

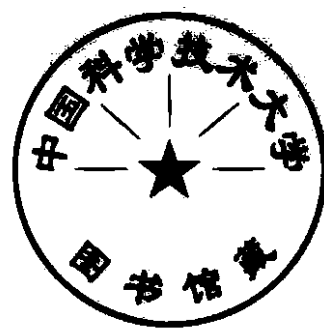
气候动力学

倪允琪 编著

气象出版社

气候动力学

倪允琪 编著



气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书是作者自1985年以来在为研究生讲授“近代大气环流理论专题”的基础上编写而成的。内容有现代大气环流和气候动力学的最新观测事实、理论研究和数值模拟的结果。其中包括气候的观测和诊断,大气中的低频振荡和遥相关,中纬对流层大气中常定和准常定波动的传播理论,模式大气中的持续性气象异常现象的诊断研究,波和平均气流的相互作用,大气中强迫耗散的非线性系统,海气系统及其对气候的影响,气候敏感性,云和辐射的相互作用及其对气候的影响,气候系统的动力学分析。最后还介绍和讨论了数值模拟的最新进展和一些问题。

本书内容丰富,可作为气候、地理等专业的大学高年级学生的教材,也可供与此有关的专业科研人员、科技人员阅读。

气 候 动 力 学

倪允琪 编著

责任编辑 顾仁俭

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球印刷厂印刷

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: 850×1168 1/32 印张: 20.375 字数: 523千字

1993年5月第一版 1993年5月第一次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5029-1164-2 / P·0542 (课)

定价: 9.70元

前 言

本书是作者自1985年以来在为研究生讲授“近代大气环流理论专题”的基础上编写而成的。

气候动力学发展很快，涉及面很广，我深知，一个人是无法完成全书所有内容的编写任务的，因此我不得不借助于已经出版的国内外有关书籍；严格来说我仅仅是编写了这一本教材。尽管如此，我仍然希望，通过多年的劳动和对大量文献和有关专著的理解来撰写的这本教材，能对国内有关的研究生、科研人员入门时有所帮助。希望读者通过本书对气候动力学的内容、概念和方法以及气候动力学本身所提出的问题能有所了解。书中可能存在不少错误，还望读者指正。同时，气候动力学发展很快，有些最新内容无法收入本书，上述两点还望读者谅解。

本书在撰写过程中得到王国民博士、谭本旭博士、张向东博士研究生的大力相助。他们在本书中撰写了以下各节：

王国民：4.7 大气遥相关型的正压不稳定理论

谭本旭：7.5 非线性Rossby波动理论的研究

张向东：8.5 ENSO动力学的理论研究

虽然在本书封面的编著者中没有他们的名字，但实际上他们都参加了本书的撰写工作，他们都是我研究工作中的年青合作伙伴和朋友。尤其是王国民博士，在我离校期间，由于他的大力协助，才使本书得以按时出版。同时还要指出的是全书的插图由金仪璐完成，稿子由周德佩和其他朋友帮忙誊清。在此向他们表示感谢。

本书在编写过程中得到气象出版社的大力支持，在此作者深表谢意。

最后在我完成全书之际必须感谢我的老师黄士松教授、伍荣生教授，以及已经离开气象界的金汉良教授在我学习和工作中给予的帮助、指点和支持，我深深地向他们表示敬意。

倪允琪
于南京大学
1991.7

目 录

前言

第一章 引论	(1)
1.1 气候动力学的任务、特点和方法	(1)
1.2 气候动力学的研究进展和今后的展望	(3)
1.3 世界气候研究计划(WCRP)的简介.....	(11)
第二章 气候的观测和诊断	(14)
2.1 气候系统	(14)
2.2 气候系统的物理约束	(16)
2.3 分析方法	(19)
2.4 气候的诊断	(23)
2.5 结论和讨论	(37)
第三章 大气中的低频振荡和遥相关	(40)
3.1 不同时间尺度大气振荡及地理分布特征	(40)
3.2 不同时间尺度大气振荡的时间演变特征	(42)
3.3 遥相关	(49)
3.4 季节内时间尺度 (30—60天周期) 的振荡现象.....	(55)
3.5 产生低频振荡的机制	(61)
3.6 结论	(67)
第四章 中纬对流层大气中常定和准常定波动的传播理论	(69)
4.1 引言	(69)
4.2 Rossby波的纬向传播.....	(70)
4.3 Rossby波的经向传播.....	(74)

