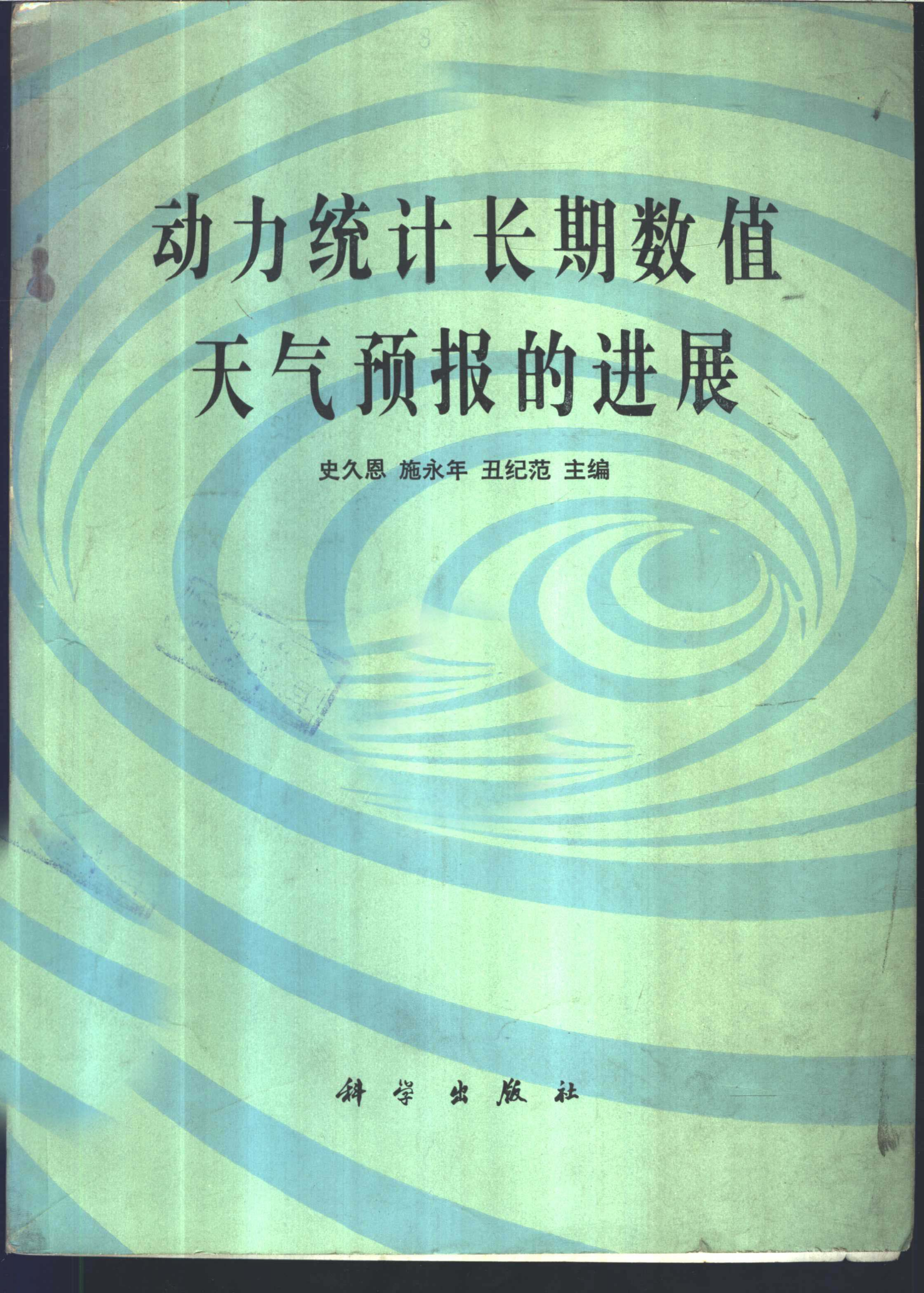




动力统计长期数值 天气预报的进展

史久恩 施永年 丑纪范 主编

科学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了目前国内外关于动力统计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较详细地介绍了我国的最新成果。全书共五篇,第一篇概述了动力统计预报研究的现状及其在长期天气预报中的进展,其余四篇分别论述了随机动力长期预报、动力气候、统计动力方法、时间序列分析、球展物理量及其应用、气候资料诊断和应用等的进展情况。

