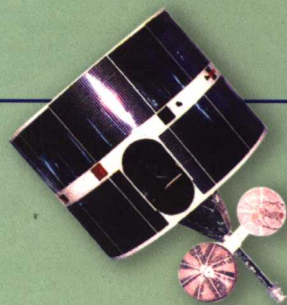


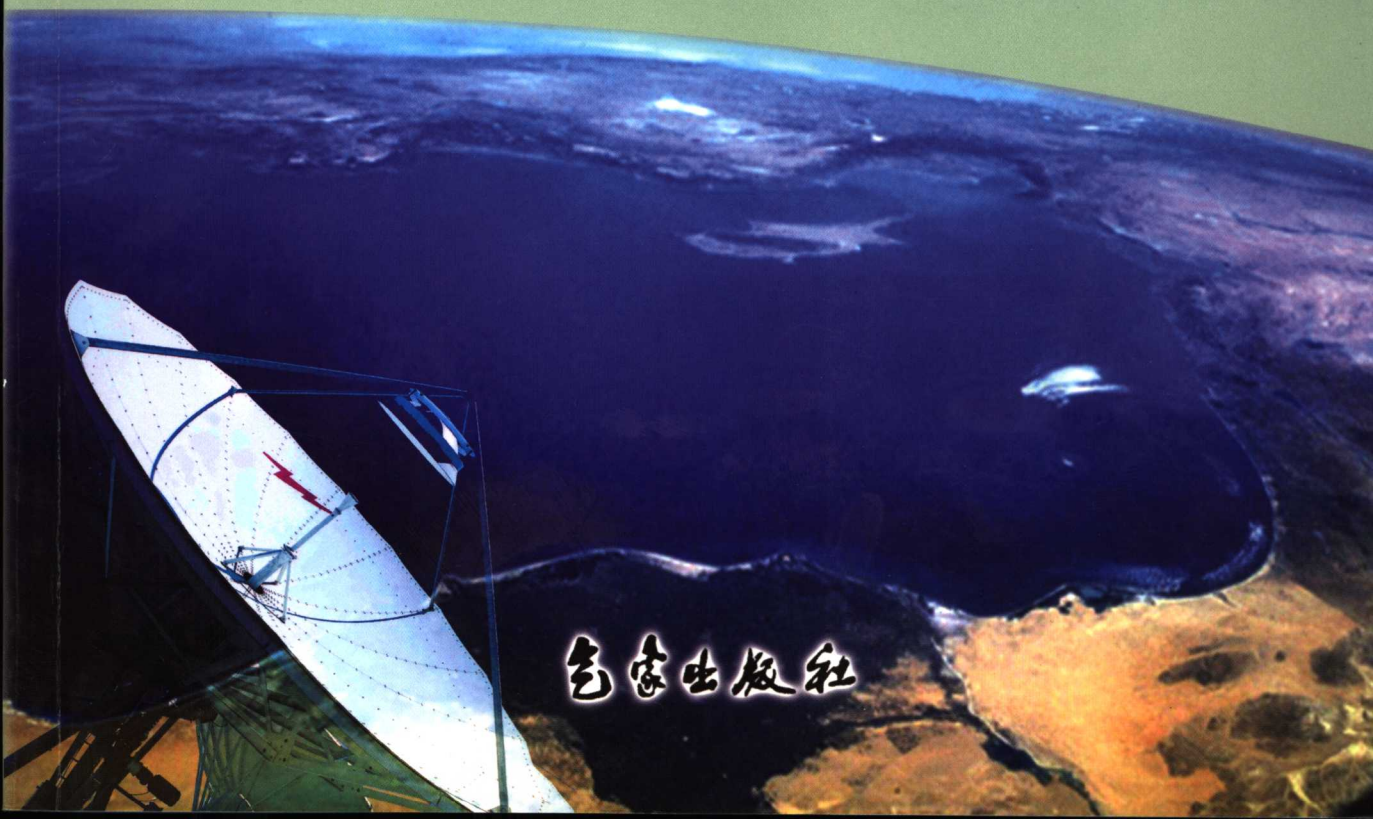


◆ 现代大气科学丛书 ◆



现代气候学概论

王绍武 赵宗慈 编著
龚道溢 周天军



气象出版社

现代大气科学丛书

现代气候学概论

王绍武 赵宗慈 编著
龚道溢 周天军

气象出版社

内 容 简 介

本书共分四部分:(1)气候学总论:包括气候学学科的现状与中国气候,共两章;(2)气候变化:包括各种时间尺度的气候变化,重点是中国的气候变化,共两章;(3)短期气候变率与预测:重点讲述厄尔尼诺及季度气候预测,也包括海气相互作用及气候模拟研究,共三章;(4)长期气候变化成因分析及预测:讲述了太阳活动、火山活动及人类活动对气候变化的影响,又专门讲述了近年来才开始研究的十年~百年尺度气候变化,共三章。全书十章,用较通俗的语言,介绍现代气候学的现状,重点是与中国有关的研究。但是气候是全球性的,因此,在必要时,也介绍了国外的研究,以及气候学在世界范围的现状。本书可供气象、农业、林业资源与环境等科技人员、干部阅读,也可作为有关院校教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代气候学概论/王绍武等编著.

