

气候动力模式 与模拟

曹鸿兴 著



气象出版社

气候动力模式与模拟

曹鸿兴 著

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 提 要

本书分两部分:基础篇和前沿篇。基础篇叙述气候动力模式的基本原理,论及的模式有:能量平衡模式(EBM)、辐射-对流模式(RCM)、随机-动力模式(RDM)、大气环流模式(AGCM)和耦合模式(CGCM)等。基础篇力求给读者以清晰、总观的概念和方法,并由此掌握气候动力学与数值模拟的基本内容。前沿篇则着重论述当前国际气候界关注的若干论题,如温室效应、“核冬天”、非线性气候动力学等;其中给出了作者自己的研究成果,表达了作者对某些问题的观点。

本书既可以用作大气科学与相关学科的大学高年级学生、研究生的教材,也可供从事气象、海洋、生态、农业、林业、水文和环境等领域的工作者参考。

气候动力模式与模拟

曹鸿兴 著

责任编辑:殷 钰 终审:纪乃晋

封面设计:牛 涛 责任技编:岳景增 责任校对:刘祥玉

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂排版 北京市顺义兴华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/32 印张:10.5 字数:190千字

1994年5月第一版 1994年5月第一次印刷

印数:1—1000 定价:11.00元

ISBN 7-5029-1543-5/P·0642

序

气候学是一门古老的学科,但古典气候学是描述性的,它研究全球的、区域和局地的大气平均状态。直到本世纪70年代,情况才发生了重大变化。气候动力学与气候数值模拟异军突起,经20余年的发展,这一领域已成为大气科学、环境科学的重要分支。如研究二氧化碳等温室气体的气候效应必须运用气候动力理论与气候数值模拟才能得到有意义的科学预测。

天气动力学研究从中小尺度到行星尺度的天气变化,旨在更好了解天气的物理过程从而最终为作准天气预报而努力。气候动力学旨在研究气候系统,即由大气圈、海洋圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈五个子系统构成的综合系统的行为以及五个子系统之间的相互作用,以更好了解气候的物理化学过程,最终为作准气候预测而努力。可见天气动力学与气候动力学之差异是明显的。气候研究当今在国际和国内都受到了前所未有的重视,因此学习气候动力学与气候模拟不仅对在校的大学生、研究生是迫切需要的,而且对关心这一问题的气象、环境、地理学者也值得下功夫去了解 and 深究。

在我国,现代气候学的研究始自竺可桢、涂长望等的先驱性工作,经过几代科学家的努力,已对气候学发展作出了重大贡献。但在气候动力学与气候数值模拟方面由于受到计算机能力的限制,与世界先进国家相比还有较大差距。我们应起直追,加强地学、数学、天文学、环境科学等多学科之间的协

作,为建立有我国特色的气候动力理论和气候模式作出努力。

八五计划期间,我国已投入了大量科研基金来资助气候研究项目,如“全球气候变化预测、影响与对策研究”、“气候动力学与气候预测理论研究”、“短期气候的预测理论与预测方法研究”、“灾害性气候的预测及其对农业年景和水资源调配的影响”、“全球变化和我国未来生存环境”等。在国际上,世界气象组织正在实施世界气候研究计划(WCRP)并正在筹建世界气候预测研究院,1992年在巴西环境首脑会议上签署了气候变化框架公约。这一系列活动都反映了人们对气候及其关连的环境问题的高度重视。而这样的世界性气候研究,定将在气候动力模拟方面得到更丰硕的成果。这将为气候预测定量化和气候预测业务系统的建立以及推动我国和全球气候研究的发展作出贡献。

曹鸿兴同志化了几年的心血,精心选材撰写成本书,在一本篇幅不大的书里,将这一领域的基本问题和主要研究方向深入浅出地作了阐述,这无疑对了解动力气候的基础知识和气候模拟的发展趋势都会有所裨益。我深信,本书的出版对我国气候动力学的发展将起到积极作用。

陈联寿

1993年7月于北京

前 言

气候是人类和生命赖以生存的地球环境的组成部分。当今，人类活动的巨大规模已达到了可能扰乱乃至破坏地球气候的程度。因此，气候研究受到了空前未有的重视，不但是目前科学研究的前沿学科之一，而且成为国际政治和外交的一个方面。1992年6月在巴西国际环境首脑会议上签署了气候变化框架公约，表明了各国政府对保护全球气候的决心和承诺。