4.4	Rossby波的垂直传播·····	(97)
4.5	热力强迫 ·····	(110)
4.6	在多层模式大气中,对地形和常定热源强迫的 响应 ·····	(114)
4.7	大气遥相关型的正压不稳定理论 ·····	(129)
第五章	在模式大气中的持续性气象异常现象的诊断研 究·····	(144)
5.1	引言 ·····	(144)
5.2	模式大气中的低频振荡和遥相关 ·····	(145)
5.3	模式大气中的40—50天振荡 ·····	(154)
5.4	模式大气中的阻塞现象 ·····	(166)
5.5	讨论 ·····	(174)
第六章	波和平均气流的相互作用·····	(176)
6.1	引言 ·····	(176)
6.2	描述平均运动的基本方程 ·····	(176)
6.3	波作用量和位势拟能 ·····	(180)
6.4	EP通量和波作用量·····	(183)
6.5	Eliassen-Palm剖面图 ·····	(188)
6.6	地转非加速原理 ·····	(190)
6.7	极地平流层的爆发性增温现象 ·····	(193)
6.8	赤道平流层低层的准二年振荡 ·····	(194)
6.9	水平的瞬变涡旋通量对时间平均气流的净局地 影响的诊断研究 ·····	(198)
6.10	讨论 ·····	(202)
第七章	大气中强迫耗散的非线性系统·····	(204)
7.1	引言 ·····	(204)
7.2	Lorenz系统 ·····	(205)
7.3	阻塞高压与多平衡态 ·····	(214)
7.4	非线性相互作用引起的大气环流的季节	

变化·····	(225)
7.5 非线性Rossby波理论的研究·····	(231)
7.6 讨论 ·····	(239)
第八章 海洋-大气系统及其对气候的影响 ·····	(242)
8.1 引言 ·····	(242)
8.2 海气相互作用和海洋环流 ·····	(243)
8.3 南方涛动和El Niño ·····	(257)
8.4 海洋-大气系统的数值模拟·····	(277)
8.5 ENSO动力学的理论研究 ·····	(301)
8.6 讨论 ·····	(332)
第九章 气候敏感性 ·····	(335)
9.1 引言 ·····	(335)
9.2 气候敏感性和它的反馈效应 ·····	(337)
9.3 全球能量平衡和敏感性分析 ·····	(339)
9.4 冰-反照率反馈·····	(344)
9.5 IR反馈 ·····	(354)
9.6 热容量和热惯性 ·····	(357)
9.7 行星轨道参数理论和古气候 ·····	(364)
9.8 陆面过程和区域气候的敏感性 ·····	(371)
9.9 统计显著性问题 ·····	(375)
9.10 结论 ·····	(380)
第十章 云和辐射的相互作用及其对气候的影响 ·····	(381)
10.1 引言·····	(381)
10.2 云的分布·····	(383)
10.3 辐射过程·····	(387)
10.4 辐射和对流的平衡·····	(404)
10.5 云-辐射相互作用对气候影响的研究 ·····	(412)
10.6 结论·····	(427)
第十一章 气候系统的动力学分析 ·····	(428)

11.1	引言·····	(428)
11.2	气候模拟的基础·····	(430)
11.3	时间常数和积分约束·····	(439)
11.4	描写完善气候系统长期变化的统计-动力模式 (SDM) ·····	(452)
11.5	典型的确定性系统·····	(462)
11.6	随机-动力系统的气候: 随机强迫的 影响·····	(473)
11.7	结论和讨论·····	(476)
第十二章	气候模式和气候模拟·····	(479)
12.1	大气环流模式及其在气候研究中的应用·····	(479)
12.2	海洋环流模式及其模拟·····	(534)
12.3	大气环流模式和海洋环流模式的耦合·····	(556)
12.4	使用耦合模式进行气候模拟的一些问题·····	(563)
12.5	讨论——气候模拟中的若干问题·····	(584)
参考文献	·····	(592)