—北京:气象出版社,2005.10

ISBN 7-5029-4026-X

I. 现… II. 王… III. 气候学-概论 IV. P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111351 号

Xiandai Qihouxue Gailun

现代气候学概论

王绍武 赵宗慈 龚道溢 周天军 编著

气象出版社出版

(北京海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

总编室:010-68407112 发行部:010-62175925

网址:<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑:李太宇 袁信轩 终审:章澄昌

封面设计:张建永

*

北京市北中印刷厂

气象出版社发行

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.00 字数:410 千字

2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月第一次印刷

印数:1~1000 定价:40.00 元

ISBN 7-5029-4026-X/P·1448

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社
发行部联系调换

《现代大气科学丛书》 编辑委员会

主 编 黄荣辉
副主编 李崇银 王绍武 黄美元
编 委 (以姓氏笔画为序)
王明星 刘式适 孙淑清
朱瑞兆 邱金桓 陈洪滨
郑循华 徐华英 高守亭
编 辑 耿淑兰

作者简介

王绍武，男，汉族，1932年11月出生，河北省束鹿县人。早年就读于天津耀华中学及南开中学。1951年入清华大学气象系，1952年转入北京大学物理系气象专业。1954年留校工作。北京大学物理学院大气科学系教授、博士生导师。曾任气象学会常务理事、《气象学报》副主编、政府间气候变化协调委员会(IPCC)科学报告主要作者。主要从事气候学研究，重点为古气候，气候诊断及气候预测。至今发表科学论文180余篇，专著及主编文集十余部。曾多次出访美、日、英、德等国家参加学术会议或讲学。两次在美国华盛顿大学及纽约州立大学任访问学者。三次赴台湾访问、讲学。1986年至今指导硕士生、博士生及博士后共约30名。

序

大气科学是研究地球大气圈及其与陆面、海洋、冰雪、生态系统、人类活动相互作用的动力、物理、化学过程及其机理。由于人类的生产和生活活动离不开大气,因此,这门科学不仅在自然科学中具有重要的科学地位,而且在国家的经济规划、防灾减灾、环境保护和国防建设中都具有重要的应用价值。

随着人类生产活动的发展和科学技术水平的提高,特别是电子计算机和气象卫星及太空遥感探测大气技术的提高,大气科学得到了迅速的发展,它已形成了诸多分支学科,如大气探测学、天气学、气候学、动力气象学、大气环境学、大气物理学、大气化学等分支学科。为了回顾近百年来大气科学的发展成就以及展望 21 世纪初大气科学的发展、创新与突破,我们编写了这套《现代大气科学丛书》。它包括《大气科学概论》、《大气物理与大气探测学》、《大气化学概论》、《大气环境学》、《动力气象学导论》、《现代天气学概论》、《现代气候学概论》、《应用气候学概论》共八卷。本书是其中的一卷。

在编写这套丛书时,内容力求简明扼要、通俗易懂,每部书的内容结构力求全面、系统。各卷还包括了对各分支学科的发展历程、研究方法和对今后的展望,以使读者对现代大气科学各分支学科有一个全面的了解。

由于我们学识有限,加之本套丛书涉及的内容较为广泛,书中难免有不妥之处,希望读者给予指正。

本套丛书得到了中国科学院大气物理研究所的大力支持和资助,在此表示衷心的感谢。

此外,《中国现代科学全书》编辑工作委员会对本套丛书的组稿和书稿的排版做了不少工作,在此给予说明。王磊和刘春燕两同志对于本套丛书书稿做了许多工作,鲍名博士在此套丛书出版的联系方面付出许多精力,也在此表示感谢。

《现代大气科学丛书》编辑委员会

主编 黄荣辉*

2005 年 5 月 18 日

* 黄荣辉,中国科学院院士

前 言

作为《现代大气科学丛书》其中的一卷来编写气候学有很大的难度,主要体现在三个方面:第一、中国与全球,第二、经典与现代,第三、通俗与准确。

第一个方面是显而易见的。如果只限于讲述中国的研究,不仅不能反映现代气候学的水平,从现代气候学研究的是全球气候系统这个概念来看也是不合适的。但是,也不能只讲全球气候的行星尺度问题。因此,有关中国与全球的材料份量就是一个关键。我们的作法是在讲气候模拟,成因分析等问题时,国外的有关全球的内容多一些,因为确实成果较多。但在讲气候的特征、诊断、预测等问题时则以中国的内容为主。

第二个方面是经典与现代的问题。例如,关于气候分类,物理气候等研究在气候学史中占有一席之地,但从现代气候学的发展来看,是属于古典或经典的研究。因此,一般情况下,本卷不再介绍这方面的内容。但是什么问题是属于经典的,自然会有不同的见解。例如,本卷中就一再谈到沃克(Walker)在 20 世纪 20~30 年代的研究,并认为在现代气候学发展中仍有重要的现实意义。这反映了本卷主编及作者们的思想。类似的例子很多,就不一一列举了。