本书可供气象专业科研、预报人员和高等院校师生参考,对水文、海洋、地理、经济、工程技术和应用数学等领域的专业人员也有一定的参考价值。

动力统计长期数值 天气预报的进展

史久恩 施永年 丑纪范 主编

责任编辑 赵徐懿 廖琴仙

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年9月第一版 开本:787×1092 1/16

1989年9月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:0001—750 字数:259 000

ISBN 7-03-001090-6/P·198

定价:13.00元

前 言

近 30 年来,短期和中期数值预报有了很大进展。目前短期数值预报已经能成功地做出 5 天预报,甚至 10 天预报亦有一定效果,这给长期数值预报打下了良好的基础。虽然许多可预报性的研究说明大气瞬时状态的确定性预报上限为 2—3 周,但试验表明大气统计特性预报,例如时空平均预报是可以超过这个上限的。

长期天气预报在有些国家已进行了数十年,但只是近十多年才有了前所未有的发展前景。世界气候研究计划(WCRP)将长期天气预报作为三个主攻方向之一,并在近几年里召开了几次有关长期预报的国际性学术会议,这不仅标志着长期预报已成为国际气象界所关注的一件大事,同时也反映出世界气象组织及各国科学家对长期预报的浓厚兴趣。

长期数值预报目前主要是进行 1—2 个月的预报试验,至今还没有任何模式能做业务预报。要想建立一个长期数值预报的业务模式还要进行许多研究,要做许多艰巨的工作。

大气运动的规律,实际上是由确定性过程和随机性过程所组成的。确定性的问题一般是借助于微分方程用动力方法来进行描述,而随机性的问题要借助于概率论用统计方法来进行描述。长期数值预报中如何将动力方法和统计方法结合起来,这是一个新近提出来的问题,也是本书诸位作者在近几年科学研究中的主攻课题。希望通过学科间的相互渗透,协同发展,一方面在动力方法中运用概率论的思想进行统计描述,另一方面用确定论的方程来研究不确定的大气随机行为。

本书是由国家气象局气象中心、北京气象学院、南京大学、兰州大学、黑龙江大学、武汉大学等高等院校,及中国科学院计算中心、应用数学研究所和有关省、市气象部门等单位共同承担的“动力统计长期数值天气预报”课题的研究成果,前后历经多年才告以完成。本书内容主要是有关动力统计长期预报的当前进展和重要科研成果。全书概括为五篇,共二十六章。第一篇对动力统计数值预报的现状及其在长期预报方面的进展作了概括的评述,提出了发展方向,并强调随着社会经济发展的需要,这一领域的研究将愈来愈为人们所重视和关注。第二篇系统地论述了随机动力和动力气候等方面的进展,提出了大气系统相空间的概念,论述了大气随机微分方程的思想、方法及其应用,如蒙特卡洛方法、卡尔曼滤波方法等,介绍了随机动力海气耦合模式、两层准地转斜压谱模式,简要地介绍了随机微分方程在气象学中的应用和非线性动力气候学研究的最新成果。第三篇系统地评述了统计动力长期数值天气预报研究的进步和发展,重点介绍了共轭函数理论、方法及其在长期预报中的应用,提出了相似-动力长期预报模式和数值产品的统计动力长期天气预报。第四篇主要是评述动态数据处理——时间序列分析的进展,概括地介绍了平稳时间序列的时域分析、频域分析和线性模型的一些新成果,ARMA 模型的识别、估计和预报问题,以及非平稳、非线性的时间序列分析,较详细地论述了叠合模型、门限回归模型和多层递阶预报方法,并提供了应用实例,以便读者参考应用。第五篇评述了球函数展开的物理量计算

及其在大范围或区域长期天气预报中的应用,介绍了长期预报和气候诊断资料库的进展情况,以及卫星辐射资料在长期数值预报中的应用前景。

本书由史久恩、施永年、丑纪范主编,编委有张建中、周琴芳、韩志刚、汤兵勇、储锁龙、郭秉荣、王锦贵、向元珍、项静恬等。本书得到国家气象局和黑龙江省气象局的资助及有关单位的大力支持,特表谢意!