第一章 引 论

1.1 气候动力学的任务、特点和方法

气候动力学是气候学科的一个重要分支。由于大气环流的状态决定了全球和区域性天气气候的类型及其时空演变特征,因此,气候动力学是以地球流体力学和大气环流动力学为基础,是大气科学与海洋学等地球科学和物理学、数学以及计算机科学相互交叉的一个前沿学科。当前,从该学科的发展来看,它和当代大气环流以及大尺度、长期动力过程理论的发展越来越紧密,在很多方面都已很难严格定义气候动力学、大气环流和大尺度动力学之间的区分和差异,实际上它们是相互联系、相互渗透的大气科学动力学理论中极为重要的部分。

近十年来,气候异常席卷全球,导致大片土地日趋沙漠化,粮食减产,水资源和能源出现危机。

如,1972年美国由于严寒带来能源危机,经济损失达200亿美元。1988年美国中西部严重干旱,粮食减产37%;而孟加拉却遭受大水灾,全国四分之三土地受淹,300万人无家可归,6000万人生活受影响。在我国,受气候异常的冲击更为严重,平均每年有三亿亩耕地受水旱灾害影响,重灾年可达七亿亩,约占耕地面积三分之一,1991年6、7月江淮流域遭受到大面积百年不遇的严重水灾。因气候异常而造成旱涝灾害占自然灾害所造成的总损失的87%左右。显然,了解异常气候的变化规律和形成机制,并对异常气候作出较为可靠的预测,已成为各国政府做出决策和社会发展所必要的重要条件。对这些问题的研究和解决是气候动力学的重要任务和目标。目前,虽然国际上在这一重要领域的研究已

取得重大进展，但离满足上述要求还有一段距离。因此，发展气候动力学和气候预测理论研究不仅具有重大的科学意义，也具有十分重要的经济意义和社会意义，是一项十分紧迫的任务。

当代气候的特点在《当代气候研究》（叶笃正、曾庆存、和郭裕福，1991）一书中详细地进行了讨论。其主要特点有：（1）经典气候把气候当作静态来研究，因此常用多年“统计平均”来描述气候状态；而当代气候认为气候是不断变化的，因此，研究某个地区或全球范围的各种时间尺度的气候变化是当代气候的主要任务之一。（2）在当代气候中引进了“气候系统”的概念，气候系统的子系统包括大气、海洋、冰雪圈、陆地表面（岩石圈）和生物圈，因此，气候的形成和变化不仅是大气内部的状态和行为的反映，而且也是气候系统各子系统相互作用的结果。（3）在研究方法上经典气候主要采用统计方法和定性描述方法，而当代气候则要求对气候系统进行定量观测和综合分析，并对气候形成和变化的动态过程进行理论研究和数值模拟。气候动力学是当代气候研究领域中的一个主要分支，当代气候学的研究特点决定了气候动力学研究具有三个方面的主要特征：第一，应用动力学诊断方法揭露大气中时间尺度为一周以上的各种异常气象现象及其变化。例如季节内振荡和平流层准二年振荡（QBO）的发现，平流层爆发性增温和ENSO事件的诊断研究都属于这一范畴。第二，从气候系统的各子系统之间的相互作用入手研究上述异常气候的产生机制，例如从海气相互作用入手研究ENSO过程。第三，研究在上述气象异常现象形成中的动力学过程。例如研究球面二维Rossby波的传播过程来解释大气中季节内振荡和遥相关特征；从波流相互作用的动力学过程来研究QBO和平流层爆发性增温的形成机理。因此，气候动力学所涉及的范围包括从产生异常气候的源；由源引起的长期动力过程；异常气候的出现的整个过程。当然其最终目的不仅仅是要了解气候异常产生的原因、过程，而且要提出预测这种气候异常的动力学方法。

