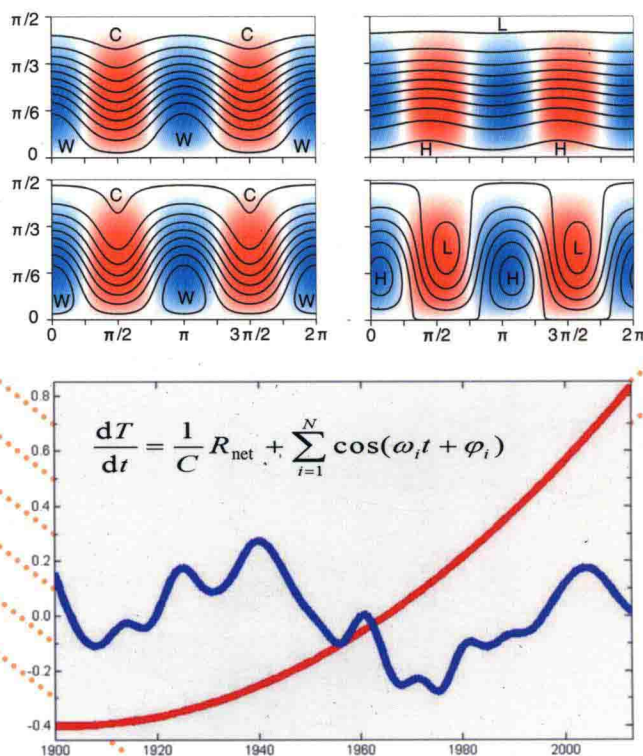


黄建平◎编著

物理气候学

PHYSICAL CLIMATOLOGY



物理气候学

黄建平 编著



内容简介

本书以物理学规律和动力学方法为基础来解释地球气候的形成及其演变特征。其主要内容有气候系统的物理描述,气候系统的辐射传输、能量平衡、反馈机制、敏感性和稳定性,气候系统的内部与强迫振荡,气候变化形成机理,气候模拟与预测等。

通过学习,可使学生对物理气候学中的基本概念、基本理论和基本方法有较为深刻的理解和掌握,为进一步学习后续专业课程及从事气候变化等相关领域的研究打下坚实的理论基础。本书适合于大气科学、地理学、生态学、环境科学等专业的本科生和研究生使用,也可供从事气候变化研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

物理气候学/黄建平编著. —北京:气象出版社,
2018.8

ISBN 978-7-5029-6825-0

I. ①物… II. ①黄… III. ①物理学-气候学
IV. ①P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 185224 号

Wuli Qihou Xue

物理气候学

黄建平 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号 邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com> E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:王萃萃 李太宇

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:13.5

字 数:340千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:42.00元

前 言

气候变化及其对经济和社会发展的影响已经成为当今世界各国政府及科学界十分关注的重大问题。目前人们的认知水平有限,还不足以回答涉及气候变化的所有科学问题,包括人类强迫因子和自然因子对气候变化的作用及重要性以及还在不断出现的新的现象和变化。只有继续加强对气候变化科学研究的广度和深度,不断地改善和提高认知水平,才能从根本上认识气候变化的规律,从复杂的现象中理解其本质。

自从气象学家 20 世纪 70 年代提出气候系统的理论以来,气候学的研究进入一个崭新的阶段。研究人员开始从气候系统各个子系统之间的相互作用来讨论气候变化,一些新发现、新观点、新方法、新理论层出不穷,使气候学得到了空前的大发展,特别是物理气候学原理和气候变化的数值模拟研究近 10 年来有了很快发展,并把它作为气候研究的主攻方向和目标。

为了适应培养上述研究人才的需要,迫切需要有物理气候学基本原理及方法的教材。本书即是为适应这种需求而编写的。物理气候学是研究气候系统中各种现象的演变规律的一门学科。探讨如何利用这些规律为人类社会和经济发展服务,特别是利用这些规律指导人类有序适应气候变化,以减缓气候变化对人类社会的影响,具有重要意义。