纪念

已故的顾震潮教授和李麦村教授

——我国动力统计预报的先驱者

目 录

前言	(v)
第一篇 动力统计预报研究的现状及其在长期天气预报中的进展	史久恩 (1)
第二篇 近年来随机动力长期预报和动力气候的进展	(17)
第一章 动力学期长期预报	施永年 (17)
第二章 统计动力预报及其蒙特卡洛模拟	张建中 史久恩 (21)
第三章 随机微分方程的应用	丁佟英 (28)
第四章 长期天气形势预报的卡尔曼滤波方法	周琴芳 项静恬 史久恩 (33)
第五章 北半球 500 hPa 月平均环流随机-动力预报的研究	史久恩 马怀存 周琴芳 沈士博 (42)
第六章 大气系统对海温异常的响应及其统计特性	冯九华 (49)
第七章 随机动力模式中误差对气候预报的影响	王永华 (55)
第八章 非线性气候动力学的研究	赵一平 (60)
第三篇 统计动力方法的进展	(67)
第一章 统计动力长期数值天气预报研究的评述	丑纪范 史久恩 郭秉荣 (67)
第二章 统计动力长期天气预报	史久恩 周琴芳 (72)
第三章 有限区域内温度、高度和降水的长期预报方法	郭秉荣 丑纪范 (84)
第四章 一个相似-动力长期数值天气预报模式	邱崇践 丑纪范 (88)
第五章 动力统计气温长期预报模式	王锦贵 李天尚 丑纪范 郭秉荣 (95)
第六章 共轭函数方法在高度场长期预报中的应用	李天尚 王锦贵 张恩恕 (105)
第七章 利用共轭函数理论计算海洋热存储量变化的一种方法	游性恬 江剑民 郭秉荣 (111)
第四篇 近年来时间序列分析的进展	(117)
第一章 时间序列分析与预报	韩志刚 项静恬 (117)
第二章 时间序列分析的多层模式	韩志刚 (123)
第三章 非线性时间序列模型及其在统计动力长期预报中的应用	项静恬 (130)
第四章 多层递阶长期预报模型的实际应用方法	张恩恕 汤兵勇 (139)
第五篇 球展物理量计算及其应用的进展	(149)
第一章 物理量的计算及其应用	储锁龙 周琴芳 (149)
第二章 球展物理量在江苏夏季旱涝预报中的应用	向元珍 吕玉芳 (155)
第三章 球展物理量与北京地区温度和降水的初步探讨	储锁龙 (158)
第四章 球谐函数展开方法在广东春季冷暖预报上的应用	杨 震 (162)

第五章	气候诊断资料库.....	周琴芳 (165)
第六章	卫星的辐射观测及其在长期数值天气预报和气候中的研究.....	
		严济远 陈世珉 (171)

Contents

Preface	(v)
I. THE PRESENT STATE OF SCIENCES REVIEW IN THE RESEARCH OF STATISTICAL-DYNAMICAL PREDICTION AND ITS APPLICATION TO LONG-RANGE WEATHER FORECASTING	Shi Jiuen (1)
II. THE ADVANCES IN STOCHASTICAL-DYNAMICAL LONG-RANGE WEA- THER FORECASTING AND DYNAMICAL CLIMATOLOGY	(17)
1. Dynamical long-range prediction.....	Shi Yongnian (17)
2. Statistical-dynamical prediction and Monte Carlo model	 Zhang Jianzhong and Shi Jiuen (21)
3. The application of stochastic differential equations.....	Ding Dongying (28)
4. The Kalman filtering method in long-range weather prediction	 Zhou Qinfang, Xiang Jingtian and Shi Jiuen (33)
5. Stochastic-dynamical prediction research of monthly mean circulation at 500 hPa over northern hemisphere	 Shi Jiuen, Ma Huaicun, Zhou Qinfang and Shen Shibo (42)
6. The response of atmospheric system to the sea surface temperature ano- malies and its statistical feature	Feng Jiuhua (49)
7. Effects of errors on climate prediction in a stochastic-dynamical model	Wang Yonghua (55)
8. The research on nonlinear climate dynamics	Zhao Yiping (60)
III. THE ADVANCES IN STATISTICAL-DYNAMICAL METHODS	(67)
1. A review on statistical-dynamical research in long-range numerical wea- ther prediction	Chou Jifan, Shi Jiuen and Kuo Bingrong (67)
2. Statistical-dynamical long-range weather forecasting	 Shi Jiuen and Zhou Qinfang (72)
3. Long-range weather forecasting method of temperature, height and pre- cipitation in limited area	Kuo Bingrong and Chou Jifan (84)
4. A similar-dynamical long-range numerical weather forecasting model ...	 Qiu Chongjian and Chou Jifan (88)
5. Statistical-dynamical long-range prediction model of temperature	 Wang Jingguai and Li Tianshang (95)
6. Application of the conjugate method to long-range prediction of height	