如果说，30年前，气候的定量研究还处在初创阶段，那末今天，气候动力学和气候数值模拟已构成了气候科学的主流方向之一。当代气候学研究的一个显著特点是建立气候系统的数学模型，探索系统中的物理-化学过程，运用高速计算机来分析和模拟气候变化，藉此达到预测气候的目的。

作者早先的研究方向是概率统计、模糊数学及其在气象中的应用，然而，始自1982年春天，在德国洪堡基金会资助下我在汉堡大学做博士后研究，课题是气候数值模拟及其检验。1984年回国后在北京气象学院几度为研究生讲授动力气候并编写讲义，所以一直想写一本书来为年轻人提供学习方便且满足气象学者和相关学科的同仁查阅的需要。可以说，本书的完稿是尽了这一久藏的心愿。另一方面，本书的撰写也是作者对自己最近10年来科研和教学的一个总结。

至今动力气候已有了长足的进步，论文日益增多，1986年就开始出版国际性刊物“Journal of Climate Dynamics”，

内容涉及到数学、物理、系统科学、地球科学、非线性科学、数值计算和随机理论等多个学科。在一本不大篇幅的书里是不可能包罗这么多内容的。因此，本书被分成两个不同层次但又相互联系的部分：基础篇和前沿篇。故名思义，基础篇是介绍气候动力学的基础知识，或者说是这学科的入门知识，为大学高年级学生、非气候专业研究生和欠缺这方面知识的人阅读。前沿篇则以作者的研究成果为主线、兼收国内外研究成果的精萃撰写而成，目的是论述气候动力模式与数值模拟的若干论题的新结果，以便为未来更丰硕的创新研究提供阶梯。

基础篇是在拙著“动力气候概论”(陕西气象专刊，1988)基础上增删而成。在概念上尽可能讲清气候模式的物理内涵，在数学表达上尽可能做到自包含和深入浅出。总之，希望在讲清基本原理的前提下，力求基础篇的内容简明扼要、浅显易懂，使读者对主题能获得一个清晰的概念和图象。

在前沿篇中为了顺利阅读，对耗散结构、协同论、混沌动力学等作了基础性介绍。对凡涉及的论题，则以叙述当今最新、最基本的内容为主。限于篇幅，象纬向平均模式没有写入，30—50天季内变化，高空准两年振荡等也按当前流行的分法不列入动力气候中。

大家知道，一本书的完稿不但充溢作者的辛劳，也必定是他人热忱相助的结晶。因此我要深深感谢我的同事和朋友们。吴其勋先生为整编抄写本书付出了辛勤劳动，江野同志撰写了第三章的最初内容，封国林为澄清一些数学公式协助推导，魏凤英、赵宗慈、刘宗秀和孙力强等在本书写作期间提供了许多帮助，在此深表谢意。同时感谢王淑凤女士描绘了本书全部插图。

作者学识浅薄、水平有限,书稿中遗漏和不妥之处,敬请读者指正。

曹鸿兴
于北京
1993年4月

目 录

序 前言

第一部分 基础篇

第一章	气候系统与气候变化	(1)
1.1	气候的定义及其表示	(1)
1.2	气候系统的组分	(5)
1.3	气候系统中的物理、化学过程	(9)
1.4	气候的稳定性和气候系统中的反馈机制	(15)
1.5	气候模式的分类	(17)
1.6	气候变化	(20)
第二章	能量平衡模式	(28)
2.1	能量平衡模式的一般概念	(28)
2.2	Budyko 模式	(29)
2.3	Sellers 模式	(34)
2.4	二维能量平衡模式	(40)
2.5	能量平衡模式的扩展	(48)
第三章	辐射-对流模式	(52)
3.1	模式要点	(52)
3.2	原理	(55)
3.3	辐射通量计算	(61)
3.4	应用	(74)
第四章	大气环流模式和耦合模式	(82)
4.1	综述	(82)

4.2	构成大气环流模式的基本方程	(84)
4.3	海洋模式	(88)
4.4	耦合模式	(92)
4.5	气候平均场的模拟	(94)
4.6	气候变率的模拟	(104)
4.7	敏感性试验	(109)
第五章	随机-动力气候模式	(118)
5.1	基本原理	(118)
5.2	随机模式	(123)
5.3	一般随机-动力气候模式的 Fokker-Planck 方程	(131)
5.4	模拟气候平均状态的统计力学途径	(136)
第六章	零维气候模式	(145)
6.1	零维气候系统的基本方程	(145)
6.2	定态解与分岔	(146)
6.3	零维气候模式的 Fokker-Planck 分析	(156)