本书是在作者编写的《理论气候模式》的基础上改编而成的,在编写过程中还参考了作者和林本达先生共同编写的《动力气候学引论》一书。本书共分 12 章,较为系统地阐述了物理气候学的相关内容。第 1 章“绪论”,概括地叙述了地球气候的形成,提供了相关研究的历史发展,为后续章节做铺垫,同时便于具有不同学术背景的读者更好地理解本书的内容。第 2 章“气候系统的物理描述”,从物理学的角度解读了气候系统的基本概念和基本规律以及气候系统各成员之间的相互关系和作用。第 3 章“气候系统的基本方程”,根据第 2 章提出的基本物理学原理,通过适当的数学表述,给出了构成气候动力学的一组方程。气候动力学理论、数值模拟和动力诊断研究都是围绕气候动力学方程组及其各种简化形式展开的。第 4 章和第 5 章论述了气候系统中的辐射传输过程及能量平衡。第 6 章“气候系统的反馈机制”,表述了气候系统中各种复杂的反馈机制以及它们之间的相互作用,同时给出了一些用来衡量气候系统各种反馈作用大小的参数。第 7 章引入了敏感性概念和影响气候敏感性的因子,同时讨论了 CO_2 倍增的敏感性试验。第 8 章通过引入冰雪-反照率反馈建立非线性能量平衡模式,并讨论气候系统的稳定性

和非线性模式在气候模拟中的应用。第 9 章和第 10 章介绍了气候系统中以形成为分类标准的各种时间尺度的振荡,即气候系统的内部振荡及强迫振荡。第 11 章从影响气候物理过程和因子的介绍入手,论述了气候变化的形成机制。最后一章着重讨论了气候的模拟与预测方面的内容。本书是为高等院校大气科学类本科生编写的专业课教材,也可供相关专业的本科生或研究生以及从事大气科学和气候变化的人员学习和参考。

在编写过程中,杨宣、吴楚樵、华珊、祝清哲、秘鲁、汪美华、简碧达和刘晓岳等研究生为本教材绘制了部分图表、进行了文字的录入和校对,有些同学还对部分内容提出了补充和修改意见,气象出版社给予了大力支持,在此一并致以衷心的感谢。由于物理气候学涉及面广,内容丰富,加之时间仓促,受编著者的学识水平限制,错误、疏漏在所难免,请读者给予批评指正,以便再版时修改。

黄建平

2018 年 6 月于兰州大学

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 与气候有关的一些概念	1
1.2 气候学的发展	2
1.2.1 气候学的萌芽阶段	2
1.2.2 气候学的形成阶段	3
1.2.3 传统气候学阶段	3
1.2.4 现代气候学阶段	4
1.3 气候学的重大变革	5
1.4 气候学的主要分类	6
1.5 物理气候学的研究内容	7
参考文献	7
第 2 章 气候系统的物理描述	8
2.1 系统的概念	8
2.2 气候系统及其组成	9
2.3 气候系统的属性和物理过程	10
2.3.1 气候系统的属性	10
2.3.2 气候系统的热量平衡	11
2.3.3 气候系统的内部反馈	11
2.3.4 气候系统的外部强迫	12
2.3.5 气候系统对外部强迫的敏感性	12
2.4 海气系统的耦合	12
2.5 水分循环	14
2.6 生物—地球化学循环	16
2.6.1 氧循环	17
2.6.2 碳循环	18
2.6.3 其他循环	19
参考文献	20
第 3 章 气候系统的基本方程	21
3.1 大气运动方程组	21
3.2 海洋运动方程组	22
3.3 陆面过程的基本方程	24

3.3.1	动量通量公式	24
3.3.2	地气交界面的能量平衡方程	24
3.3.3	陆面的热量平衡方程	25
3.3.4	陆面水分平衡方程	25
3.4	海冰系统方程组	26
3.4.1	无雪覆盖海冰系统的热力学方程组	26
3.4.2	有雪覆盖海冰系统的热力学方程组	27
3.4.3	海冰系统的动力方程	28
3.5	气候系统的宏观描述	29
	参考文献	30
第4章	气候系统中的辐射传输	31
4.1	大气中辐射传输的基本特性	31
4.1.1	太阳光谱和大气的吸收谱	31
4.1.2	Lambert 和 Kirchhoff 定律	32
4.1.3	辐射传输方程	33
4.2	辐射强迫	34
4.2.1	辐射强迫的新概念	34
4.2.2	ERF 两种计算方法及其优缺点	37
4.3	温室气体排放指标	37
4.3.1	指标的简介	37
4.3.2	全球增温潜能的概念	37
4.3.3	全球温变潜能的概念	38
4.4	辐射-对流模式	39
4.4.1	模式的基本原理	39
4.4.2	短波辐射加热率	41
4.4.3	长波辐射冷却率	42
4.5	辐射与化学过程的耦合相互作用	43
	参考文献	46
第5章	气候系统的能量平衡	47
5.1	零维模式	47
5.1.1	基本方程和平衡态	47
5.1.2	射出长波辐射 $R^\uparrow$ 的经验公式	48
5.1.3	敏感性分析	48
5.1.4	随时间变化的解	48
5.1.5	对周期外源强迫的响应	49
5.2	一维模式	50
5.2.1	入射的太阳短波辐射	50
5.2.2	水平输送的极端情况	50

