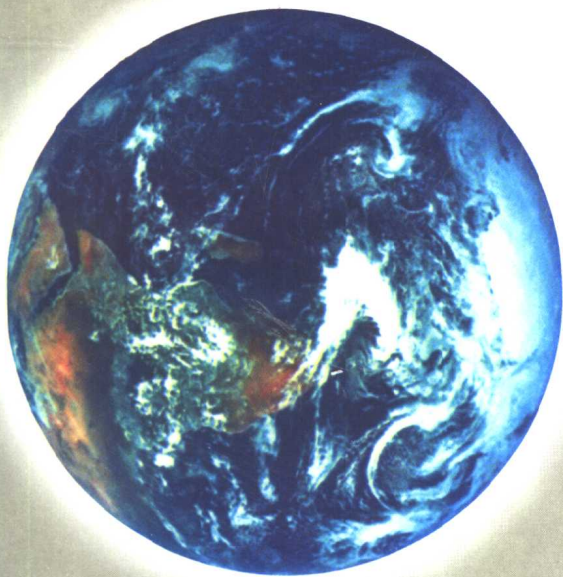


气候物理学引论

李晓东 著



An Introduction to Physics
of Climate

气象出版社

气候物理学引论

李晓东 著
卢咸池 审校

气象出版社

内容简介

本书是作者在总结气候学研究心得和教学经验的基础上,广泛地吸收现代气候学的最新理论和成果,在物理学的框架体系下撰写的一本气候学教材。全书分为十章,第一章为引言,介绍了气候物理学的基本内容和本书的结构。第二章到第六章是气候系统的物理基础,包括气候系统的基本组成和性质、气候系统的数理描述、气候系统的观测事实、气候变化以及气候系统的循环和平衡机制等。第七章到第九章详细讨论了气候模式以及气候模拟和预测。第十章作为结束篇,讨论了气候学研究的一些理论问题。

本书可供气象气候研究机构 and 高等院校大气科学专业的研究生和高年级本科生作为教材或参考书使用,也可供气候科研工作者和气候学教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候物理学引论/李晓东著. —北京:气象出版社,1997.10

ISBN 7-5029-2282-2

I. 气… II. 李… III. 气候学:大气物理学 IV. P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21807 号

气候物理学引论

李晓东 著

责任编辑:黄慧靖 李太宇 终审:周诗健

封面设计:田春耕 责任技编:黄慧靖 责任校对:刘继锋

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号 邮政编码 100081)

北京市鑫正大印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * * *

开本:850×1168 大 1/32 印张:7.625 字数:198.1 千字

1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月第一次印刷

印数 1~1500 定价:10.00 元

ISBN 7-5029-2282-2 /P·0843

前言

从1993年开始,作者为北京大学地球物理系大气科学专业的本科生、硕士和博士研究生讲授《气候学基础》、《动力气候》和《气候模拟》等课程。为了适应气候学研究的迅速发展,这些课程的内容需要不断调整、补充和修改。尽管如此,仍然需要一门高度精炼的、能及时全面反映气候学研究的新思想和新动态的、客观体现现代气候学框架体系的课程。后来,作者参加了我国“八五”气象气候类优秀教材评审和“九五”气象气候类教材规划,更深刻地体会到写这样一本教科书的必要性和迫切性。

由于种种原因,现有的一些气候学教材和著作不适合作为现代气候学的教科书使用。例如,专著往往过于专业化、内容太繁杂、篇幅甚长;大多数教材都沿用地学而不是物理学的框架结构,在内容组织上没有平衡的、宏观的、兼顾到现代气候学各个方面的体系;一些气候学书籍大都有与著者的研究经历有关的侧重、过分的强调、片面甚至错误之处;近年来出版的一些气候学教科书也不具有长久的生命力,一般在几年以后就过时了。凡此种局限性,都是不适合于作为教材使用的。基于上述理由,作者便萌发了撰写一本现代气候学教科书的念头。经过两年的准备后,1995~1996年度,作者为大气科学专业研究生正式开设《气候物理学引论》课程。