第三个方面是技术性的。但是,也是学术性的。要做到通俗易懂,同时要照顾到非专业读者的接受能力。一方面要比较准确地反映气候学的最新研究成果,一方面又要使有大学程度但非气候(或大气科学)专业的读者能读懂,这的确是一件不容易做到的事情。因此,本卷基本上不包括任何公式或方程式,也不采用任何理论推导。有一些理论性内容,也一律采用语言描述。但是,终究气候学是大气科学的一个分支。因此,在讲述气候学的内容时,不可能对一些气象名词如气旋、反气旋等再作解释。不熟悉的读者可略去这些内容,或者最好也能读一读《现代大气科学丛书》的其他卷。

20 世纪气候学有了飞跃的发展,或者说发生了一次科学革命。这个革命就产生于最近的 20 年。这 20 年的发展使气候学以崭新的面貌呈现于世界科学之林。所以,我们从制定本卷大纲开始,就致力于反映这次气候学的革命。并且认为,只有这样才能与“现代科学”的名称相适应。

此外,应该说明气候学的内容是十分广泛的,例如,全球气候监测系统,就是气候学革命的基础,又如气候模式也是现代气候学研究的主要工具。各种气候学理论、假说,都要得到气候观测的支持,也要用气候模式做气候模拟来检验。但是由于专业性过强,我们并没有给这两个题目设一章,而只是在有关的章节作扼要

的介绍。所以,显然本卷书不是一本包罗气候学各个方面内容的丛书,而是一本有选择地阐明作者们对现代气候学发展及成就见解的书。

综上所述,本卷书的编写反映了作者们的见解。这些见解是否正确,只能由读者来评议。因此,敬请各位读者对本卷书的编写提出宝贵的意见,

由于这是一本通俗性的书,因此不可能给出完整的文献。所以,在行文中提到一些作者,但是并没有给出文献。有时也不可能把所有的作者都列出来,只是把引用的图、表来源注出原作者。

各章作者:第一章,王绍武;第二章,周天军;第三章,龚道溢;第四章,王绍武;第五章,王绍武;第六章,王绍武;第七章,周天军;第八章,王绍武;第九章,龚道溢;第十章,赵宗慈。龚道溢对各章的文字提出不少宝贵意见,做了大量工作,并帮助各章选择适合的图例;陈振华为不少章节的文字录入作了很多工作,在此一并表示感谢。

王绍武

2005年5月于北京

swwang@pku.edu.cn

目 录

序

前 言

第一章 概论	1
第一节 气候与气候系统	1
第二节 气候系统的研究	6
第三节 现代气候学革命	13
第四节 20 世纪气候学理论研究的成就	17
第五节 21 世纪气候学研究展望	22
第二章 中国气候与东亚大气环流	28
第一节 中国的气候特征	28
第二节 东亚大气环流	32
第三节 季风	37
第四节 梅雨	42
第五节 寒潮	46
第六节 台风	49
第三章 20 世纪全球与中国气候变率	53
第一节 近百年全球气候变暖	53
第二节 20 世纪全球降水状况	57
第三节 中国气温变化	60
第四节 中国降水变化	63
第五节 中国的气候灾害	66
第四章 气候变迁	72
第一节 第四纪气候变迁	72
第二节 全新世气候	77
第三节 全新世大暖期	82
第四节 中世纪暖期及小冰期	87
第五节 500 年旱涝研究	93
第五章 ENSO 系统	99
第一节 厄尔尼诺的概念	99
第二节 ENSO 系统	105
第三节 ENSO 的气候影响	110

第四节 ENSO 机制与模拟研究·····	115
第五节 ENSO 预测·····	120
第六章 短期气候预测·····	126
第一节 短期气候预测历史及现状·····	126
第二节 用 GCM 作月平均环流预测·····	129
第三节 季度预测·····	135
第四节 中国汛期降水预报·····	139
第五节 气候可预报性·····	143
第七章 气候系统内的相互作用·····	149
第一节 海气相互作用·····	149
第二节 大洋环流对气候的影响·····	153
第三节 冰雪圈对气候的影响·····	158
第四节 高原积雪与暖池对气候的影响·····	161
第五节 气候系统相互作用的模拟研究·····	165
第八章 10 年~100 年尺度气候变率·····	171
第一节 大气环流的年代际变率·····	171
第二节 北太平洋的年代际变率·····	176
第三节 北大西洋涛动与温盐环流·····	179
第四节 热带大西洋偶极型·····	185
第五节 10 年~100 年气候变率的可预报性·····	190
第九章 影响气候系统的外强迫因子·····	194
第一节 太阳活动·····	194
第二节 太阳活动对气候的影响·····	198
第三节 火山活动·····	202
第四节 火山活动对气候的影响·····	206
第五节 外强迫作用对气候学影响的模拟·····	210
第十章 人类活动对气候的影响·····	214
第一节 人类活动·····	214
第二节 全球气候变暖的检测·····	218
第三节 全球气候变暖的模拟研究·····	220
第四节 全球变暖对人类与社会发展的影响·····	225
第五节 全球气候变暖的对策·····	230
参考文献·····	234