5.2.3 热量水平输送的参数化	51
5.2.4 常系数一维模式的解	52
5.2.5 与 Budyko 模式的比较	52
5.2.6 冰线纬度与太阳辐射强度的关系	53
5.3 Sellers 的一维模式	53
5.4 一维季变模式	57
5.5 二维模式	58
5.5.1 常系数二维能量平衡模式的解	58
5.5.2 将下垫面状况的地理分布引入模式	58
5.5.3 二维季变模式	59
5.6 水平二维上翻-扩散耦合模式	62
5.6.1 模式方程组	62
5.6.2 模式的解析解	63
5.6.3 对 CO_2 增加的局地瞬态响应	65
5.7 耦合能量平衡模式存在的问题	67
参考文献	67
第 6 章 气候系统的反馈机制	69
6.1 反馈的概念	69
6.2 反馈效应的定量描述	70
6.3 反馈响应的特征时间	72
6.4 气候中一些主要的反馈机制	74
6.4.1 气候中一些主要的正反馈的例子	74
6.4.2 负反馈的例子	75
6.5 生物-地球物理反馈	76
6.6 云的反馈调节作用	79
6.6.1 简化的海气耦合距平模式	80
6.6.2 云调节的海气系统的长期振荡	83
6.6.3 云量-地表温度反馈	85
参考文献	89
第 7 章 气候系统的敏感性	91
7.1 气候敏感性的概念	91
7.1.1 气候敏感性的概念	91
7.1.2 气候敏感性参数	91
7.2 气候的敏感性估算	91
7.2.1 无反馈时的气候敏感性	92
7.2.2 反馈对敏感性的影响	92
7.3 影响气候敏感性的因子	93

7.3.1	影响 $\frac{dT}{dt}$ 的因子	93
7.3.2	影响 $\frac{d\alpha}{dT}$ 的因子	95
7.4	气候对CO ₂ 和痕量气体的敏感性	97
7.4.1	CO ₂ 浓度加倍对气候的影响	97
7.4.2	其他痕量气体引起的气候变化	101
7.5	气候对气溶胶的敏感性试验	101
7.5.1	气溶胶对气候的影响	101
7.5.2	核战争可能引起的气候变化	102
7.6	气候对轨道参数和太阳常数变化的敏感性	103
7.6.1	地球轨道参数变化的影响	103
7.6.2	太阳常数变化的影响	103
7.7	气候对内部因子变化的敏感性	104
	参考文献	104
第8章	气候系统的稳定性	106
8.1	零维系统的稳定性分析	106
8.1.1	非线性零维模式	106
8.1.2	线性稳定性分析	107
8.1.3	非线性有限振幅的稳定性分析	108
8.2	非线性一维模式	109
8.2.1	复合反照率	109
8.2.2	极端输送的情况	109
8.2.3	常系数扩散模式的平衡解	111
8.2.4	变系数扩散模式的平衡解	112
8.3	一维系统的稳定性分析	112
8.3.1	线性稳定性分析	112
8.3.2	有限振幅的稳定性分析	114
8.4	小冰盖不稳定	116
8.5	气候突变	117
8.6	非线性二维季变模式	120
8.7	二维能量平衡模式对荒漠化模拟的研究	122
	参考文献	124
第9章	气候系统的内部振荡	126
9.1	30~60天低频振荡	126
9.2	大气涛动	130
9.2.1	北大西洋涛动(NAO)	131
9.2.2	北太平洋涛动与南方涛动(NPO与SO)	132