第二部分 前沿篇

第七章	非平衡态理论在气候模拟中的应用	(165)
7.1	耗散结构	(165)
7.2	协同论基本原理	(174)
7.3	熵平衡模式	(180)
7.4	气候平衡态的形成和极值原理	(191)
7.5	协同论在气象中的应用	(196)
第八章	气候系统的非线性行为	(206)
8.1	混沌	(206)
8.2	离散气候系统中的周期与混沌	(214)
8.3	大型涡旋的自组织临界态	(224)
8.4	大气-海冰-海洋低维耦合模式	(230)
8.5	古气候模拟与随机共振	(249)

第九章	人为气候变化的模拟	(258)
9.1	核冬天	(258)
9.2	科威特油井大火的模拟	(270)
9.3	二氧化碳的温室效应	(275)
9.4	毁林对气候的影响	(285)
第十章	我国气候及其成因的模拟	(291)
10.1	雨季进退	(291)
10.2	海温对我国气候影响的模拟	(301)
10.3	夏季风模拟	(307)
10.4	新疆区域气候模拟	(310)
10.5	陕北干旱气候模拟	(315)

CLIMATE DYNAMIC MODEL AND SIMULATION

by Cao Hong-Xing

CONTENTS

Forword

Preface

Part I Fundamentals

1	Climate Systeem and Climate Change	(1)
1	Definition of Climate and Climatic Representation ...	(1)
2	Components of Climate System.....	(5)
3	Physical and Chemical Processes in Climate System	(9)
4	Stability of Climate and Feedbacks in Climate System	(15)
5	Classification of Climate Model	(17)
6	Climate Change	(20)
2	Energy Balance Model	(28)
1	Element of Energy Balance Model	(28)
2	Budyko Model	(29)
3	Sellers Model	(34)
4	Two Dimensional Energy Balance Model	(40)
5	Extension of Energy Balance Model.....	(48)
3	Radiation-Convective Model	(52)
1	Model Primer	(52)
2	Principle and Equation.....	(55)
3	Computation of Radiation Flux.....	(61)

4	Application	(74)
4	General Circulation Model and Coupled Model	(82)
1	Outline	(82)
2	Basic Equations for General Circulation Model	(84)
3	Ocean Model	(88)
4	Coupled Model	(92)
5	Simulation of Climatic Mean Field	(94)
6	Simulation of Climatic Variability	(104)
7	Sensitivity Experiment	(109)
5	Stochastic-dynamic Climate Model.....	(118)
1	Fundamentals	(118)
2	Stochastic Model.....	(123)
3	Fokker-Planck Equation in General Stochastic -dynamic Climate Model	(131)
4	Statistical Mechanics Approach to Simulation of Climate Mean State	(136)
6	Zero Dimensional Climate Model	(145)
1	Basic Equation of Zero Dimensional Climate System	(145)
2	Steady state Solution and Bifurcation	(146)
3	Fokker-Planck Analysis of Zero Dimensional Climate Model	(156)

Part II Frontier

7	Application of Nonequilibrium Theory to Climate Simulation	(165)
1	Dissipation Structure	(165)
2	Element of Synergetics	(174)
3	Entropy Balance Model.....	(180)

4	Formation of Climate Equilibrium and Extremum Principle	(191)
5	Application of Synergetics to Meteorology.....	(196)
8	Nonlinear Behaviour of Climate System.....	(206)
1	Chaos	(206)
2	Periodicity and chaos of Discrete Dynamical System	(214)
3	Self-organized Criticality in Large scale Vortex	(224)
4	Low Dimensional Model of Coupled Atmosphere -Sea-ice-Ocean	(230)
5	Paleoclimate Simulation and Stochastic Resonance	(249)
9	Simulation of Human-made Climate Change	(258)
1	"Nuclear Winter"	(258)
2	Simulation for Oil Well Fire in Kuwait.....	(270)
3	Greenhouse Effect Due to Carbon Dioxide	(275)
4	Climatic Effect Due to Deforestation	(285)
10	Simulation of Climate in China and Its Cause	(291)
1	Advance and Retreat of Rainy Season.....	(291)
2	Simulation of influence of Sea Surface Temperature on Climate in China.....	(301)
3	Simulation of Summer Monsoon	(307)
4	Simulation of Regional Climate in Xinjiang	(310)
5	Simulation of Drought Climate in the Northern Part of Shanxi Province	(315)