第一章 概 论

第一节 气候与气候系统

一、气候概念的发展

什么叫气候？长期以来人们都把气候看作气象要素的平均。因此，月平均气温、月总降水量及月平均气压就构成了气候的三大要素。而且直到本世纪初还有人认为，假如有了 30 a 的观测值，就可以得到一个稳定的平均值。所以，至今还把气候要素平均值称为标准值(normal)。但是，后来人们逐渐认识到，30 a 平均值也不是一成不变的，承认气候也有变化。不过提到气候，人们首先想到的还是温、湿、压三个要素。这就是经典的气候概念。

然而，近 20 年的科学发展，使得气候系统的概念逐渐取代了经典气候的地位。因为，人们认识到要解释气候的形成，探讨气候变化的原因，并进而预测气候变化，就绝对不能仅限于研究地面气候这三个要素，甚至也不能仅限于研究大气本身，而是要研究包括大气、海洋、冰雪、陆面及生物圈的整个系统。因此，就形成了全球气候系统的概念。

大概有三个因素推动了从经典气候到全球气候系统概念的发展。

第一，从 20 世纪 50 年代末到 70 年代短期数值天气预报取得了巨大的进展。人们开始研究逐日天气预报向中期延伸的可能性，并试作 5 d、10 d 乃至月平均环流长期数值预报。但是研究表明，为了提高预报水平，特别是为了延长预报时效，必需考虑下边界：海洋、陆面（包括地形）及冰雪的影响。进一步也许还要考虑这些下垫面状况的变化，这就要求建立海气或地气耦合模式。所以，需要考虑气候系统。

第二，20 世纪 60 年代、70 年代以来，世界上陆续出现了许多气候异常现象，有的持续一二十年，如西非干旱，有的持续一二年，如 1982~1983 年的厄尔尼诺事件。这些气候异常对农业、经济乃至社会造成巨大影响。但是，这些气候异常现象又不是大气本身所能解释的。据信西非的干旱，与南、北大西洋的海温异常分布有关。而厄尔尼诺事件则本身就是海洋事件。这也是促使大家从气候系统来研究气候的重要原因。

第三，从 19 世纪至今，先是砍伐森林，后来更主要是燃烧矿物燃料：煤、石油、天然气，估计已使大气中二氧化碳(CO_2)的浓度增加了 1/4 以上。再加上甲烷、氧化亚氮、氯氟碳化物等微量气体，很可能在下一个世纪中叶之前，大气中的 CO_2 浓度将达到比工业前增加 1 倍的程度。那时，即使有海洋的延缓作用，到 2100 年气温也可能上升 $1.4\sim 5.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。人类活动对气候的影响已经达到了不可忽视的地步。显然，对这个问题的研究，也不可能只限于大气这一个成员，而必需扩展到整个气候系统。由于气候系统不是局地的，而是全球性的，所以经常称为全球气候系统。

二、气候系统的成员

气候系统包括五个成员。

1. 大气 这是气候系统的主体部分，大气环流是严冬、酷暑、干旱、洪涝等气候异常发生

的直接原因。在经典气候学中,与太阳辐射、海陆分布并列为气候形成的三个因素。但是从能量学角度来看,大气是非常脆弱的。即使认为气候系统只包括表层 100 m 深的海洋,大气所具有的热量也只占系统总热量的 3.4%,因此,大气对气候系统其他成员的影响多与动力学有关。而大气以外的其他成员,如海洋、冰雪、陆面对大气的影响则主要是热力作用,这是需要注意的。此外,由于自然或人为的原因,大气成分及其悬浮物能产生激烈的变化,改变气候系统的热量平衡,从而改变气候。在自然原因中主要是火山活动造成平流层气溶胶,散射太阳辐射,减少地面接收到的太阳能。这种作用称为“阳伞效应”。人为的因素主要是大气中 CO_2 等温室气体浓度增加,使“温室效应”加剧,这是当前气候研究中的一个重要课题。

2. 海洋 海洋约占地球表面积的 70.8%,仅只考虑 100 m 深的表层海水,即占整个气候系统总热量的 95.6%。因此,可以认为海洋是气候系统的热量储存库。穿过大气到达地球表面的太阳辐射,约有 80% 被海洋吸收,然后,通过长波辐射、潜热释放及感热输送的形式传输给大气。所以,很容易理解海洋在气候系统中占有多么重要的地位。由于海洋热惯性大,海温异常不仅空间尺度大,持续时间也长,在中高纬一般可持续数月之久,低纬则持续性更大,表征厄尔尼诺的赤道太平洋海温正或负距平经常可保持 1 a 以上。对 CO_2 增加造成温室效应的估计,就与海洋对 CO_2 的溶解及向深海的输送有密切关系。因此,海洋对气候变化与气候异常的形成有重要意义。

3. 冰雪圈 指大陆冰盖、冰川、海冰、永冻土及季节性雪盖。目前全球陆地约有 10.6% 被冰覆盖。海冰的面积比陆冰要大,但由于世界海洋广阔,仅占海洋面积的 6.7%。无论海冰还是陆冰对地表热平衡均有很大影响。主要有两方面的作用,即增加反照率,以及阻止地表与大气间的热量交换。反照率与辐射成正反馈。因此,在气候模式中考考虑冰雪覆盖的变化,往往可以增加模式的敏感度。