field.....	Li Tianshang, Wang Jingguai and Zhang Enshu (105)
7. A computation method of the variation of heat storage in ocean by the conjugate theory	You Xingtian, Jiang Jianmin and Kuo Bingrong (111)
IV. THE ADVANCES IN TIME SERIES ANALYSIS	(117)
1. Time series analysis and forecasting...	Han Zhigang and Xiang Jingtian (117)
2. Multilevel model in time series analysis	Han Zhigang (123)
3. Nonlinear time series model and its application to statistical-dynamical long-range weather forecasting	Xiang Jingtian (130)
4. Practical application method of multilevel system model in long-range weather forecasting.....	Zhang Enshu and Tang Bingyong (139)
V. THE ADVANCES IN COMPUTATION AND APPLICATION OF THE PHYSICAL QUANTITIES OF SPHERICAL FUNCTIONS EXPANSION...	(149)
1. Computation and application of the physical quantities.....	Chu Suolong and Zhou Qinfang(149)
2. Application of the physical quantities of spherical functions expansion to the summer drought/waterlogging forecasting in Jiangsu	Xiang Yuanzhen and Lu Yufang (155)
3. A preliminary study of the relations between the physical quantities of spherical functions expansion and temperature-precipitation in Beijing area	Chu Suolong (158)
4. Application of spherical functions expansion method to the cold/warm forecasting in spring over Guangdong	Yang Zhen (162)
5. The climatic diagnostic data bank.....	Zhou Qinfang (165)
6. The satellite radiation observation and its application to statistical-dynamical long-range numerical weather prediction	Yan Jiuyan and Chen Shimin (171)

第一篇 动力统计预报研究的现状 及其在长期天气预报中的进展

史 久 恩

§ 1 引 言

世界气候研究计划 (WCRP) 的三个主攻方向之一即为数周的长期天气预报。自从世界气象组织 (WMO) 在 1985 年夏季于美国马里兰大学召开了第一届全球月、季尺度大气变化的诊断和预报会议以后, 长期天气预报方面的国际性学术活动明显增多, 这说明了 WMO 和各国科学家对长期预报的重视和兴趣。

当实现了短期数值天气预报后, 自然就会提出能否将预报时效延伸到中期和长期的时间尺度。但对个别天气现象的预报, 有一个理论限度, 即可预报性约为 2 周时间。超出 2 周限度后, 气流中比较快的非线性的流体动力交互作用会产生一些不可预报的天气噪音。同时, 对大气运动进行实际观测和研究表明, 在天气噪音之外确实存在着较慢的物理过程。Shukla^[1], Miyakoda^[2] 等的一系列工作也表明, 预报 1 个月后某一时段的平均状态是存在可预报性的。

目前在长期预报业务工作中主要是使用了概率统计学方法, 例如时间序列分析方法和多元分析统计方法等, 并在某些局部地区取得了相当的效果。但这种预报因物理过程不清楚, 而难以从本质上进行改进。因此对大范围的长期天气预报, 人们认为动力学的方法可能更有希望。这方面主要有大气环流模式和简单的动力气候模式。

Smagorinsky^[3], Gilchrist^[4], Seidman^[5], Miyakoda 和 Chao^[6] 等的一些试验研究都表明, 大气环流模式的时间平均预报, 随着平均长度的增长可提高预报技巧, 而且可以滤掉小尺度大气运动分量, 减少位相误差。Spar 等^[7,8] 用 GISS 模式做了月平均预报试验, 500hPa 高度场的预报技巧超过了气候持续性。Miyakoda 等^[2] 用 GFDL 模式进行试验, 发现用动力的逐日预报作延伸预报很不稳定, 而时间平均预报明显地优于逐日预报。Caverly 等^[9] 和 Cubasch 等^[10] 分别用 GFDL 模式和 ECMWF 模式做了长期预报数值试验, 也得到了类似的结果。

除了大气环流模式的试验外, 还有一些用简单模式作长期预报的尝试。Блинова^[11] 早在 40 年代就从事于简化的动力学模式进行长期预报的研究。Gambo 和 Arakawa^[12], Kurihara^[13] 建立了预报纬向平均量的方程组, Adem^[14] 建立了月、季温度预报的热力模式, 巢纪平等^[15,16], Miyakoda 和 Chao^[6], Opsteegh 和 Van den Dool^[17] 试验研究了距平模式, Марчук^[18] 提出了共轭方程和扰动理论, 郭秉荣、丑纪范等^[19] 提出了使用多时刻历史资料的数值模式。