第一部分

基础篇

第一章 气候系统与气候变化

本章对气候的定义、气候系统的组成部分,以及发生在气候系统中的物理、化学过程作一般性介绍,以便对气候系统有一个总的概貌性了解。随后简要叙述了在不同时间尺度上的气候变化,气候动力学和气候数值模拟的终极目的是为了定量描述这种变化。

1.1 气候的定义及其表示

1.1.1 气候的定义

人们通常说今天天气很好,是指这一天的天空晴朗、温度适中,微风等。这句话对不同季节不同地点均可使用。而说青岛的气候宜人,是指青岛夏天不热、冬天不很冷、温度宜人等。由此可以看出天气和气候是两个不同的概念。

天气往往可以看作是某一特定时刻的整个大气状态或者被定义为瞬时的大气状态。气候则可以认为是大气许多不同状态总体的一个统计集合,在古典气候学中定义气候是大气

的平均状态或各种气象要素与气象现象的平均状态。有的气候学家将气候定义为天气的总和,气候是辐射、地表和大气环流长年相互作用下的特征性天气状况,这里特征性天气状况包括寻常天气也包括极端天气。因此我们说天气是瞬时可观测的,而气候是长年可观测的。尽管天气和气候之间有明显的区别,但要给气候下一个确切的定义还是很困难的。

在本书中,与目前通行的观点相一致,我们把气候理解为大气众多状态的一个统计集合,可用这个集合的统计量来表示气候^[1-3]。常用的统计量是集合的数学期望,即均值,以及二阶矩,即标准差。这样,我们把气候视为概率的,即气候变化由均值(气候值)和标准差(变率)来定量描述,特定时间尺度的气候变化用由此相应的时间段的统计量之差来描述,气候异常由实际气候态与平均态之差来描述。

1.1.2 气候的表示

用什么物理量来表示气候以及用多长时段的统计量来表示气候是气候研究中首先要解决的问题,但可惜这是目前气候学中解决得很差的问题。

首先气候表示量应该是多维的,这是因为任何单独一个气象量(物理的或化学的)都不能很好地表示气候。例如两地的年降水量相等,但一地的降水集中在夏季,为短时暴雨所致。而另一地则为长年连绵阴雨的结果,显然两地的气候是不同的。这时需要用降水类型出现频数来表示,以区分两地的气候。何况常用的气象要素如温度、降水、气压和湿度等本身就组成了一个多维向量。尽管已提出了若干综合指数来概括多要素的综合作用,但往往顾此失彼。

直至数值天气分析发展以前,天气图是凭藉对天气过程的物理认识手工绘制的。如根据挪威学派理论,在锋面处等

压线绘成折角，其它地方则以匀称圆顺为准则来画。实际上这样匀顺的结果就有可能把小尺度系统平滑掉，但能把气旋尺度的天气过程表示得很清楚。对流层高空图能把长波系统清晰表示出来。而小范围的稠密站点天气图则能将中小尺度天气系统表示出来。总之，用瞬时天气图能很好地表示天气系统和天气现象。为过滤短波系统，制作了空间平均图和时间平均图。这些图，如5天平均图就能清楚地表示出长波—超长波系统。更长时间的平均图，如旬、月、季和年的平均图，可用来表示更长时间尺度的大气运动。但这些图能否很好地表示相应时间尺度的大气过程还是个问题。这个问题实际上就是气候表示问题，即如何能将气候本身及其变化通过某种数学手段将其揭示出来。应该说在电子计算机广泛使用前，用平均图来表示气候是一种简便有效的方法，但在观测资料用计算机加工的今天，人们应该探讨更好的气候表示的手段。

我们可以将大气运动粗分为两大类，一类是与行星尺度相当及小于行星尺度的运动。这一类运动从分子振荡、风的脉动、声波、重力波、湍流、雨团、锋面、气旋和反气旋，直到长波、超长波。另一类是大于行星尺度的运动，其运动的时间尺度需和地球公转、地球史、星体演化相联系，即所谓历史气候、地质气候和天文气候的一些问题。大气运动有着明显的谱特征，不同尺度的运动其行为是很不相同的，因此需要用不同手段来处理观测资料以准确地显示出不同尺度大气运动的行为。平均和滑动平均是人们表示不同尺度运动的一个经典手段。但理论和实践都已说明，平均法虽能起到滤波作用，但对波幅的缩减影响甚大，使观测资料产生畸变。

数字滤波是一种消除噪音、提取信息的数据处理技术。低