对月、季尺度来讲,冰雪圈与大气则是相互作用的。经验资料与气候模拟都证明,高纬海冰增多如北大西洋的重冰年。春夏融冰季节的气候与轻冰年显著不同。但同时也有资料证明,冰雪的面积、持续时间与同期及前期的大气环流有密切关系。

在研究几十年到几百年的气候变化时,人们经常把冰川进退当成一个重要的指标。但由于惯性作用,冰川的变化常落后于气候变化。落后从几年到几十年,视冰川大小及具体环境而异。

4. 陆面 有时亦称岩石圈。当然,古代大陆漂移、造山运动这些岩石圈的巨大变化,对地质时期的气候变化影响巨大。但是对于月到几十年,最多几百年的气候变化,全球海陆分布可以认为是定常的。这时,陆面对大气的影响主要有两个方面:即动力学的与热力学的。海陆分布与山脉大地形是大气环流形成的重要因素。另外,一般认为陆面对大气的热力影响不及海洋,但近来观测事实及数值模拟均证明,土壤温度及干湿对大尺度及局地环流与气候均有相当的影响。因此,陆面也是一个气候研究中不可忽视的因素。

5. 生物圈 实际上影响较大的是世界范围的植被。植被的变化与人类活动有密切关系,主要是砍伐森林及过度放牧,开垦农田等。自然植被如森林的反照率一般仅有土壤的 1/2,植被破坏减少对太阳辐射的吸收,同时还会影响水分循环。大范围的植被变化甚至可能影响全球的热量平衡及水分平衡。对局部地区更容易使气候恶化。西非萨赫勒近 20 年的持续干旱就可能与环境破坏的恶性循环有关。

植被的破坏,如砍伐森林,是 19 世纪大气中 CO_2 增加的主要原因。自然植被的含碳量为农业用地的 20~100 倍。破坏自然植被释放出大量的 CO_2 ,又减少了吸收 CO_2 的源,至今仍然

是大气中 CO_2 增加的一个因素,虽然 20 世纪以来燃烧矿物燃料逐渐占据了压倒优势。因此,生态系统的变化也是在研究气候变化时一个不可忽视的因素。当然,问题是很复杂的,绝不仅限于以上指出的这两个方面。

三、气候变化与变率

愈来愈多的证据表明,气候变化有一个非常宽的时间谱。如果气候变化的最短时间尺度为 1 个月的话,往前可以一直延伸到以万年为单位的变率。但是这个谱不是一个均匀的谱,而是在某些频率振幅特别强,换句话说,气候变化集中在几种不同的时间尺度(见表 1.1.1)

表 1.1.1 不同时间尺度的气候变化(王绍武,1994)

气候变化类型	时间尺度(a)	振幅($^{\circ}\text{C}$)	变化原因	检测手段
(1)地质时期				
a. 大冰期	$10^7 \sim 10^8$	10	大陆漂移,造山运动	地质证据
b. 冰期-间冰期	$10^4 \sim 10^5$	10	地球轨道要素	地质证据
c. 气候振荡	10^3	5~7	热盐环流	地质证据,深海沉积,冰芯
(2)冰后期-历史时期	$10^2 \sim 10^3$	1~2	太阳活动、火山活动、热盐环流	冰芯、年轮、孢粉、珊瑚、史料
(3)现代气候变化	$10^1 \sim 10^2$	0.5	太阳活动、火山活动、人类活动	观测资料
(4)气候振荡	$10^0 \sim 10^1$	1~2	系统内部相互作用	观测资料
(5)气候异常	$10^{-1} \sim 10^0$	3~5	大气环流异常系统内部相互作用	观测资料

1. 地质时期气候变化 很长时间以来,人们谈论较多的是大约 650 MaBP(六亿五千万年前)的震旦纪大冰期,270MaBP 石炭—二叠纪大冰期,以及最后开始于 2.4MaBP 的第四纪大冰期。但实际上,近 1000Ma 就可能发生过 6~7 次大冰期。大冰期常持续几十个 Ma。大冰期之间约隔 200~300Ma,为大间冰期。大冰期中又可分为若干冰期与间冰期旋迴,例如第四纪中每 100 000~200 000 a 就出现 1 次冰期、间冰期旋迴。冰期中最冷也就是冰盖最盛时,全球平均气温约比现今低 10~12 $^{\circ}\text{C}$ 。间冰期则与目前相当或比目前气候稍暖。关于地质时期为什么发生大冰期,至今尚无完善的解释。但至少有一点可以肯定,那时地球上的海陆分布,山脉隆起与现代大有不同。这显然对大冰期及大间冰期产生影响。而第四纪大冰期中的冰期与间冰期交替则可能从地球轨道要素的变化得到解释。图 1.1.1 左边两条曲线给出近 900 000 a 的冰量及近 150 000 a 温度变化,由此可以对第四纪大冰期及最近 1 次冰期-武木冰期有一个概括的了解。近年来,学者们指出,无论在冰期或间冰期均有平均周期约 1.5 ka(千年)的气候振荡,其形成原因可能与热盐环流的变化有关。