就研究方法来讲，气候动力学的研究方法应包括动力学诊断方法、纯理论的研究方法（即寻找描写某一过程的数学-物理方程组的解析解）和数值模拟方法（利用AGCM和OGCM或CGCM来研究气候异常现象）。后两种方法属于气候动力学的范畴我想不会有很大异议，在这里我要特别强调动力学诊断方法也是气候动力学研究中的主要手段。其原因是任何动力学理论的研究必须有观测事实为前提，在观测事实揭露中最有效的手段是动力学诊断，同时，动力学诊断方法也是建立在动力学理论基础上的，它是动力学理论研究成果的一种应用。例如E-P通量剖面图。E-P通量剖面图是一种新的动力学诊断方法，但这种方法的提出完全建立在波流相互作用理论研究的基础上。由此可见，动力学诊断方法也应是气候动力学研究方法中的一种。由于它是理论研究和数值模拟的基础，又是揭露和发现新的大气异常现象的重要手段，因此，有必要加强这种方法的应用研究，才能为改进有坚实物理基础的气候模式和正确理解气候系统各子系统之间的相互作用并展现气候变化过程和机制奠定基础，使气候预测得以实现。

1.2 气候动力学的研究进展 和今后的展望

要谈到气候动力学的研究进展，我们不得不回顾大气环流和大尺度动力学的研究历史，这是因为正如我们在前面介绍的那样，气候动力学是在大气环流和地球流体动力学的发展基础上建立起来的。这主要依赖于观测技术的提高，使全球的观测资料不断增多，不断揭示出新的大气现象；另一方面，数学、物理学，特别是计算机和计算数学的发展，使得大气环流和大尺度动力学从简单、定性论述的学科变成一种比较严格的数理学科，并在此基础上进而发展到现阶段的气候动力学。

1.2.1 大气环流和大尺度动力学的进展回顾

大气环流和大尺度动力学的发展是相辅相成的，大气环流的发展提出新的理论问题，促进了动力学的发展，而动力学的重大突破又加深了对大气环流的认识。从大气环流和大尺度动力学的发展过程来看，大体上可分为四个阶段（黄荣辉、曾庆存和杨大升，1989）：

第一阶段：大气波动力学的兴起。三圈环流的提出、赫姆霍茨的涡旋概念的建立、挪威学派的锋面学说和气旋动力学的发展为长波理论的创立奠定了理论基础。1939年，Rossby 不仅从观测事实上发现长波，而且从理论上提出了长波理论。他的这一发现在气象学上是一划时代的进展，开创了大气环流和动力学的新纪元。以后，Charney 和 Eady 提出斜压不稳定理论，郭晓岚提出了正压不稳定理论，叶笃正提出了 Rossby 波的频散理论。这些理论的提出使大气科学进入到数理科学的阶段，而尺度分析理论的发展又使大气科学进入定量预报阶段成为可能。

第二阶段：新的大气环流观测事实的揭示，其中包括急流的发现、大气环流物理量输送的计算、平流层爆发性增温现象的发现等使大气环流产生了两个新的分支：一是大气环流的数值试验；另一是 Lorenz 的能量概念，从而加深了对大气环流物理本质的理解。

第三阶段：大气环流数值试验的兴起与发展。Phillips 在 1956 年首先使用二层准地转模式成功地模拟了大气环流，以后由于计算机和计算技术的发展由准地转模式进入到原始方程模式，由格点模式发展到谱模式，而且模式中所包含的物理过程及其参数化也更加完善。不仅用大气环流模式进行大气环流的数值模拟，而且将大气环流模式和海洋环流模式耦合。从数值试验的对象来看，已经从月、季环流演变和年平均状态发展到季节变动、气候模拟，甚至古气候模拟。

