题，起步不算晚，十多年来做了不少工作：研究并提出了距平滤波模式，把一般的天气系统（长波）作为噪音滤去，突出非绝热因子的作用，把云和辐射作用作参数处理，并考虑到地气和海气相互作用，利用已知的气候正常年变资料，用前期环流距平预报下一个月下垫面温度距平，再通过后者预报下一个月的环流距平。研究并提出了考虑演变的动力-统计模式，通过数学证明揭露了现在缺少的下垫面热状况的资料可以用现有的大气温压场的连续演变的资料来代替，于是得到了一个考虑了地-气系统反馈、洋流影响的用月平均环流距平的历史演变来做月平均环流距平的预报。研究并提出了从大气水份平衡方程和地气系统热平衡方程出发，导出了描写降水和地温气温相互联系的方程，然后根据土壤热传导方程，建立了根据前冬1.6m和3.2m的深层地温来预报汛期降水的长期预报模式。这些模式都经过初步试验证明有一定效果。

本书尝试对近十多年来国内外在长期数值天气预报方面的新进展作一全面地总结，希望能对关心这方面的研究生和科研人员起抛砖引玉的作用，以期推动我国这方面研究工作的进一步发展。

Constance Reid说：“科学成就的重要性往往并不只是表现为已有的材料上添加新的东西。对于科学的进步来说，使已有的但是繁难的研究领域条理化、简单化和明确化，这样一种探讨决不是次要的。通过这样的探讨，有助于（或至少可能）从整体上来观察理解和把握这门科学”。在此启示下，虽然本书是以综述前人的成果为主，仅有部分是作者自己的尚未发表过或已经发表了科研成果，却力图用自己的观点对各派理论进行评述，希望能具有教材和专著的双重风格。

作者的愿望是：其一，力求系统完整，不遗漏最新成果（国外文献到1984年，国内则有些是尚未来得及发表的成果）；其二，要求深入浅出，易读易懂（对问题概念能回答清楚、准确。从直观性强的内容开始，然后再进入抽象的论述。如：在介绍失稳、分叉和混沌时，先讲直观的三维例子，用Lorenz系统作为麻雀解剖，再推广到 $n$ 维乃至无穷维等）；其三，注意运用辩证唯物论原理指导自然科学研究工作（如：在阐述可预报性问题时，从客观事物本来就是既有可预报性的一面，又有不可预报性的一面出发，深入介绍新近发现的确定论系统具有内在的不确定性，而不确定中又有确定的一面，最后上升到哲学上，从必然性和偶然性的对立统一的高度来分析理解。对于现有各类长期数值天气预报模式，则分别指出其优点所在和不足之处）；其四，通过阐述自己的观点，力图能引导更多的人来思考和探索。

当然这些都只是作者的愿望，由于水平有限，很可能弄巧成拙，错误不当之处，一定很多，至盼各方面的批评和指教。

本书的基本内容是作者1983年上半年在兰州大学给气象专业高年级学生和研究生讲课时所用的讲义（并于1984年春应邀在北京大学地球物理系研究生中讲授过）。巢纪平教授审阅了该讲义，他建议修改成书，正式出版，并指出了该讲义中的不足之处，提出了许多宝贵意见，而且不止一次地给作者寄来参考资料。在写作的过程中还得到汤懋苍、罗哲贤等同志的热情鼓励和有益帮助，

作者在此向他们表示深切的感谢。

丑纪范

1984年12月于兰州大学

# 目 录

序言之一.....	章基嘉
序言之二.....	巢纪平
前言	
第一章 可预报性.....	( 1 )
§ 1.1 问题的产生.....	( 1 )
§ 1.2 数值模式的可预报性 .....	( 3 )
§ 1.3 大气的可预报性 .....	( 6 )
§ 1.4 不稳定性和非线性作用.....	( 8 )
§ 1.5 非周期性.....	( 21 )
§ 1.6 Lorenz 系统 .....	( 23 )
§ 1.7 相空间、平衡态 .....	( 26 )
§ 1.8 失稳和分叉.....	( 30 )
§ 1.9 对初值敏感的系统 .....	( 31 )
§ 1.10 一个简单的预报试验 .....	( 35 )
§ 1.11 湍流和怪引子.....	( 37 )
§ 1.12 动力方法和统计方法 .....	( 43 )
§ 1.13 必然性和偶然性 .....	( 45 )
§ 1.14 为什么能做长期预报 .....	( 46 )
§ 1.15 长期天气预报的对象 .....	( 49 )
第二章 模式应有的特征.....	( 51 )
§ 2.1 线性系统向外源的适应.....	( 51 )
§ 2.2 非线性系统向外源的适应.....	( 66 )
§ 2.3 准静态近似.....	( 79 )
§ 2.4 大气中热源(汇)的计算问题.....	( 80 )
§ 2.5 面临的困难.....	( 88 )
§ 2.6 地-气交界面上的热量平衡方程 .....	( 90 )