9.2.3 南极涛动	132
9.3 El Niño 与南方涛动	133
9.4 准两年振荡(QBO)	137
9.5 海冰气耦合振荡	139
9.5.1 确定系统的周期振荡	140
9.5.2 反馈系统对随机扰动的响应	141
参考文献	144
第 10 章 气候系统的强迫振荡	146
10.1 强迫振荡的物理机制	146
10.2 气候的日变化和年变化	150
10.3 太阳活动和轨道变化引起的强迫	151
10.3.1 太阳活动强迫	151
10.3.2 轨道变化强迫	153
10.4 米兰柯维奇(Milankovitch)周期	156
10.5 银河年与大冰期	157
10.5.1 万有引力系数(G)变化说	159
10.5.2 银道面物质分布不均说	160
10.5.3 银河系悬臂影响说	160
10.6 火山活动	160
参考文献	162
第 11 章 气候变化的形成机制	164
11.1 影响气候及其变化的物理过程	164
11.1.1 气候形成和维持的物理过程	164
11.1.2 造成气候变化的物理过程和因子	164
11.2 气候演变的时空尺度	165
11.3 气候变化的形成机制	166
11.4 增温停滞与协同振荡	168
11.5 海陆热力差异对增温停滞的影响	171
11.6 热带海温异常对北美降温的影响	177
参考文献	179
第 12 章 气候模拟和预测	181
12.1 纬向平均动力学模式	182
12.1.1 纬向平均模式的设计	182
12.1.2 涡旋输送的参数化	183
12.1.3 气候敏感性试验	184
12.2 相似-动力预报模式	186
12.2.1 相似-动力模式的基本原理	187
12.2.2 相似-动力模式的建立	188

12.2.3	模式的数值求解	189
12.2.4	季节预报试验结果	190
12.2.5	相似-动力方法在复杂模式中的应用	193
12.3	大气环流模式	194
12.4	地球系统模式	197
12.5	利用历史资料订正气候预估	199
	参考文献	203
编后记		206

第1章 绪 论

20 世纪 70 年代以来,世界气候灾害频繁,例如 1982—1983 年的厄尔尼诺事件带来的干旱、洪水、低温等气候灾害,造成世界经济总损失约 200 亿美元。另一方面,人类活动对气候的影响,以及工业化带来的大量化石燃料所产生的 CO_2 和其他温室气体含量的增加都对气候变化产生影响;过度开垦、森林砍伐和过度放牧破坏自然植被,在干旱条件下加速了沙漠化进程。世界范围的干旱和沙漠化趋势,以及频繁发生的各类气象灾害已经直接威胁人类赖以生存的粮食、水和能源等基本条件的维持。因此,寻找全球气候变化的规律,研究其变化的原因,探索气候预报的方法,从而对未来的气候趋势提出科学的估计,已成为世界各国政府和人民关注的实际问题。

由于现代科学技术的发展,人类对自然界的探测技术和处理资料的手段有了很大的进步。卫星观测技术的发展使得获取研究气候形成和变化所不可缺少的全球资料,特别是冰雪、海洋状态、云量、气溶胶和二氧化碳等非常规观测资料成为可能。而高速计算机的出现及伴随的数值模拟试验的发展则使得人们可以客观定量地研究气候形成和变化。气候科学受到了前所未有的重视,成为当前世界普遍关心的最重要、最迫切的科学问题之一。

气候学同各门基础科学、技术科学乃至社会科学间都有着广泛的联系。无论从理论还是从方法看,气候学和数学、物理学、化学、天文学、地学等基础学科以及大气科学各分支都有密切的关系,气候监测更需要应用各种技术科学。由于气候涉及人类生活和生产的各个方面,1972 年以来,在关于环境、粮食、水资源、沙漠化等一系列国际重要会议上,气候问题都占有显著地位。1979 年,世界气候大会提出的世界气候计划使气候学日益活跃,气候问题成为国际协作的重大课题。如今,气候学的含义也正在不断发展,包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈、生物圈和人类圈在内的地球系统的一系列概念也得以形成。下面首先介绍与气候有关的一些概念。

1.1 与气候有关的一些概念

一般认为,气候是地球上某一地区多年间大气的一般状态。它既反映平均状况,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(均值、极值、概率等),是表述气候的基本依据^[1]。由于太阳辐射在地球表面分布的差异,以及海洋、陆地、山脉、森林等不同性质的下垫面在到达地表的太阳辐射的作用下所产生的物理过程不同,使气候除具有温度大致按纬度分布的特征外,还具有明显的地域性特征。

首先我们要明确气候理论在本质上是概率的,各种气候过程都是作为多元随机过程来处理,而这些过程的统计特性则是气候研究的课题^[2]。例如,说某地区有一个平均槽或脊,并不意味着该地区天天都有平均槽或脊出现,只不过出现的频率相对较高而已。此外,统计时间长度不同,天气的统计特征也不尽相同。因此,气候这个概念隐含着—一个时间长度作为基础,即