第四阶段：近代动力学的发展。由于一系列新的观测事实的发现和准两年振荡、热带的Rossby-重力混合波、Kelvin波以及三维遥相关的发现为近代大气动力学的发展提出了新的理论课题，从而引起大气动力学一系列新的领域（如行星波产生机制和传播特征的研究、波与平均气流的相互作用、非线性动力学、热带动力学）的发展，甚至提出了“地球流体动力学”这一新概念和新领域。

1.2.2 气候动力学的最新进展

中国气象学会动力气象学专业委员会（1987—1990）工作总结中指出：大尺度动力学近年来有一个极明显特点，就是向气候动力学的方向发展。这主要表现在三个方面：其一是同多重平衡态、混沌和可预报性相联系的非线性动力学的发展；其二是大气低频振荡、季节内振荡和10—20天振荡（包括阻塞流型）的动力学研究；其三是行星波动力学。

1.2.2.1 低频动力学

a) 低频振荡和遥相关理论——准常定行星波动力学

自Wallace等（1981）发现了北半球冬季五种遥相关型，Hoskins和Karoly（1981）提出了大圆路径传播理论，黄荣辉和Gambo（1982）也提出了准常定行星波传播的两支波导理论。Hoskins等（1981）研究了热力和地形强迫的定常响应，黄荣辉和Gambo（1982）使用34层准地转模式作了对大地形和准常定热源的响应研究。

上述结果都是建立在线性理论的基础上得到的，Alpere（1983）、Liu（1983）、Jacgmin和Lindzen（1985）都认为应用线性理论就可以得到常定波动的主要特征，但Nigam等（1986）使用AGCM证明线性理论的适用性以及它的局限性。雷兆崇（1988）指出在纬向平均基流相对弱的区域和层次上，非线性响应和线性响应有明显差异。所以非线性理论在低频动力学的研

究中也取得较大进展。Warn和Stewartson(1978)提出非线性对临界层的作用; Killworth和Mcintyre (1955) 研究了Rossby波在临界层的吸收、反射和超反射问题; Held等(1987、1988)提出球面上正压和斜压切变流上扰动的线性和非线性衰减, 以及在非线性和耗散作用下临界层附近Rossby波的破碎现象。

在这一领域中特别活跃的是使用 AGCM 作大气对海温异常响应的研究。世界上几乎所有著名的模式如美国NCAR和GFDL的GCM、NASA/GLAS GCM、UCLA的GCM, 日本的MRI、英国的GCM 都模拟过这一问题。得到的共同结果是热带地区降水增加, 热源两侧Walker环流减弱, 东侧加强, 北半球冬季温带地区产生PNA遥相关型。

近年来, Sardeshmukh和Hoskins (1988) 指出了散度风引起的涡度平流在热带和温带相互作用和遥相关动力学中的重要意义, 以及Webster (1988) 用赤道某些区域能量积累和发射理论较好地解释了温带大气对赤道SSTA位置不敏感问题。王国民等(1991)研究表明时间平均环流的空间结构对低频波列的结构特征有重要影响, 这就解释了模式大气对SSTA响应时对基本态敏感的问题。

b) 季节内振荡

热带大气季节内振荡的传播特征和产生机制相对来讲研究得比较透彻, 近年来在这方面研究的主要进展有:

观测资料分析表明, 热带30—60天振荡的传播特征主要是纬向一波或二波结构的势函数波沿赤道东传特征; Lau等(1987)分析OLR资料发现赤道印度洋—赤道西太平洋之间存在偶极子型振荡, 周期为30—60天; Lau(1987)、Zhang等(1991)分析了模式大气中30—60天振荡是模式大气内部动力过程产生的振荡现象, 它与外强迫异常无关, Lau等(1988年)提出热带大气季节内振荡的源——移行对流热源—东传的CISK-Kelvin波的维持机制, 李崇银(1988)提出西传CISK-Rossby波维持机

制；Chao (1987) 提出东传Rossby波分量加大对流区水汽辐合来解释30—60天周期，Emanuel (1987) 提出表面风扰动-蒸发之间的反馈机制认为可能是低频波东传的原因。但是无论 GCM 或简单模式模拟的东传速度比观测值至少快30%—50%。Sui 和 Lau(1989)认为移动性 Wave-CISK机制维持东传波，波速依赖于加热廓线的垂直结构和基态的稳定度，为此改进了对流加热处理，引进了下界面强迫的调制作用，较好地解决了上述问题。