《气候物理学引论》是作者在总结多年的气候学研究心得和教学经验的基础上,广泛地吸收现代气候学的最新理论和成果,在物理学的框架体系下撰写的一部适合大气科学专业高年级本科生、研究生和教师使用的教材。全书分为十章,第一章为引言,介绍了气候物理学的基本内容和本书的结构。第二章到第六章是气候系统的物理基础,包括气候系统的基本组成和性质、气候系统的数理描述、气候系统的观测事实、气候变化以及气候系统的循环和平衡机制等等。第七章到第九章详细讨论了气候模式以及气候模拟和

预测。第十章作为结束篇,讨论了气候学研究的一些理论问题。

本书可供气象气候研究机构和高等院校大气专业研究生和高年级本科生作为教材或参考书使用,也可供气候科研工作者和气候学教学人员参考。本书并未使用高深的数学和物理学知识,假如读者具有一定的气象气候学和数学及物理学的基础,研读本书是不太困难的。对于有兴趣于现代气候学的非专业人员,阅读之后对气候物理学的框架结构、核心内容、基本概念、研究现状以及未来的发展趋势等也会有大致的了解。另外,本书的一些章节既可单独使用亦可重新组织后使用。例如,前六章可独立作为《气候学基础》的课程内容;前三章加上第七到第九章,可作为《气候模拟》的教材。

作为一本好的教科书,在结构平衡和内容取舍等方面需要不偏不倚、新颖合理,然而要做到这一点是非常困难的。尽管我对这本书倾注了极大的热情和心血,但由于《气候物理学引论》内容博大精深,限于水平,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

在本书的出版之际,首先感谢三位导师王绍武教授、施尚文教授和张如一教授;本书中引用了他们的著作或译作中的一些材料。感谢刘若新教授和刘式达教授的指教和鼓励。特别感谢赵宗慈研究员和林本达教授,他们教给我很多有关气候模拟和动力气候等方面的知识。

感谢严中伟研究员、李维京研究员、王向东博士、罗勇博士为本书的写作提供了大量的素材,并在有关章节的内容上与作者进行了有益的讨论。同时感谢本书所有直接和间接的引文作者。

在本书的写作过程中,冯会芙同志、于超美同志、陈振华同志、于文同志、仲维英同志、博士生毕鸣同学、龚道溢同学以及同事梁福明同学、辛国君同学、张庆红同学等给予了热情的帮助;崔贵珍博士、张广远博士、杨荫博士、武伟博士、石伟博士、叶瑾琳博士、朱锦红博士、宁杰远博士、陈祖幸博士、张代洲博士、李万彪博士、钱

维宏博士、刘和平博士、荣平平博士、陈友民博士、张国梁博士等也给予了极大的支持,一并表示谢意。

感谢选修作者讲授的气候学课程的 1990~1995 级大气科学和其他专业的本科生和研究生,他们也就本书的内容提出了许多宝贵意见。

本书的出版得到北京大学研究生课程建设项目和国家“九五”项目的部分资助。

李 晓 东

1997 年夏于北京大学

目 录

前言

第一章 引言	(1)
1.1 气候的定义	(2)
1.2 气候学的研究对象	(3)
1.3 气候学的研究方法	(5)
1.4 气候学发展简史	(7)
1.5 关于气候物理学	(9)
第二章 气候系统	(12)
2.1 气候系统概况	(13)
2.2 气候系统的组成	(15)
2.3 气候系统的基本性质	(19)
2.4 气候系统的热量平衡	(26)
2.5 气候系统演变的时空尺度	(29)
第三章 气候系统的数学物理描述	(35)
3.1 气候系统基本方程的类型	(36)
3.2 大气基本方程	(36)
3.3 海洋基本方程	(38)
3.4 陆面过程的基本方程	(39)
3.5 海冰系统的基本方程	(40)
第四章 气候观测和诊断	(42)
4.1 气候监测	(43)
4.2 大气	(44)
4.3 海洋	(55)
4.4 冰雪圈	(61)
4.5 气候诊断	(64)