2. 冰后期的气候变化 大约 18 000 aBP 冰期达到最盛(见图 1.1.1 中间一条曲线)。从 14 000 aBP 冰盖开始迅速融化,到 10 000 aBP 进入冰后期,即全新世。这段时间是气候回暖时期,全球冰盖消融,大陆冰川后退。在大约 5 000~7 000 aBP 形成冰后期中的最暖时期:全新世大暖期,大暖期后,气候逐渐变冷,最冷的一段时期约出现于公元 1550~1850 年之间,称为“小冰期”。图 1.1.1 中从右数第 2 条曲线就示意性地画出小冰期的两个冷期。

3. 现代气候变化 一般指 100 a 至多不超过 200 a 间的气候变化。其主要特点是从 19 世纪末的冷期逐渐回暖(见图 1.1.1 最右边一条曲线)。这段时期开始于小冰期末期的冷期中,气候比较寒冷。以后气温上升,在 20 世纪 40 年代变暖达到高峰。以后气温略有下降。从 1970 年

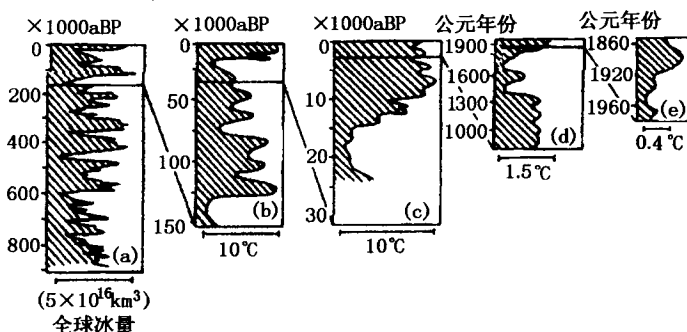


图 1.1.1 各种时间尺度气温变化示意图(Goudie,1992,引自黄春长,1998)

(a)近 900 000 年全球冰量;(b)近 150 000 年气温;
(c)近 30 000 年气温;(d)近 1 000 年气温;(e)近 100 年气温

代末到 1980 年代初又一次变暖,1990 年代已经成为近 100 a 最暖的 10 a。由于变暖主要发生在 20 世纪,有时亦称 20 世纪变暖。

研究现代气候变化以观测资料为主。其他如树木年轮、冰芯、史料、冰川进退、海平面高度变化均可作为旁证。虽然利用观测资料研究气候变化较用其他资料精度要高得多,但在 19 世纪末到 20 世纪初,资料的复盖面还很不完整。因此,研究气候变暖有时亦需要使用代用资料。

4. 气候振动 这里指时间尺度在几年到几十年的气候变化,主要包括年际变化及年代际变化。由于这些变化大都是循环性的,冷暖、旱涝阶段交替出现。所以人们有时称之为气候振动。振动形成的原因可以分为两类:一类是气候系统以外的因子,强迫气候系统产生振动响应;另一类则是气候系统内部各成员之间的相互作用而产生的振动。很可能现在观测到的年际及年代际气候变率大都是气候系统内部的振动。一些外部因子如太阳活动 11 a 周期是否可能强迫大气产生 11 a 及其谐波 5~6 a 周期,尚有争议。

5. 气候异常 这是指月、季尺度气候状况与平均值的巨大偏差。干旱、久雨、夏季低温、冬季严寒都是气候异常。不过,究竟与平均值的偏差大到什么程度才可视为异常需要有一个标准。世界气象组织(WMO)把距平达到方差两倍的情况称为异常,这大约相当 2.3% 的概率。所以在实际工作中有时也把大约 30~40 a 一遇的现象称为异常。

四、气候变化的原因

我们可以把能造成气候变化的因子分为两类,一类称为外部因子,一类称为内部因子。外部因子不受或者基本上不受气候系统状况的影响,也可以说,气候系统对这些因子没有反馈作用。而内部因子主要指系统内部各成员之间复杂的反馈作用。外部因子主要有以下几种:

1. 太阳变率 太阳辐射的各种形式,包括光辐射及粒子辐射,可能在 $10^0 \sim 10^9$ a 内变化,也可以说从地球形成以来就没停止过变化。但人们了解比较多的只是近 5 000 年的情况。这又可以分成 3 种时间尺度:(1)根据 ^{14}C 的变化推测出太阳活动的增强减弱时期,同时发现增强期气候偏暖,减弱期气候偏冷。例如,小冰期、(1550~1850 年)就可能与太阳活动的一个极弱期—蒙德极小期(1645~1715 年)对应。这种增强,减弱期可持续数十年以上到数百年;(2)太阳活动准周期振荡,如 80~90 a 周期、20~30 a 周期、11 a 周期、5~6 a 周期;(3)太阳自转,有证据表明随 27.5 d 周期而转动的太阳扇形磁场,对地球高层大气环流有影响。也有人发现磁

爆后 3~5 d 海平面气压场有反映。

2. 地球轨道要素 米兰科维奇(1941)证明,用地球环绕太阳运行轨道要素的变化可以解释第四纪的冰期、间冰期。轨道要素主要包括公转轨道偏心率,地球自转轴对黄道面的倾斜度,以及岁差,即二分点的运动。这 3 个要素各有不同的周期。由于周期均在万 a 以上,所以主要用来解释第四纪的气候变化。