使对某一确定的时间长度,气候的稳定性也仅仅是相对于天气而言的。根据研究和地质学考证的结果,人们发现不仅几十年或几百年的平均气候有显著差异,几万年乃至上亿年的平均气候状态也存在着变化,这种变化的幅度甚至更大。有的气候文献把一个月或一个季度的天气的统计特征也称为气候,这种意义上的“气候”则成了逐年变化的物理量。为了在统计意义上保持一致,我们将气候定义为在特定的 30 年期间取得的各种天气要素的平均。此外,为了更好地了解气候的定义,还需了解如下与气候有关的若干概念^[3]。

气候状态:定义为在地气系统的特定区域,大气、水圈和冰雪圈完整的变量组在特定时期的平均,这个时间间隔比个别天气的系统的生命史(几天量级)长得多,也比大气行为可被局地预报的理论时间极限(几周量级)长,因此,我们可以说月、季、年或十年的气候状态。

气候变化:定义为同类的气候状态在如两个 1 月或两个 20 年之间的差异。因此,我们可以说月、季、年或十年的气候变化。

气候异常:定义为一个特定的气候状态与同类气候状态的大量(或多年)平均的偏差。因此,我们可以说特定的 1 月或特定的年所代表的气候异常。

气候变率:定义为大量同类气候状态之间的方差。因此,我们可以说月、季、年或十年的气候变化率,这个气候变化率的定义包含个别气候状态变化率的方差。

气候噪音:气候状态本身除了受物理原因的影响而变化外,还受到统计原因的扰动,由于这些统计扰动来自天气的逐日变化,因此,它们在气候感兴趣的时间尺度上是不可预报的,这种统计原因的扰动被定义为气候噪音。这种噪音的振幅近似地随取平均的时间间隔的平方根而减小,但有些噪音在任何有限的时间尺度中都存在。

气候的可预报性:定义为潜在的可预报的物理原因造成的气候变化的大小与不可预报的气候噪声的大小之比值。

1.2 气候学的发展

气候学在发展过程中经历了从定性到定量、从简单到复杂、从低级到高级逐步的演变过程,是一脉相承的,前一阶段为后一阶段的形成与发展积聚了资料、丰富了经验,为进一步认识深化、理论创新提供了科学基础^[4]。通常把气候学的发展过程分为下列几个阶段。

1.2.1 气候学的萌芽阶段

早在中国古代,劳动人民对气候就有某些感性认识并加以总结。如在春秋战国时代,为了便于掌握农事活动,时人将一年分为二十四节气和七十二候,以五日为一候,三候为一气,各候各气都有其自然特征,合称气候。西汉(公元 206 年)以来,中国古代劳动人民在气象观测、气象仪器和对某些气象现象的解释上已达到相当高的水平,1424 年就有雨量器作雨量观测的记载,同时在应用气候方面也积累了许多丰富的知识,尤其是农业生产,各地利用当地气候的特征选择农作物物种、安排耕作制度,并利用气候资源发现、培育了许多名、特、优产品。宋代沈括在《梦溪笔谈》中通过物候现象的地区差异说明了各地气候的不同。

在古希腊时代,欧洲也出现了有关气候方面的记载。这一阶段人们对气候的认识是一种直接的感性认识。亚里士多德曾著《气象学》(约公元前 340 年)一书,对当时的天气和气候知识作了系统的总结。公元 2 世纪,托勒密将气候从赤道到北极划分为 24 个气候带。古希腊学

者发现,从希腊往北,太阳光倾斜加剧,气候转寒;往南,太阳倾斜减缓,气候转暖。这反映出气候的冷暖与太阳光线的倾斜程度有关。据此,他们将地球气候划分为五带,即:北寒带、北温带、热带、南温带和南寒带。16—17 世纪,温度表、气压表等仪器相继发明,并普遍使用。人们开始利用这些仪器的观测记录进行系统的气候研究。