第五章 气候变化	(68)
5.1 气候变化的研究方法	(69)
5.2 地质时期的气候变化	(71)
5.3 历史时期的气候变化	(77)
5.4 近百年气候变化	(81)
5.5 年际变化和气候异常	(86)
第六章 气候系统中的平衡和循环机制	(91)
6.1 热量输送与平衡	(92)
6.2 能量循环	(96)
6.3 角动量循环	(99)
6.4 水分循环	(103)
6.5 碳循环	(105)
6.6 熵收支与平衡	(107)
第七章 气候模式	(112)
7.1 气候模式体系	(113)
7.2 气候模式控制方程的推导	(116)
7.3 辐射对流模式	(120)
7.4 能量平衡模式	(122)
7.5 纬向平均动力学模式	(127)
7.6 三维环流模式	(128)
第八章 气候模拟	(132)
8.1 气候模拟概述	(133)
8.2 气候模式评估	(140)
8.3 气候变率	(146)
8.4 海洋	(150)
8.5 冰雪覆盖	(153)
8.6 厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)	(157)
8.7 温室效应	(162)
8.8 太阳活动和地球轨道要素变化	(167)

8.9 火山活动	(170)
8.10 古气候	(175)
第九章 气候预测	(180)
9.1 气候预测概述	(181)
9.2 未来气候变化趋势预测	(184)
9.3 月平均环流预报	(187)
9.4 跨季度预报试验	(191)
9.5 业务预报和预测简介	(196)
第十章 气候学研究的若干理论问题	(200)
10.1 气候学研究方法	(201)
10.2 气候模式	(202)
10.3 气候变化	(204)
10.4 气候预测	(208)
 附录 1 气候带与气候型	(210)
附录 2 一个大气环流模式的例子	(213)
附录 3 全球环流模式研究小组	(216)
附录 4 国际互联网络上气候资料与信息的查询	(220)
附录 5 主题词和缩写词	(223)
 主要参考书目	(230)

第一章

引 言

本章首先介绍气候的概念和定义,然后讨论气候学的研究对象和研究方法。第四节简要回顾了气候学发展史。最后一节介绍了本书的主要内容和结构。

1.1 气候的定义

气候的概念最初是为了和传统的天气概念相区别而提出的。关于气候的比较古老的定义明显地体现了这一点,例如,“气候是一定地点或一定地区上接近地球表面大气的平均状况”,或“气候代表天气的一般综合”等等。后来,气候的定义中逐渐包括了更多的内容,例如“气候是地球上某一地区大气多年的一般状态,它既反映平均情况,也反映极端情况,是多年间各种天气过程的综合表现;气象要素的各种统计量是表述气候的基本依据”。这些经典的气候定义都强调了气候和天气在时间尺度上的区别,且立足点仅仅限于大气。

约在 80 年代,气候学家开始认识到,气候不仅仅是针对大气而言的,气候是“气候系统的全部成分在任一特定时段内的平均统计特征”。这种气候的定义明确地强调气候的物质基础是气候系统的各个组成部分,而不像天气的概念——它是仅仅针对大气而言的;同时气候又是一个和特定的时间阶段相联系的相对概念。和更早期的经典的气候概念相比较,这种传统的定义已超出了经典气候概念中气候的三大要素:月平均气温、月总降水量和月平均气压 30 年平均的统计特征的范畴。

这种传统的气候定义,显然仍有不完善之处。事实上这种定义只是对应着气候学家们目前对气候系统的客观描述能力。我们认为:“气候是对气候系统的统计上的、动力上的、各种时空尺度和层次上的客观物理描述”;或者说,“气候是可用由高阶矩统计量,如方差、协方差、相关等构成的一组平均量来定义的,具有特定的时间尺度的气候系统的结构和行为”。这一定义比传统的气候定义更加完善一些。首先,气候并不仅仅局限于气候系统的统计特征;其次,平均统计特征的时间尺度尽管是可变的,但应该超出一般典型天气尺度的上限;再次,气候系统的特征并不是仅仅局限于平均统计,我们可以很容易地举出反例来。