大气运动的规律, 实际上表现为确定性的过程和随机性的过程两类。一个新近提出

来的问题是,怎样由各种方法做出预报,特别是在长期预报中如何将动力方法和统计方法结合起来,做出最好的预报。

本文将着重对动力统计长期天气预报的几个方面的进展进行综述。

§ 2 集合预报方法和大气随机微分方程

大气的行为是受一定的动力方程(即 Navier-Stokes 方程)所控制的,而对于大气的研究实际上往往只是在各种模式大气中挑选出一种来进行的。由于人们不了解或不能确定地给出大气的初始场、外界环境作用和过程的参数,因而引入了概率统计理论,来形成大气的动力统计模式和方法。

动力统计预报一方面要求严格的动力解(即确定解),另一方面又要设法给予气象变量的初始值和计算值的不确定性以定量的描述。在统计动力预报中引用了相空间的概念,将气象场的运动方程变为具有 N 个自由度的相空间运动,于是动力学方程可以变为一组大气随机微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dx_k(t, \omega)}{dt} = \sum_{i,j=1}^n \alpha_{kij} x_i(t) x_j(t) - \sum_{i=1}^n \beta_{ki} x_i(t) + f_k(t) \\ x_k(t_0) = x_k^{(0)} \quad k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中 $\alpha_{kij}, \beta_{ki}, f_k$ 可以是随机变量、随机过程或常量,其中 $x_k(t, \omega)$ 为状态向量, t 为时间变量, ω 为概率空间 (σ, Q, P) 中的随机元。

1. 统计-动力预报方法

Gleeson^[20] 提出了由大气随机微分方程组(1.1.1)出发,根据动量守恒、能量守恒和概率守恒的原理,导出 $x_k(t, \omega)$ 在相空间中的分布函数或密度函数满足的偏微分方程,然后用偏微分方程求解方程(1.1.1)的有限维分布函数组。

假定 α, β, f 为常量,在 t_0 时, $X = (x_1, \dots, x_n)^T$, 具有密度函数 $\phi(x, t_0)$, 则对任意 $t > t_0$, 可导出概率密度 ϕ 的连续方程

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial(\dot{x}_i \phi)}{\partial x_i} = 0 \quad (1.1.2)$$

式中 x_i 是状态向量的第 i 个分量, $\dot{x}_i$ 是相速度的第 i 个分量。

如果给定概率密度的初始分布,加上大气运动的动力、热力学方程组,就可计算出概率密度分布随时间的变化,从而可用概率的形式预报每一时间步长的大气状态。在实际问题中,由于相空间的维数太大,(1.1.2)式又是变系数的线性方程,所以计算问题较困难,必须寻找近似关系。

在动力相通量是无辐散的情况下,即

$$\sum_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1.1.3)$$

时,方程(1.1.2)成为刘维尔 (Liouville) 方程,即

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_i \dot{x}_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (1.1.4)$$

此方程适用于某些简单的情形。

2. 随机动力预报方法

Epstein^[21] 应用矩方程解法来求解,即不是直接计算概率密度函数,而是计算 $x(t)$ 的各阶矩,如数学期望 μ_x 、协方差 σ_{ij} 、三阶矩 r_{ijk} 等。假定

$$\frac{d}{dt}E[f(x)] = E\left[\frac{df(x)}{dt}\right] \quad (1.1.5)$$

成立,根据(1.1.1)式可得

$$\dot{\mu}_k = \sum_{i,j} \alpha_{kij}(\mu_i \mu_j + \sigma_{ij}) - \sum_i \beta_{ki} \mu_i + f_k \quad (1.1.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} = & \sum_{k,l} [\alpha_{ikl}(\mu_k \sigma_{jl} + \mu_l \sigma_{jk} + r_{jkl}) + \alpha_{jkl}(\mu_k \sigma_{il} + \mu_l \sigma_{ik} + r_{ikl})] \\ & - \sum_k (\beta_{ik} \sigma_{jk} + \beta_{jk} \sigma_{ik}) \end{aligned} \quad (1.1.7)$$