1.2.2 气候学的形成阶段

18 世纪初发展起来的气候学,由于资料的积累和研究领域的扩大,人们对气候的认识越来越深入。随着科学技术的发展,有关温度表和气压表的发明相继问世,到了 18 世纪,工业的发展能提供标准基本统一的观测仪器,整个国际上开始收集和发行气象观测记录资料,使人们能从大量的气象观测资料中进行总结、归纳,并能与物理学原理结合起来,采用月平均值和年平均值,并用这类平均值对气候作叙述性的描述。至此,气候学才真正作为一种科学形态存在。1817 年,德国的 Von Humboldt A. (1769—1859) 根据全球 57 个气象站的观测资料,首先采用等温线的概念,绘制出世界上第一幅全球年平均温度分布图,并借助等温线图得出大陆东岸和西岸气候的差异,并根据植物与气候的关系,把全球划分为 16 个气候区。Humboldt 的工作被认为是近代气候学的开创工作。之后,德国的 Berghans H. (1797—1884) 于 1845 年绘制出世界降水量分布图,Dove H. W. (1803—1879) 于 1849 年出版第一部月平均等温图和温度距平图。英国的 Buchan A. (1829—1907) 于 1869 年根据盛行风资料首次绘制全球等压线分布图。俄国气候学奠基人 Boenkob A. N. (1842—1916) 1873 年开始将美国学者 Coffin J. H. 因去世而未完成的《全球的风》继续下去,在 1884 年出版了《地球气候与俄国气候》。同年德国的 Koppen W. P. (1846—1940) 首次提出气候分类法并对全球气候进行分类的尝试。奥地利的 Von Hann J. F. (1839—1921) 于 1883 年出版了一本被誉为气候学经典著作的《气候学大纲》,从而确立了气候学作为一门自然科学的基本轮廓。这一阶段主要表现的是气候要素的地理分布,并进行特征的描述。

但是,气候学在这个发展阶段中基本上没有突破准平均概念的束缚,在此阶段,统计学仅是对气候资料加工处理的基本手段和工具。这一阶段经历了大约一个半世纪,建立于“气候是大气的平均状态”的基本观念之上,主要是描述气候特征,也分析气候形成的原因。这期间得到的一系列基本认识,对今天的气候学研究仍有重要意义。

随着自然科学的飞速发展,尤其是数学、流体力学、气象探测手段和计算手段的进步,气候学的发展跨进了一个新的阶段。在第二次世界大战期间,由于要在天气图上标注高压、低压和锋面等,用气团和锋面的移行、频数、变性以及大气活动中心在气候形成中的作用作为理论基础来研究气候形成与气候变动,于是形成了天气气候学。气团、锋面、天气系统的气候学分析加深了对气候形成的认识。

1.2.3 传统气候学阶段

19 世纪后期,世界气象观测网逐渐形成。到 20 世纪初,气象学研究从描述性为主发展到以理论研究为主,出现了气旋模式,锋面理论,气团学说等,积累了许多天气图资料,人们开始进行气候形成及变迁的研究,气候学在各方面的应用受到重视。1900—1936 年,德国的柯本 W. P. 根据气候同植物的关系,对世界气候进行了分类。1920—1925 年,苏联的费奥多罗夫 E. E. 创立了综合气候学。1930 年,柯本和盖格 R. 发表了《气候学手册》,对气候学作了较全

面的评述。

20 世纪 30 年代初,伯杰龙 T. H. P. 和海赛尔贝格 T. 开创了天气气候学。在 30 年代和 40 年代索恩思韦特 C. W.、阿利索夫 Б. И. 等都进行了各自的气候分类(见索恩思韦特气候分类、阿利索夫气候分类)。20 世纪中期,随着高空气象观测、无线电技术、气象卫星和电子计算机的广泛使用以及人工气候模拟等方法的采用,气候学迅速发展。20 世纪 50 年代,菲利普斯 N. A. 第一次用流体力学方法在电子计算机上模拟了气候的形成。随着对海洋与大气相互关系的研究,一些学者从动力学角度研究地—气系统的辐射收支和能量转换,探讨气候形成原因。1950 年,英国布鲁克斯 C. E. P. 研究了地质时期和各个历史时期的气候。20 世纪 70 年代初,世界范围的气候异常引起人们的普遍关注,人们开始广泛开展气候变化的研究。1972 年,中国竺可桢发表《中国近五千年气候变迁的初步研究》一文。此后,中国学者又发表了中国五百年旱涝历史资料等。美国学者用数值方法模拟了 1 万多年前的古气候状态,并广泛开展了对未来气候变化趋势的研究。随着气象卫星的应用,气候资料的数量激增,用电子计算机快速处理气候资料的业务也随之发展,并随之提出了监视地球气候变化征兆的气候监测计划。从 20 世纪 70 年代起,气候学已扩展到同时涉及大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈的气候系统的研究。