近二十多年,联合国环境计划署(UNEP)、国际科学联盟理事会(ICSU)、世界气象组织(WMO)等一些国际性组织进行了一系列有许多国家的科学家参加的国际科学研究计划,极大地促进了气候学的研究,气候理论日趋成熟。现在我们已经不满足于仅仅用静态的平均、孤立的大气和描述性的手段去描述、理解和研究气候。我们已经习惯了在物理学而不是地学的框架体系下,从全球气候系统的角度,通过对气候系统的各种合理统计,运用动力学的方法系统地研究气候,并力图对未来各种时间尺度的气候状态进行预测。

1.2 气候学的研究对象

自然科学,尤其是物理学以及与之相关的交叉科学,是以认识客观物质世界的基本属性,研究物质运动和变化的基本规律为对象的。人们认识和研究客观物质世界的根本目的就是利用自然、改造自然,使自然规律为人类服务。气候学也不例外。毫无疑问,气候学就是研究气候系统(或气候)的学科。气候系统是由大气、海洋、陆地表面、冰雪圈和生物圈等组成的相互作用的整体。因为气候系统有连续的外界能量输入,且其各个组成部分之间通过物质和能量交换紧密地相互联系和影响,所以气候系统是一个非线性的开放系统。控制全球气候系统的基本过程是入射太阳短波辐射的加热和射出地球长波辐射的冷却。这种加热和冷却及其时空差异是驱动大气和海洋运动变化的原动力。气候学研究的就是这个极其复杂的巨系统。

气候学的研究内容很广,其基本内容包括:

(1) 将气候系统当作研究的物质客体,研究其一般特性,如大气圈、水圈、冰雪圈、陆地表面、生物圈等的组成物质的微观性质(包括物质组成、密度、范围和结构等),以及这些圈层的宏观性质(包括热力学和动力学属性等);

(2) 研究气候系统及其子系统中各种能量的源汇、性质、转换

和输送等；

(3) 研究气候系统及其子系统在各种时空尺度上的行为特征,研究气候系统演变的客观规律,进而解释各种典型气候事件发生和发展的具体规律；

(4) 预报未来各种时空尺度上气候系统的状态；

(5) 研究气候变化对自然环境和人类社会产生的影响,研究由于人类活动可能引起的气候变化,为从科学上和政策上确定或制定约束人类活动的行为提供理论依据；

(6) 研究人类在何种程度上、以什么样的方式影响气候系统,进而为人类最大限度地合理利用气候资源以及改善人类的生存环境提供科学依据。

近二十多年来全球范围的气候异常已经对许多国家的粮食生产、水资源和能源带来了十分严重的影响,气候变化及其对经济和社会发展的影响引起了当前世界各国政府、科学家以及一些国际组织的深切关注。面对气候异常和气候变化对人类生存环境的严峻挑战,世界气象组织、国际科学联盟理事会、联合国环境规划署等国际组织积极倡议、组织和实施了一些大规模和有效的国际合作研究计划,极大地促进了现代气候学的发展。包括卫星在内的全球气候观测网为我们提供了丰富的气候系统资料,许多国家的科研机构先后建立和发展了自己的气候模式,再加上超高速、大容量超级计算系统的普遍使用等等,使得动力气候学的研究有了飞速的发展。今天,气候学已经成为一门不仅具有重大理论意义而且具有重大现实意义的学科。

气候变化必然会对自然环境和人类社会产生显著的影响,而气候变化在各个子系统中的行为表现有明显的甚至是本质上的差异。考虑到人类活动引起的气候变化可能导致不可恢复的严重后果,研究气候变化对自然环境和人类社会影响的各种细节,对气候系统的脆弱性在科学上给出严格的评估是必要的、迫切的,具有重大的理论和实践意义。例如,食物生产(包括粮食、渔业、家禽、家畜