3. 火山活动 火山爆发造成平流层气溶胶激烈增加,削弱了到达地球表面的太阳辐射。按气溶胶在大气中的存留时间计算,单个火山爆发的影响一般不超过 1~2 a。但火山活动集中时期以及火山活动沉寂时期,当会影响 10 a 或甚至 100 a 尺度的气候变化。地质时期火山活动也有激烈变化。因此,可能影响到大冰期及大间冰期的交替。例如,20 世纪 20 年代到 40 年代是火山沉寂期。因此,有人认为这段时期气温上升可能与此有关。1991 年皮纳图博火山爆发,造成了 1992 年夏季欧亚大陆的低温。火山活动的影响是比较明显的。

4. 人类活动的影响 可能一直到 19 世纪中人类对地球环境还没有产生显著的影响,但是随着社会的发展,人口的增长,特别是工业化,地球表面及大气的自然状态受到破坏。主要是由于砍伐森林和燃烧矿物燃料,大气中的 CO_2 浓度迅速增加造成温室效应加剧。1960 年代以来氯氟碳化物等微量气体的增加又加速了这一过程。同时由于过渡放牧,破坏原始森林及自然植被改变了地表的物理状况,城市的扩展造成热岛效应、大气污染、平流层臭氧受到破坏使南极臭氧洞扩大。这些都直接或间接地改变了气候系统的状况。因为人类活动的影响有一定独立性,在一定程度上亦可视为气候系统外部的影响。

系统内部因子主要指系统各成员之间的相互作用。这些相互作用可以分为两类,即正反馈与负反馈过程。所谓正反馈过程是成员之间相互作用使得已经出现的气候异常增强,而负反馈过程则使气候异常减弱。如果只有正反馈过程,气候异常会无限增大。同样,假如只有负反馈过程,则气候异常又无法发展。因此,我们观测到的各种各样的气候异常,形成、消失、彼此交替,正是气候系统中复杂的正、负反馈过程相互作用的结果。气候系统内各成员的相互作用是年际及年代际气候变率形成的主要原因。这在以下各章中均有涉及,这里就不再讲述了。

五、气候与人类

气候环境是人类赖以生存的地球环境的一部分,也是最重要的部分。人类的文明史一般只有 5 000~7 000 a。也就是说,文明的发展出现于冰后期的大暖期。显然,这与当时气候温暖、湿润有利于人类生活有关。

以后,随着生产与社会的发展,特别是农业生产需要,天文学知识以及物候知识积累起来。我国诗经中就有一年四季十二个月物候的记载,何时气候严寒,何时准备春耕讲得井井有条。所以,最早的气候概念是与物候密切联系在一起的。

国外有一种理论认为,社会的发展程度愈高,对环境(其中包括气候)的依赖性愈大。例如,社会发展程度不高时,播种面积主要限于适合耕作的地区。扩大播种面积就增加了对气候的敏感度。同时,采用高产品种也会增加对气候的敏感度。工业、交通运输的发展对天气气候灾害的敏感度是不言而喻的。古代一次登陆台风,与现在一次登陆台风所造成的破坏是不可同日而语的。

按照这个理论,社会的发展及其对环境的依赖与日俱增。但是,当社会发展到较高程度之后,对环境的依赖就会逐渐减小。这表明社会已经有了足够的能力来抵御或削弱环境的不利因

素所带来的影响。从理论上讲,这个看法可能是正确的。但是,在实践中,特别是关系到气候环境,则距离能够抵御、削弱气候灾害的影响,人类还有很长的道路要走。

所以,当前气候科学的任务,主要是预测气候变化,气候异常与气候灾害的发展,使得人类有所预防,从而尽量减少对农业、工业、交通运输、乃至整个社会的影响。当前人们面对的气候灾害主要来自两个方面:一种如干旱、洪涝、暑夏、严冬。由于其成因主要是气候系统各成员之间的相互作用,所以称为自然气候变率。对这些灾害的预测时效一般为1个月以上到1年左右。因为时间尺度较短。所以称为短期气候预测。另一种气候变化,时间尺度较大。如全球气候变暖,其形成原因,主要是人类活动的影响。由于影响的不是一时一地的气候,所以主要影响气候趋势,造成气候变化。这种预测称为长期气候变化预测。20世纪气候学的发展,基本上就是围绕这两种预测发展的。

各种时间尺度的气候变化,对社会发展的影响都是巨大的。例如,大家知道厄尔尼诺是一种海洋事件,能造成重大的气候灾害,如印度尼西亚的干旱、澳大利亚干旱、秘鲁洪水等。1982~1983年的强厄尔尼诺事件造成的经济损失估计在120~200亿美元之间。全球气候变暖使海平面上升,过去100年已经上升了15~20 cm,今后还要继续上升,对世界各国的沿岸低地,特别是低地国家如荷兰、孟加拉国有很大的威胁。因此,气候学的研究已经到了与社会发展息息相关。1980年代末建立了政府间气候变化专门委员会(IPCC),并于1990年秋在日内瓦召开的第2次世界气候大会上分3个组提出报告,即科学评价组、影响评价组及对策组分别出版了IPCC 1990版报告。以后1992年出版了补充报告,1995年出版了第2版报告。2001年出版了第3版报告。在科学分析的基础上,1992年4月于巴西里约热内卢召开了世界环境与发展大会。提出了“世界气候框架公约”准备逐步限制温室气体排放,保护大气环境。可见气候学研究与现代社会的发展有多么密切的关系。