由(1.1.6)、(1.1.7)式可见,为了解一阶矩的演变需要知道二阶矩,而要了解二阶矩的演变又需要知道三阶矩,……,这样由于方程的非线性,导致了矩方程的不封闭性。为了使方程闭合,一般采用矩截断使方程近似闭合,例如令三阶矩

$$r_{ijk} = 0$$

则可得到一阶、二阶矩的联立方程组。对预报时效不超过 10 天的中期预报, Fleming^[22,23] 假定三阶矩为零时来进行预报。而对长期预报,他认为应保留三阶矩。Pitcher^[24] 在实际问题中使用这种随机动力方法进行预报试验,其动力框架为一个简单模式——相当正压涡度方程,计算得出两张图,一张是均值图,相当于确定性预报的高度场图;另一张是反映不确定性随时间变化的标准差图。从 Pitcher 的实例来看,一些主要形势变化是有预报能力的。但矩方程解法也有缺点,首先在用谱转换方法的情况下很难列出公式;其次是这样的近似处理会带来截断误差。一些工作表明,将较高阶的矩简单地略去,或高阶矩用低阶矩表示等近似办法,对于解决闭合问题来说有时不尽令人满意,因为这样做可能导致二阶矩的负值,出现负能量。此外,由于方程组数共有 $n + \frac{1}{2}[n(n+1)]$ 个,当 n 稍大时,运算量较大。

3. 蒙特卡洛方法 (Monte Carlo method)

Leith^[25] 提出用蒙特卡洛方法来代替随机动力方法,这种方法是对同一个初始条件加上随机扰动来产生一组初始状态,组成有限样本,然后对每个初始状态用动力模式进行时间积分,并用预报集合计算出期望和方差的估计值,从而给出了象初始状态样本一样不确定的真实状态的估计(图 1.1.1)。

采用蒙特卡洛方法对方程(1.1.1)模拟求解,即对一个给定的 ω_0 , 方程变为

$$\frac{dx_k(t, \omega_0)}{dt} = \sum_{i,j} \alpha_{kij} x_i(t, \omega_0) x_j(t, \omega_0) - \sum_i \beta_{ki}(t, \omega_0) x_i(t, \omega_0) + f_k(t, \omega_0)$$

$$x_k(t_0) = x_k^{(0)}(\omega_0) \quad (1.1.8)$$

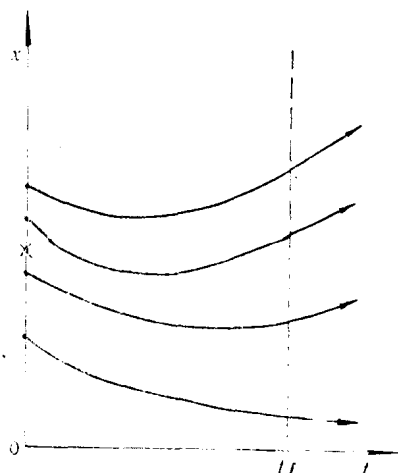


图 1.1.1 蒙特卡洛方法预报集合的时间演化示意图
横坐标表示预测的时间 t ，纵坐标表示模式变量的振幅 x 。图中“ $\times$ ”表示初始时刻的实测值位置，“ $\bullet$ ”表示加上随机扰动的一组初始状态， t_f 是某一指定的预报时间

(1.1.8) 式为一组常微分方程组，求解方程(1.1.8)得到的解 $x(t, \omega_0)$ 为随机过程 $x(t, \omega)$ 的一个现实。

Leith 提出，在二维均匀各向同性的湍流模式基础上，样本集合容量为 8 时，对平均场的预报估计是不错的。Pitcher^[24] 不仅用蒙特卡洛方法抽样给出初始条件，表示了内部误差的大小，还进一步用随机外力项来模拟动力统计预报中的外部误差。Seidman^[5] 用一个三层的 GISS 大气环流模式作为动力框架进行数值试验，发现在试验范围内，由随机扰动作为初值的预报是遵从高斯分布的。与单纯的动力预报比较，集合平均预报的可预报时间增长了；并提出集合预报的样本数在 4 到 8 之间即可认为是适宜的。Murphy 和 Jones^[26] 用英国气象局的五层大气环流模式，对冬季进行了 8 组 50 天预报——集合预报试验，每组集合预报试验由 7 个不同初始场的模式积分组成。所加的随机扰动是空间相关的，这些随机扰动值是用来模拟分析误差的影响。取这 7 个积分