等)是关系到人类生存的直接因素,预先估计气候变化对粮食生产等的影响,就可以通过贮存和合理分配等有效的手段来减少食物生产的脆弱性。而估计气候变化对粮食生产等的影响必然需要综合考虑与食物生产有关的许多气候要素,如温度、降水、湿度、大气成分和极端气候事件等等。在这个方面,1927年的厄尔尼诺事件给秘鲁人上了严肃的一课。对寒冷期温度临界值有很大依赖性的澳大利亚落叶水果树的生产也是这方面一个很好的例子。

再如,气候变化对生态系统的影响是不可忽视的,所以,研究各种生物种类在变化的气候条件下能不能维持和如何变化,即气候变化如何影响生态系统的结构、功能和分布等也是非常重要的。例如,温带森林树种对增暖的适应能力的极限不会超过 $0.015^{\circ}\text{C}/10$ 年。与之相类似,极地和高山生态系统等对目前的气候变化来说也是非常脆弱的,面临着灭绝或失衡的危险。还有对海洋温度变化非常敏感的珊瑚礁及其他沿海生态系统同样面临着失衡的危险。

气候变化对水资源的影响也被认为是十分重要的课题,但这种影响非常复杂,我们现在还难以了解到其细节。但无可置疑地,气候变化对大范围旱涝、江河湖海、冰雪圈等等都肯定有明显的影响。而且气候变化对水资源的影响直接造成对人类的生存环境的影响,当然气候变化对人类的影响还包括许多其他方面的内容。

1.3 气候学的研究方法

气候学的研究方法广义上可分为两类:统计学方法和动力学方法,后者以气候模式数值模拟为核心内容。从本质上讲,统计分析的目的是揭示和认识现象间的联系,它是以积累的大量的观测资料为出发点的。而数值模拟则正好相反,它的目的是揭示隐含在现象中的固有的物理规律,其出发点是我们对事物的内在规律的理性认识。传统的气候统计学研究不能从根本上揭示气候系统的物理本质和规律性,仅仅是通过对气候观测资料的数值处理进而

对气候事件的结果做出解释和推测。表 1.1 简要地比较了在气候学研究中气候模拟方法和统计分析方法的区别。由于各种原因,在气候模拟中或多或少地要使用一些统计学方法,如初始场的形成、参数化、模式评估、模拟结果的分析等,特别在统计-动力模式的研制和试验方面更是如此。相对于模拟方法而言,统计方法在现代气候学的研究中也都有其优势——对资料没有严格的要求、计算用时少、对特定的现象和过程诊断研究方面的简明性以及广泛的适用性等等。另外,对有些用气候模拟的方法(形式上表现为求解偏微分方程组)所不能解决的一类气候学研究中的理论问题——非线性动力学问题,也可能用广义上的统计方法进行研究。

表 1.1 气候学研究方法:统计学方法和动力学方法的比较

项目	统计分析	气候模拟
时空维数	≤ 4	4 (三维模式)
变量	不限	6~7 (三维模式)
时域处理	谱方法、随机方法、 滑动自回归等	时间有限差分
空间场	EOF、遥相关、球谐函数展开等	依运动方程等联系
能量和物质输送	因子分析等	守恒定律
方程形式	不限	偏微分方程
整体性	差	好
对资料的要求	不限	特殊(初条件和边条件等)

非线性动力学的研究是一个全新的领域,它给许多学科的研究注入了新的活力。这里我们暂不讨论数学和物理学、广义和狭义的“非线性”概念的差别,仅仅指出在气候学研究中非线性动力学非常具有吸引力的一个方面——它可以触及到传统的统计方法和动力学方法或许都不能触及的领域。从研究问题的出发点看,它既可以像统计方法那样完全从观测资料出发,也可以像动力学方法那样从用微分方程描述的动力机制出发。从对研究问题的针对性