1.2.4 现代气候学阶段

在天气气候学和物理气候学发展的基础上,人们对大气运动的认识更进了一步,开始在研究中大量采用动力气象学的基础理论,所研究的气候学问题逐渐与天气气候学产生分离,进而发展为动力气候学^[5],即从大气动力学方程、热力学方程和连续方程出发,在一定的初始条件和边界条件下经过适当的简化,用数值方法对方程组进行数值求解。用气候数值模拟方法所获得的结果在某种程度上可以较好地解释气候形成和气候变化中的物理机制,并可作为气候预报的有效途径。因为气候时间序列具有显著的周期性,但气候随时间的变化则是一个随机过程,所以气候问题既是一个动力学问题,也是一个统计学问题。动力气候学与统计气候学相互渗透的结果,发展成为随机动力气候学。同时动力气候学与物理气候学相结合,发展成为物理动力气候学,本书简称为物理气候学。

从 20 世纪 60 年代末开始,由于人们对气候变化研究的深入,认识到气候过程是一个非绝热过程,气候变化还受到其他许多因子的相互作用和相互影响。只讨论大气自身的变化是无法解释气候变化的,因此人们从系统论、信息论和控制论的观点研究气候分布和气候变化过程,提出了气候系统的概念。对气候变化的因果关系进行多学科交叉的深入探讨,这是现阶段气候学发展的必然趋势,也使气候学的研究发展到一个包括天文学、生物学以及地球科学各领域的多学科交叉的新阶段,即现代气候学。

现代气候学至少具有以下三个特点^[6]:

① 传统气候学把气候当作静态来研究,只是描述某地区的气候特点,而现代气候学则把气候看作是不同尺度(如年际尺度、十年际尺度、百年际尺度和千年际尺度等)变化的复杂系统,要求预测某个地区或全球范围的各种时间尺度的气候变化;

② 传统气候学把气候因子局限于大气内部过程,而现代气候学认为气候形成和变化不仅是大气内部状态和行为的反映,而且是与大气有明显相互作用的海洋、冰雪圈、陆地表面及生物圈所组成的复杂系统的总体;

③ 在研究方法上,现代气候学除了继承并发展了传统气候学的统计方法外,还要求对气候系统进行全面系统的观测和综合分析,并对气候系统相互作用过程和气候形成、变化的动态过程进行物理—动力学理论研究和数值模拟。

1.3 气候学的重大变革

1896年,瑞典科学家斯万 Ahrrenius 警告说,二氧化碳排放量的增加可能会导致全球变暖。然而,直到20世纪70年代,随着气候异常现象频繁出现和科学家们对地球大气系统的逐渐深入了解,气候异常才引起了大众的广泛关注。再加上现代科学技术的迅速发展,使得气候学发生了重大变革^[6]。这之后举行了一系列以气候变化为重点的政府间会议,例如1972年在瑞典斯德哥尔摩召开了联合国环境大会,在会上强调了地球气候对于人类有极重要的影响。1974年召开的联合国粮食大会,探讨了气候对世界粮食生产的重要作用,呼吁世界气象组织和联合国粮农组织建立气候警报系统。1974年世界气象组织与世界科学联盟在瑞典斯德哥尔摩召开气候的物理基础及其模拟的国际讨论会,着重研究了气候形成的物理机制和气候与人类的关系,并提出了气候系统(Climate System)的概念和世界气候计划(WCP)。1979年在日内瓦召开的第一次世界气候大会(WCC)批准了这一计划,并确认气候系统的研究是实施气候研究计划(WCRP)的重要理论基础。在1990年秋于日内瓦召开了第二次世界气候大会,大会期间呼吁建立一个气候变化框架条约,其确定的一些原则为以后的气候变化公约奠定了基础。

1990年12月,联合国执委会批准了气候变化公约的谈判。气候变化框架公约政府间谈判委员会(INC/FCCC; The Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change)在5次会议后,参加谈判的150个国家的代表最终确定于1992年6月在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上签署公约,为应对未来数十年的气候变化设定减排进程,该公约于1994年3月21日起生效。1995年起,该公约缔约方每年召开缔约方会议(Conferences of the Parties, COP)以评估应对气候变化的进展。1997年,《京都议定书》达成,温室气体减排成为发达国家的法律义务。2009年在哥本哈根召开的缔约方第十五届会议发布了《哥本哈根议定书》,以取代2012年到期的《京都议定书》。2015年12月,《联合国气候变化框架公约》近200个缔约方在巴黎气候变化大会上达成《巴黎协定》,指出各方将加强对气候变化威胁的全球应对,把全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内,并为把升温控制在 1.5°C 之内努力。这是继《京都议定书》后第二份有法律约束力的气候协议,为2020年后全球应对气候变化行动作出了安排。