的平均值作为一组集合预报的结果，并将此结果与未做集合预报的纯动力预报比较，发现对超长波(0—3 波)的集合预报要比纯动力预报的效果好。空间滤波的集合预报的时效可达 28 天，而纯动力预报的时效仅 19 天。张建中等¹⁾和胡增臻等²⁾在集合预报和蒙特卡洛模拟方面也进行了不少工作。

研究工作^[29]表明，当集合预报样本数不太大时，采用蒙特卡洛方法可以比矩方程解法的随机动力方法更节省机时。但蒙特卡洛方法的基础是假定在预报的衰减是由于无大尺度系统误差的初始条件中存在着不可避免的不确定性，而非模式的不完善所致，显然这个假定是可以商榷的。

4. 滞后平均预报方法(LAF)

Hoffman 和 Kalnay^[27] 提出的滞后平均预报方法，是将多时刻的初始场资料用大气环流模式和边界条件相结合，在相空间中得到有限条相路的集合预报方法。这种集合预报方法是由预报集合计算出样本统计量，其中每一个集合预报样品是预报前某一时刻所取的初始条件出发的动力预报。当这些动力预报取 $t = 0, -\tau, \dots, -(N-1)\tau$ 时的初值，然后根据动力模式进行时间积分，并在某一特定的预报时段内进行平均，就得到一个集合平均预报(图 1.1.2)。

滞后平均预报中纯动力预报模式的控制方程可表示为

1) 张建中、史久恩，统计动力预报及其蒙特卡罗模拟，本书第二篇第二章。

2) 胡增臻等，月平均大气环流模拟的动力统计方法，长期天气预报研究通讯，第 8713 号(增刊三)。

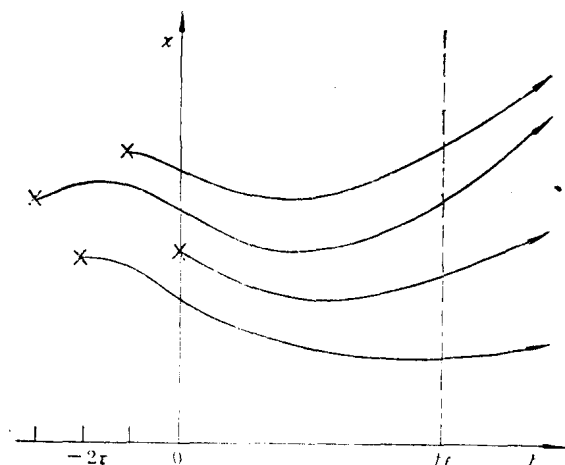


图 1.1.2 滞后平均预报(LAF)集合的时间演变示意图
横坐标表示预测的时间 t , 纵坐标表示模式变量的振幅 x . 图中“ $\times$ ”表示间隔 τ 时间的实测的初始状态, t_f 为某一指定的预报时间

$$\dot{x} = F(x; t) \quad (1.1.9)$$

方程(1.1.9)表示 x 的时间变率等于 x 和时间 t 的已知函数 F . 由时刻 t_0 的初始条件 η 得到方程(1.1.9)的解为 $x(t; t_0, \eta)$. 为了使符号一致, 令纯动力预报定义为

$$\hat{x}_1 = x[t; 0, x^0(0)] \quad (1.1.10)$$

其中, $x^0(t)$ 是 t 时刻的 x 的观测值, $t = 0$ 是起始时刻.

x 的集合平均预报为

$$\tilde{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i \quad (1.1.11)$$

其中 $\hat{x}_i$ 是集合预报中第 i 个样品, N 是样本集合的容量. 纯动力预报是集合预报的特例 (即 $N = 1$ 的集合预报).

滞后平均预报为

$$\bar{x}_i = x[t; t_i, x^0(t_i)] \quad (1.1.12)$$

其中, t_i 是 $i = 1, \dots, N$ 的逐次观测的时刻. 定义 $t_i = -(i-1)\tau$, 这里 τ 是时间间隔; 因此第 i 个滞后预报的初始状态 $x^0(t_i)$ 是在时间滞后 $(i-1)\tau$ 时刻的观测状态.