看,它不但可以针对以传统的统计方法为主要工具的所谓“黑箱问题”和“灰箱问题”,也可针对有严格的微分方程形式的“白箱问题”。从具体的研究方法来看,它也是非常复杂和多样的,既有统计研究的具体方法(如小波分析),也可以采用与动力学研究中对微分方程处理相类似的方法。有人或许会问,在气候学研究中这种方法有什么优点呢?我们认为,首先,非线性动力学方法是一个在动力学方法和统计学方法之间的桥梁,通过它可以建立这两种方法之间的联系;其次,它可以方便地被运用于系统的宏观和微观、整体(全局)和局部的某些联系的研究上,这一点在研究多时间尺度的气候变化中可能具有重要意义。但如何在气候学研究中合理地运用非线性动力学方法,如何将统计方法、动力学方法和非线性动力学方法结合起来,还是一个需要深入探讨的问题。

1.4 气候学发展简史

人类对气候的认识最早可追溯到有史记载之初。实际上,人类对气候的认识很可能更早。例如,曾经发现记录着约公元前 3000 年以来尼罗河每年洪水水位的碑刻以及有关尼罗河流域气候变化的碑文。中国从远古时代起就有许多关于洪水及其治理的传说。古希腊人也早就建立了与太阳光线的倾斜角度有关的热带、温带和寒带的概念。据说亚里士多德(Aristotle,公元前 384~322 年)曾写过气象学的著作,其中还专门有关于“希腊的气候变化与环境”的章节。约到公元 15 世纪中期地理大探险时期,希腊人就认识到气候还受大气环流、海陆分布等的影响。

中国的历史源远流长,有关气候的文献记载更为丰富。早在公元前 1000 年左右的殷代甲骨文中就已经有了关于风、云、雨、雪、雷暴等气象气候现象的文字记载。周代已建立了专门观测天气的机构。春秋战国时代已能根据风、云、物候的观测记录,确定 24 节气,并将之用于指导农业生产。秦汉时代的一些书籍中多有物候记录。据《后汉书》中记载,朝廷每年要求各地汇报从立春到立秋这段

时间里的雨泽情况。可以认为,在 16 世纪以前,人们对气候已经积累了一些感性认识。

从 16 世纪中期到 19 世纪末期,随着欧洲工业的发展,科学技术有了迅速的发展。航海技术的进步与地学的发展为气候学的发展打下了雄厚的基础。许多观测仪器的发明使得现代意义上的气象气候观测成为可能。约在 1860~1865 年一些国家开始绘制天气图。19 世纪末期,一些气候图问世,如世界年平均温度分布图、世界年平均降水分布图、世界月平均气压图等等。1883 年德国人 Hann(哈恩)出版了《气候学手册》三卷,这是气候学历史上最早的巨著。在这 300 余年中,人们已经开始积累气候观测资料,认识到了更多的气候现象,并试图分析和解释一些气候现象(如大气环流等)。

20 世纪初到 70 年代是经典气候学发展和成熟的时期。气候型概念的提出和气候分类(参见附录 1)可看作是经典气候学的“代表作”之一。40 年代,W. Koppen(柯本)和 R. Geiger(盖格尔)出版了五卷《气候学手册》,强调气候形成和气候变化的动力学研究。同时,Walker(沃克)将大气活动中心和世界气候联系起来,提出了三大涛动的概念,开创了气候诊断研究的先河(尽管气候诊断的提法是 70 年代以后才有的)。这些研究工作标志着经典气候学研究更加系统和更趋成熟。尤其第二次世界大战以后,在积累了比较丰富的现代气候观测资料的基础上(如海平面气压图、平流层气压图、海温格点观测、有关辐射收支的观测等),人们对大气环流状况进行了系统的研究。同时人们已经认识到了海洋在气候形成和气候变化中具有十分重要的作用,并且将其和太阳辐射、极冰等其他物理因子结合起来,进行长期天气预报试验研究。在对气候变化的认识方面也取得了极大的进展,例如气候变化原因的探讨,气候变化的史实的揭示等等。另外,70 年代开始,召开了一系列国际气候学学术会议,各个国家科学机构和科学家之间的交流也日趋频繁,标志着气候学研究迎来了一个新的历史时代。