另外,为了让决策者和一般公众更好地理解气候变化的科研成果,联合国环境规划署(UNEP; United Nations Environment Programme)和世界气象组织(WMO; World Meteorological Organization)于1988年成立了政府间气候变化专门委员会(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)。IPCC的作用是在全面、客观、公开和透明的基础上,对世界上有关全球气候变化的现有最好科学、技术和社会经济信息进行评估。1990年,IPCC发布了第一份评估报告,对政策制定者和广大公众都产生了深远的影响,也影响了后续的气候变化公约的谈判。1995年第二次评估报告提交给了UNFCCC第二次缔约方大会,并为京都议定书会议谈判作出了贡献。第三次评估报告于2001年完成,包括三个工作组的有关“科学基础”“影响、

适应性和脆弱性”和“减缓”的报告,以及侧重于各种与政策有关的科学与技术问题的综合报告。第四次评估报于 2007 年完成。第五次评估报告(2013 年完成)重点阐明了七方面的科学问题:一是更多的观测和证据证实全球气候变暖;二是确认人类活动和全球变暖之间的因果关系;三是气候变化影响归因,气候变化已对自然生态系统和人类社会产生不利影响;四是未来气候变暖将持续;五是未来气候变暖将给经济社会发展带来越来越显著的影响,并成为人类经济社会发展的风险;六是如不采取行动,全球变暖将超过 4°C ;七是要实现在 21 世纪末 2°C 升温的目标,须对能源供应部门进行重大变革,并及早实施全球长期减排路径^[7]。

1.4 气候学的主要分类

太阳辐射、大气环流,下垫面状况(如海、陆、植被)是气候形成的几个主要因子。然而,这些因子之间如何互相作用而形成一个地方的气候特征,其机理目前尚不能完全掌握。此外,由于人类活动使大气中的微量元素和污染物质含量增加而对气候变化的影响,及各种地球天文参数对气候的影响等,都使气候形成理论和气候变化的研究变得极其复杂。目前,按气候学研究的内容和对象及方法,气候学可分为以下几种。

统计气候学:统计气候学是使用数学统计方法对气候资料和气候要素进行时空特征及相互关系的研究。按气候学研究的空间尺度划分,有全球气候、北半球气候、大区域气候和地方气候等不同尺度的气候。按时间尺度划分,有年际气候变化、几十年以上的气候变化和万年以上的气候变迁等。

古气候学:古气候学是通过代用气候资料和气候模式对没有仪器观测记录的古代气候进行研究。要研究几十年以上的气候变化和万年以上变化周期的气候变迁,就需要有至少十倍于该周期时间长度的资料,所以,除现代气象资料外,还需要利用历史记载和树木年轮等进行分析,以延长资料年限。对于万年以上的变化,常利用地质岩心、冰心、化石等资料进行分析推测。

天气气候学:天气气候学是应用天气分析的基本方法和大气环流的基本理论对多年间大气环流的一般状态及其变动的规律性进行的研究。如:环流的分型及其出现的频率,天气系统的频率、强度和路径,大范围气候异常与大气环流的关系等问题。

物理气候学与动力气候学:物理气候学与动力气候学主要以动力学的理论和方法研究气候形成和气候变化的原因。主要内容包括:辐射平衡、热量平衡、水分循环以及大气中各种污染物质和微量元素等的变化与气候的关系。运用大型电子计算机进行气候模拟,是研究物理动力气候学的重要方法,这一新分支的出现,为气候学的理论研究开辟了新的前景。

生态气候学:生态气候学是研究地表生态系统与气候环境相互作用关系的学科。生态气候学内容丰富,涉及多学科领域,从个体、种群、群落到生态系统、景观的不同层次,从微观到宏观角度,研究天气、气候与生物间的相互影响、相互作用,揭示不同尺度下生物对气候变化的响应及其适应对策,探讨生态系统组成、结构和功能变化对气候、水资源和生物地球化学循环的影响。

应用气候学:应用气候学是一个比较广泛的领域,涉及所有与气候相关的生产和生活问题。它主要是根据工农业生产和生活等各方面的特殊需要,研究它们同气候的相互关系,以及如何将气候知识广泛应用于各个方面。主要研究内容为:气候资源的利用,气候灾害的防御,