这种用多时刻的初始值作集合平均预报的方法, 已经在中、长期数值预报中进行了不少试验, 如 Dalcher 等^[28]曾采用欧洲中期预报中心的 T_{40} 谱模式作为动力框架, 进行滞后平均预报的试验, 他们对 1980—1981 年冬季和 1981 年夏季时段内每隔 24 小时的 6 个不同的初始场进行模式积分, 得到第 6—10 天的五天平均 500 百帕高度场预报, 从计算结果来看, 比纯动力的业务预报有明显的改进. Molteni 等^[29]用这种滞后平均预报方法来试验长期数值预报. 采用欧洲中期预报中心的 T_{42} 和 T_{21} 谱模式作为动力框架进行模式积分, 每个集合预报试验是取计算起始时刻及其前每隔 6 小时的 9 个时刻的初始场做预报, 然后求平均. 结果是月预报效果高于持续性预报, 滞后平均预报的效果高于纯动力预报.

Tokioka 等^[30]用美国加州大学的 UCLA 模式作为动力框架进行滞后平均预报试验. 从计算的起始时刻起取时间间隔为 12 小时的 5 次初始场分别进行模式积分, 然后求集合

平均。结果表明月平均预报尚不错,它与实况比较,第1个月均为正相关,第2个月出现部分反相关。Murphy 等^[32]采用英国气象局的11层全球气候模式,将预报起始时刻之前连续的7个图次(时间间隔为12小时)的实况作为初始场,进行滞后平均预报的数值试验。从计算的效果来看,如按5天(候)平均进行检验,11层模式预报与实况的距平相关系数,从第1候到第4候的滞后平均集合预报与实况的相关程度要明显地高于7次纯动力预报相关系数的平均值,但自第5候之后,改进不大。欧洲中期预报中心的十年(1985—1994)规划^[33]中对集合预报方法十分重视,在欧洲中心的数值试验计划中已在滞后平均预报中考虑消除模式的系统偏差——气候飘移问题。采用16层 T_{21} 的低分辨谱模式作为动力框架,从9个不同初始条件向前积分一个多月,然后分别按1—10天、11—20天和21—30天求平均。这些预报距平和实测距平之间的一致性十分令人鼓舞(图1.1.3)。

此外, Miyakoda 等^[33]在月平均数值预报试验中,采用美国普林斯顿大学的 GFDL 模式,对1977到1983年的8个1月份进行数值试验。每个集合预报使用了三个时间相同而来源不同的初始场,即直接将 GFDL、美国国家气象中心(NMC)和欧洲中期预报中心的四维同化的分析场作为初始场,然后进行模式积分、求集合平均。结果表明这种月平均的集合预报也是显著地优于持续性预报。

在我国,史久恩等亦已开展了滞后平均预报的数值试验,采用了美国国家气象中心的全球多层谱模式作为动力框架,以每间隔12小时或24小时选取初始场进行计算和比较,已得到初步的结果。

§3 离散时间系统的滤波方法——卡尔曼滤波

在许多实际问题中,只可能获得部分物理量的量测值,但却希望能估计更多的有用信息,或是希望从信号与噪音混杂的量测中排除无用的干扰。对于这样一类的数据处理问题,需要利用滤波技术。

滤波即通过对一系列带有误差的实际量测数据的处理,得出所需要的物理量的估计值。因此,滤波是一种具有严格数学理论基础的数据处理方法。

滤波理论最先是由 Колмогоров 和 Wiener 提出的平稳随机过程的滤波理论。这些理论在不少科技领域内获得了广泛的应用,并在应用中得到了发展。但这种理论有不足之处,首先这种滤波方法要求使用全部历史数据,因此计算机要具备很大的存贮量和计算量,以至有时无法实际计算。其次,这种理论在解决非平稳过程问题时给不出多少可行的办法。因此这种滤波已越来越不能满足实际应用的需要。后来 Kalman 和 Bucy 等人提出了一种新的递推滤波方法,这种方法不需要保存全部历史量测数据,当新的数据测得后,根据新的数据和前一时刻的滤波结果,递推出现在时刻的状态估计量来,因此减少了滤波装置的存贮量和计算量,它的适用范围也突破了平稳随机过程的限制。卡尔曼滤波成功地应用于飞行器的导航、导弹制导等方面,在工业自动化方面也有成功的应用,在大气科学方面也正在探索将之用于气象分析和预报,并有了可喜的进展。

卡尔曼滤波需要对滤波对象构成一定形式的动态系统,并以这种动态系统为基础进行递推滤波。一个动态系统,一般由两组方程来描述。一组方程是反映所需要估计的状态随机向量 $x(t)$ (即信号)随时间变化的物理规律;另一组方程则表现不同时刻对于状态