第二节 气候系统的研究

一、气候监测

这是20世纪70年代提出来的一个名词。其意义是对整个气候系统进行全面的观测,以便及时发现气候系统状况的任何值得注意的变化。所以,气候监测是气候系统研究的基础。下面分3个方面介绍气候监测的内容。

1. 大气常规观测 从19世纪后期直到20世纪30年代,世界范围的气候观测仅限于地面气温、降水量及气压。美国最早绘制了20世纪以来北半球月平均海平面气压图。不少国家绘制了北半球月平均气温距平图。对流层气温序列较短,最早开始于1958年,而且仅限于北半球。1978年以来有了卫星观测,这是一个覆盖最完整分辨率最均匀的序列,并且包括南北两个半球。但是,直到最近才建立了全球降水量的格点序列,而且主要限于全球陆地。因为这3种要素观测序列长,而且是反映气候状况的基本量。所以,至今仍是气候监测的最主要内容。

20世纪30年代之后,逐渐有了高空探测。前苏联曾率先绘制了1930年代500 hPa高度周期平均图。但大多数记录是用地面观测外推的,精度较差。美国从1940年代开始作5 d(天)及30 d 700 hPa高度平均图。但主要限于西半球北美及邻近海域。日本绘制了世界上最早的北半球500 hPa高度月平均图,序列开始于1946年。西德的序列开始于1949年,且早期仅限于以欧洲为中心的一个正方形区域,缺亚洲及太平洋。中国的北半球500 hPa高度月平均图序列开

始于1951年,比较完整,南部达 10°N 。从第二次国际地球物理年(1957~1958年)开始,西柏林自由大学气象研究所绘制出版了一系列平流层环流图,包括逐日及月平均50 hPa,30 hPa及10 hPa高度及温度图,对推动平流层的研究作出了巨大贡献。目前NCAR等单位初步完成了1958年以来的再分析资料,包括各等压面层的高度、温度、风以及地面的气温、降水量的格点资料。由于是逐日资料,不仅对气候学,对天气学与数值天气预报等均有重要意义。

2. 海洋及系统其他成员的常规观测 要对全球气候系统进行监测,海洋是一个重要组成部分。但至今资料最丰富的还是海面温度(SST),过去SST主要靠商船观测。CODAS资料库收集了1850年以来的资料,但1949年之前,特别在20世纪末之前,资料覆盖面很小。目前,由于卫星观测精度的提高,已经可以提供SST的格点资料。但与船舶观测还有一定差异,所以多用混合资料绘制SST的距平图。

当然,海洋观测不只是海面温度,还有盐度、洋流及深海海温等。但大部分均无系统观测资料,只是近年来才给出赤道太平洋混合层深度(用 20°C 等温线的深度表示)及800 m深至海面的温度距平。日本在西太平洋沿 137°E 的经向剖面也积累了系统的观测资料。但从全球角度看,对盐度及深海海温还缺少系统的长期观测。

雪盖与海冰面积观测是对冰雪圈监测的主要内容。在卫星观测系统建立之前,除了个别站有局地雪盖观测之外,只有前苏联有目测海冰序列,它开始于1924年。目前在美国科罗拉多大学与美国国家海洋大气管理局联合,设立了全球冰雪分析中心,公布每周及月平均南北半球海冰及雪盖面积,雪盖序列从1966年开始,海冰序列从1974年开始。加拿大科学家已经重建了20世纪以来的雪盖资料。

过去土壤温度及湿度的大范围观测资料很少。近来已经开始有了比较系统的资料,全球植被也由于有卫星观测,而有了高分辨率资料,这些为气候系统模式提供了重要的基础。

3. 非常规观测 除了以上所列举的常规观测之外,目前还进行许多特殊观测,对监测气候系统的变化有非常重要的意义。太阳常数观测就是一个重要的项目,观测已经表明太阳常数是变化的,而且与太阳黑子11 a周期中的黑子数成正比。因此,反过来看近百年来以地面为基础进行的太阳常数观测,应该承认还是有一定意义的。特别对世界不同地区几十个站的平均,可能减少误差,并在一定程度上反映太阳常数真正的变化。不过,目前还缺少卫星观测与地面观测的详细比较。

大气中微量气体的观测也是很重要的,冰芯气泡提供了 CO_2 的长序列。其他微量气体如甲烷、氯氟碳化物(CFCs)大多数也建立了相应的序列。此外,如平流层气溶胶观测对研究火山爆发的气候影响很重要,也有了相应的卫星观测资料。

二、气候诊断

气候诊断即根据气候监测结果对气候变化与气候异常作出判断,这是当前气候系统研究中一个十分活跃的领域。至今有关气候监测与气候诊断的系统性出版物就有5种:

(1)美国气候预测中心(CPC)的气候诊断公报(Climate Diagnostic Bulletin),月刊。

(2)联合国世界气象组织(WMO)的气候监测公报(Climate System Monitoring Monthly Bulletin),月刊。

(3)英国东安吉利亚大学的气候监测(Climate Monitor),季刊,另有年的专号,即每年5期。