中高纬大气季节内振荡的研究远没有热带大气成熟。Lau等 (1986) 分析了热带OLR资料和500hPa 位势高度的相关场，发现中高纬季节内振荡反映了PNA型和EUP 型之间的转换，其周期为30—60天；李崇银也分析了 500hPa 位势高度场得到了类似结果；Lau (1987) Zhang等 (1991) 分析了模式大气资料，也发现与观测资料有类似的现象，Zhang等 (1991) 进一步提出中高纬季节内振荡是中高纬常定波振幅和位相振荡，具有波包络传播特征，同时又进一步指出惯性重力波振荡和常定 Rossby 波的相互作用是引起中高纬大气季节内振荡的一种可能机制。以后，Wang和Ni(1991)又比较未滤除重力波和滤去重力波模拟结果，证实了上述看法是正确的。

c) ENSO 动力学

ENSO现象是热带大气中最强的气候信号，抓住ENSO信号有助于预报短期气候异常现象。近年来，这是一个最新的研究领域、进展很快。Schopf 和 Suarez (1987) 使用大气和海洋均为二层的耦合模式，结果产生了周期为3—5年的ENSO型的变化。由此可见，ENSO是非线性自激振荡产生的，其振荡能量来源于耦合模的不稳定性，其时间尺度依赖于海洋波；Battisti (1988) 采用Gill线性大气模式和二层海洋模式给出了类似ENSO的年际变化，周期为3年或4年，SST异常振幅为2℃，风扰振幅为1.5 m/s。他把ENSO现象归结为耦合系统的不稳定，并且从风场变化、海洋中Kelvin波和Rossby波传播、反射以及SST变化之间

相互作用说明ENSO过程; Lau等 (1988)强调了湿对流对海-气耦合的增强效应; Cane (1990) 用简化的海气耦合模式得到ENSO的4年周期解, 认为ENSO是海-气之间非线性相互作用的结果。当前ENSO研究中还有许多问题, 这一领域的研究也刚开始, 可以预计不久将有更大发展。

d) 持续性异常气象的研究

近年来重点放在观测分析方面, 如阻塞等。在理论上主要采用高截断谱模式研究 (Charney 和 Devore, 1979; Reinhold 和 Pierrehumbert, 1982, 1985; Legras和Ghil, 1985; Vantard等, 1988; Mukougwe, 1988)。

近两年来就热带外行星尺度大气环流持续性异常进行了不少GCM模拟, Barker和Horel (1988) 利用NCAR的GCM 1200天积分结果进行了滞后型相关分析; Mechoso等 (1988) 使用UCLA的GCM的模拟结果, 分析了北太平洋地区持续性异常特征变量并和观测进行了比较; Kitoh (1989) 使用日本MRI的GCM 12年模拟结果, 分析了持续性异常; Ni等 (1991) 使用低阶谱模式的5年模拟结果和IAP模式25年模拟结果, 分析了持续性异常现象及其形成机制。

1.2.2.2 非线性动力学研究

非线性动力学研究主要应用于阻塞研究、混沌研究和可预报性研究。

a) 阻塞研究: (i) 使用波-波相互作用原理研究阻塞形成。Egger (1978)、Wiin-Nilsen (1986) 提出自由波和地形波非线性共振相互作用产生阻塞。(ii) 使用波-流相互作用原理研究阻塞。Kalnay-Rivas和Merkine (1986) 提出基流沿纬向非均匀性产生的不稳定可能激发背风波列, 从而形成阻塞。(iii) 外部源、汇强迫形成阻塞。Tung和Lindzen (1979, 1986) 提出波动和大地形非线性共振可产生阻塞; 朱正心、朱抱真(1982) 强调热力作用, 纪立人引入大地形作为强迫, 张佩和倪允琪(1991)