§ 2.7	大气-海洋-冰雪-大陆系统.....	( 94 )
<b>第三章</b>	<b>热力学模式.....</b>	<b>( 96 )</b>
§ 3.1	Блинова的尝试.....	( 96 )
§ 3.2	Adem的简化.....	( 97 )
§ 3.3	简化的热力学方程.....	( 98 )
§ 3.4	辐射参数化.....	(101)
§ 3.5	凝结潜热的参数化.....	(103)
§ 3.6	平均平流热量.....	(104)
§ 3.7	Adem模式的数值解法.....	(106)
§ 3.8	Adem模式的预报效果.....	(108)
§ 3.9	前期地温距平与后期降水分布的相关实例.....	(113)
§ 3.10	根据地温距平作降水预报的热力学模式.....	(118)
§ 3.11	“地温模式”的预报效果.....	(123)
§ 3.12	“地温模式”的问题.....	(127)
<b>第四章</b>	<b>距平滤波模式.....</b>	<b>(129)</b>
§ 4.1	概念由来的背景.....	(129)
§ 4.2	简化的地-气耦合模式.....	(132)
§ 4.3	距平分量的方程.....	(135)
§ 4.4	地-气系统中的非绝热波.....	(140)
§ 4.5	短期波的过滤.....	(148)
§ 4.6	一层模式及其预报试验结果.....	(151)
§ 4.7	三层模式及其预报试验结果.....	(158)
§ 4.8	与Adem模式比较.....	(172)
§ 4.9	与GCM比较.....	(173)
§ 4.10	提前三个月的月预报试验.....	(176)
§ 4.11	缩短计算步长的试验.....	(179)
§ 4.12	滤掉瞬变罗斯贝波的缺陷.....	(180)
§ 4.13	距平滤波模式的影响.....	(185)
<b>第五章</b>	<b>考虑演变的动力-统计模式.....</b>	<b>(190)</b>

§ 5.1	思路 .....	(190)
§ 5.2	下垫面活动层的温度分布是解决预报问题的初始条件.....	(195)
§ 5.3	下垫面活动层的温度变化方程的求解 .....	(198)
§ 5.4	将大气环流异常的正压性特点引入模式 .....	(201)
§ 5.5	用精度较高的积分方法建立模式 .....	(204)
§ 5.6	以下垫面活动层的温度分布为初始条件的预报模式.....	(204)
§ 5.7	提为演变问题的预报模式 .....	(209)
§ 5.8	用反演方法客观决定物理参数 .....	(216)
§ 5.9	简化线性模式的预报试验.....	(231)
§ 5.10	简化线性模式揭露出的问题和启示 .....	(246)
<b>第六章</b>	<b>共轭方程和扰动理论.....</b>	<b>(248)</b>
§ 6.1	引言 .....	(248)
§ 6.2	大范围温度距平场形成的因子.....	(250)
§ 6.3	用实际资料验算温度距平的共轭函数 .....	(257)
§ 6.4	非绝热地转斜压模式 .....	(261)
§ 6.5	海洋对温度异常形成的作用.....	(269)
§ 6.6	海洋环流、大气环流和陆地热状况相互作用下的温度异常的预报 .....	(272)
§ 6.7	温度距平的预报试验 .....	(277)
§ 6.8	高度距平和垂直速度距平的预报 .....	(287)
§ 6.9	扰动理论.....	(291)
§ 6.10	原始方程模式 .....	(294)
§ 6.11	计算出的共轭函数的示例 .....	(306)
§ 6.12	预报所需的资料和计算条件 .....	(309)
<b>第七章</b>	<b>存在的问题和展望.....</b>	<b>(311)</b>
§ 7.1	大气环流模式做预报的缺陷.....	(311)
§ 7.2	依据月平均资料做月平均量预报的局限 .....	(313)



§ 7.3	大气的湍流特性引起的问题.....	( 315 )
§ 7.4	水汽相变作用难以妥善描写.....	( 316 )
§ 7.5	本质上的不确定性未能正确对待.....	( 317 )
§ 7.6	一种设想.....	( 319 )
§ 7.7	展望.....	( 321 )
参考文献	.....	( 323 )